

FAU Studien aus dem Maschinenbau 373

**Johannes Strauß**

# Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung



Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 373**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Johannes Strauß

# **Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Photonische Technologien  
(LPT)

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Erlangen

FAU University Press

2021

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

Bitte zitieren als

Strauß, Johannes. 2021. *Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 373. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-442-4

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-441-7 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-442-4 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-442-4

**Die akustooptische Strahlformung  
in der Lasermaterialbearbeitung**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Johannes Strauß

aus Bamberg

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 30.11.2020

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt  
Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Univ. Stuttgart.

## Vorwort

Allen, die an mich  
geglaubt haben und  
mich unterstützt haben,

- DANKE -

Euer Johannes



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....                                       | ix        |
| Bildverzeichnis .....  | xiii      |
| <b>1 Einleitung.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Stand der Technik und Forschung.....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1 Limitationen bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen<br>Laserpulsen.....     | 3         |
| 2.2 Strahlführungs- und -formungssysteme .....                                       | 5         |
| 2.2.1 Galvanometerscanner.....   | 5         |
| 2.2.2 Piezoscanner .....   | 5         |
| 2.2.3 Polygonscanner.....  | 6         |
| 2.2.4 MOEMS-Scanner .....  | 6         |
| 2.2.5 Elektrooptische Deflektoren .....  | 7         |
| 2.2.6 Adaptiver Spiegel .....  | 8         |
| 2.2.7 MEMS-SLM .....   | 8         |
| 2.2.8 LCoS-SLM.....  | 8         |
| 2.2.9 DLP .....  | 9         |
| 2.2.10 Akustooptische Deflektoren .....  | 9         |
| 2.3 Der akustooptische Effekt .....  | 10        |
| 2.4 Aktuelle Forschung zur akustooptischen Strahlformung.....                        | 15        |
| 2.4.1 Der akustooptische Frequenzanalysator.....                                     | 15        |
| 2.4.2 Laserlinie durch Frequenzüberlagerung.....                                     | 16        |
| 2.4.3 Die steuerbare Gradientenoptik .....   | 17        |
| 2.4.4 Die akustooptische Linse .....   | 19        |
| 2.5 Möglichkeiten der Energieverteilung eines Laserstrahls auf<br>dem Werkstück..... | 20        |
| 2.6 Datenübertragungsrate in Spots/s.....  | 22        |
| <b>3 Zielsetzung.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>4 Die akustooptische Strahlformung .....</b>                                      | <b>29</b> |
| 4.1 Funktionsprinzip der akustooptischen Strahlformung .....                         | 29        |
| 4.2 Allgemeine Spezifikationen .....   | 31        |
| 4.2.1 Umschaltrate.....  | 31        |
| 4.2.2 Leistungsgrenzen.....  | 32        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.3     | Zeitliche Dispersion – Auswahl der passenden Pulsdauer .....                             | 35        |
| 4.2.4     | Räumliche Dispersion und Beugung am Gitter – Auswirkung auf den Bearbeitungsfokus .....  | 37        |
| 4.3       | Labora Aufbau zur Untersuchung der AOS .....   | 39        |
| <b>5</b>  | <b>Berechnung akustischer Signale für die Strahlformung.....</b>                         | <b>43</b> |
| 5.1       | Berechnung des Signals aus der Phasenverteilung .....                                    | 43        |
| 5.2       | Strahlformung zur Aberrationskorrektur .....   | 45        |
| 5.3       | Strahlformung zur flächigen Intensitätsverteilung .....                                  | 47        |
| 5.3.1     | Überlagerung harmonischer Wellen (CBA).....  | 47        |
| 5.3.2     | Berechnung der räumlichen Phasenverteilung (IFTA) ...                                    | 49        |
| 5.4       | Simulation der Intensitätsprofile und des Abtrags .....                                  | 53        |
| 5.5       | Synchronisierung des Systems und Strahlformung mit cw-Lasern.....                        | 55        |
| <b>6</b>  | <b>Effizienz der akustooptischen Strahlformung .....</b>                                 | <b>59</b> |
| 6.1       | Bestimmung der winkelabhängigen Beugungseffizienz .....                                  | 59        |
| 6.2       | Einfluss der winkelabhängigen Beugungseffizienz bei der Aberrationskorrektur.....        | 62        |
| 6.3       | Gesamteffizienz der akustooptischen Strahlformung im Vergleich mit LCoS-Technologie..... | 64        |
| <b>7</b>  | <b>Qualität der erzeugbaren Strahlprofile und Strukturen .....</b>                       | <b>67</b> |
| 7.1       | Darstellung und Diskussion der Strahlqualität .....                                      | 67        |
| 7.2       | Materialbearbeitung mit akustooptischer Strahlformung.....                               | 73        |
| 7.2.1     | Volumenmodifikation transparenter Materialien.....                                       | 74        |
| 7.2.2     | Oberflächenbearbeitung nicht transparenter Materialien .....                             | 77        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>  | <b>85</b> |
| <b>9</b>  | <b>Summary and future work.....</b>  | <b>87</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang.....</b>   | <b>89</b> |
| a         | Auflistung aller Systeme für die Marktanalyse .....                                      | 89        |
| b         | Linearität des verwendeten Digitalmikroskops.....  | 91        |
| c         | Bestimmung der nichtlinearen Zerstörschwelle von TeO <sub>2</sub> .....                  | 92        |
| d         | Beweis für die Gültigkeit der Projektion .....   | 93        |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| e | Mit AOS einstellbare Zernike-Polynome und resultierende Restterme .....                   | 95         |
| f | Brechkraft eines AOS.....   | 96         |
| g | Simulation und Experiment einer Reihenfolge an Phasenverteilungen .....                   | 97         |
| h | Quantitative Beschreibung der Homogenität der Strahlprofile und Messmittelfähigkeit ..... | 98         |
| i | Simultane Messung der Beugungseffizienz .....   | 100        |
|   | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>103</b> |



## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

| <b>Symbol</b>          | <b>Einheit</b>          | <b>Beschreibung</b>   |
|------------------------|-------------------------|---|
| $A, A_x, A_y$          | V                       | Amplitude   |
| $B$                    | dpt                     | Brechkraft  |
| $Ba$                   | °                       | Basiswinkel eines Prismas   |
| $C$                    | Spots/s                 | Datenübertragungsrate   |
| $c_0$                  | m/s                     | Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  |
| $d$                    | mm                      | Aperturdurchmesser  |
| $dn/d\lambda$          | $\mu\text{m}^{-1}$      | Dispersion  |
| $D$                    | grad                    | Winkel zwischen ein- und ausfallendem Strahl beim Prisma  |
| $Dz$                   | s                       | Systemspezifische Reaktionszeit   |
| $E_p$                  | J                       | Pulsenergie   |
| $f$                    | Hz                      | Frequenz einer Schallwelle  |
| $f_m$                  | Hz                      | Mittelfrequenz  |
| $f_{rep}$              | Hz                      | Repetitionsrate   |
| $F_{th}$               | $\text{J}/\text{m}^2$   | Kritische Fluenz für Mikromaterialabtrag  |
| $f_U$                  | Hz                      | Umschaltrate  |
| $f_x, f_y$             | Hz                      | Frequenz einer Schallwelle  |
| $f_i, f_i(x), f_i(y)$  | Hz                      | Ortsabhängige Frequenz einer Schallwelle  |
| $f_{i,t}$              | Hz                      | Zeitabhängige Frequenz einer Schallwelle  |
| $F(x_i, y_j)$          | $\text{J}/\text{m}^2$   | Fluenz am Ort $x_i, y_j$  |
| $G$                    |                         | Grad der Parallelisierung   |
| $GGD$                  | $\text{fs}^2/\text{cm}$ | Gruppengeschwindigkeitsdispersion   |
| $g(t)$                 | V                       | Akustisches Signal im Zeitbereich   |
| $g$                    | m                       | Gitterkonstante   |
| $I_1, I'_1, I_2, I'_2$ | rad                     | Ein- und Ausfallwinkel zwischen Propagationsrichtung eines Laserstrahls und der Oberflächennormalen eines Prismas |
| $I_{Gauss}$            | $\text{W}/\text{m}^2$   | 2D gaußförmige Intensitätsverteilung  |

|                        |                  |  |
|------------------------|------------------|--|
| $I_m$                  | W/m <sup>2</sup> | Mittelwert der Intensität  |
| $I_{max}$              | W/m <sup>2</sup> | Maximale Intensität  |
| $I_{out}$              | W/m <sup>2</sup> | Simulierte Intensitätsverteilung   |
| $I_{xy}$               | W/m <sup>2</sup> | Zweidimensionale Intensitätsverteilung   |
| $k$                    | 1/m              | Wellenzahl   |
| $l$                    | m                | Interaktionslänge  |
| $n$                    |                  | Brechungsindex   |
| $n(\omega)$            |                  | Frequenzabhängiger Brechungsindex  |
| $N$                    |                  | Anzahl einer diskreten Menge   |
| $n_a$                  |                  | Brechungsindex für die ausfallende elektromagnetische Welle  |
| $n_e$                  |                  | Brechungsindex für die einfallende elektromagnetische Welle  |
| $N_e$                  |                  | Anzahl an Laserpulsen die im selben Zeitraum erzeugt wurden  |
| $N_g$                  |                  | Anzahl an genutzten Laserpulsen  |
| $N_H$                  |                  | Anzahl an Phasenverteilungen   |
| $P_{ab}(t), P_{zu}(t)$ | W                | Zeitabhängig Leistung  |
| $P_{cw,max}$           | W                | Maximale Leistung für Laser im Dauerstrichbetrieb  |
| $P_{p,max}$            | W                | Maximale mittlere Leistung für Laser im Pulsbetrieb  |
| $Q$                    |                  | Klein-Cook Parameter   |
| $R^2$                  |                  | Bestimmtheitsmaß   |
| $S_A$                  | µm               | Flächenrauheit nach DIN EN ISO 25178   |
| $S, eS, sS$            |                  | Strahlgleichförmigkeit nach DIN EN ISO 13694<br>Präfix: e, s markieren Ursprung der Werte aus Experimenten oder Simulation |
| $Sz$                   | s                | Verzögerungszeit für Laserpuls und Schallwelle   |
| $t_{B,AOS}, t_{B,LS}$  | s                | Bearbeitungsdauer  |
| $t$                    | s                | Laufvariable für die Zeit  |
| $t_f$                  | s                | Füllzeit   |

|                                     |                  |   |
|-------------------------------------|------------------|---|
| $t(x, y)$                           | $\mu\text{m}$    | Lokale Tiefe des Mikromaterialabtrags                     |
| $v$                                 | $\text{m/s}$     | Schallgeschwindigkeit                                     |
| $v_p$                               | $\text{m/s}$     | Phasengeschwindigkeit                                     |
| $v_G$                               | $\text{m/s}$     | Gruppengeschwindigkeit                                    |
| $V$                                 | %                | Verschmierung durch Propagation der Schallwelle           |
| $w$                                 | $\text{m}$       | $1/e^2$ Strahldurchmesser                                 |
| $Z_R^S$                             |                  | Koeffizient des Zernike-Polynoms der Reihe R und Spalte S |
| $\alpha$                            | rad              | Ablenkwinkel  |
| $\alpha_{max}$                      | rad              | Maximale Ablenkwinkel                                     |
| $\dot{\alpha}_{max}$                | $\text{rad/s}^2$ | Maximale Ablenkwinkelgeschwindigkeit                      |
| $\eta$                              | %                | Beugungseffizienz   |
| $\eta_B, \eta_{B,AOS}, \eta_{B,LS}$ | %                | mittlere Beugungseffizienz                                |
| $\eta_G, \eta_{G,AOS}, \eta_{G,LS}$ | %                | Gesamteffizienz   |
| $\eta_{max}$                        | %                | Beugungseffizienz beim Bragg-Winkeln                      |
| $\sigma_{AOD}$                      | $\text{m}^{-1}$  | Dispersion durch Schallfeld im AOD                        |
| $\sigma_I$                          | $\text{W/m}^2$   | Standardabweichung der Intensität                         |
| $\sigma_P$                          | $\text{m}^{-1}$  | Dispersion durch ein Prisma                               |
| $\varrho$                           |                  | Integrationsvariable                                      |
| $\tau_P, \tau_{in}, \tau_{out}$     | s                | Pulsdauer   |
| $\vartheta_B$                       | rad              | Bragg-Winkel  |
| $x, y$                              | mm               | Koordinaten   |
| $\alpha$                            | rad              | Ablenkwinkel  |
| $\kappa$                            | nm               | Energieeindringtiefe                                      |
| $\lambda$                           | nm               | Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle               |
| $\varphi$                           | rad              | Phase einer periodischen Schwingung                       |

|                          |     |  |
|--------------------------|-----|--|
| $\varphi(x), \varphi(y)$ | rad | Phasenverteilung entlang der x- oder y-Achse |
| $\omega$                 | Hz  | Bandbreite                                   |
| $\omega_f$               | Hz  | Kreisfrequenz des Lichts                     |

**Abkürzung**      **Beschreibung**

|                    |   |
|--------------------|---|
| AOD                | Akustooptischer Deflektor   |
| AOS                | Akustooptischer Strahlformer / Akustooptische Strahlformung                   |
| CBA                | Frequenzüberlagerungsalgorithmus (engl.: composite beam approach)             |
| cw                 | Kontinuierliches Laserlicht (engl.: continuous wave)                          |
| DLP                | Digitaler Lichtprozessor (engl.: Digital Light Processing)                    |
| EOD                | Elektrooptischer Deflektor  |
| IFTA               | Iterativer-Fourier-Transformations-Algorithmus                                |
| KTN                | Kalium Tantalat Niobat ( $K(\text{Ta},\text{Nb})\text{O}_3$ )                 |
| LCoS-SLM           | SLM auf Basis von Flüssigkristalldisplays (engl.: Liquid Crystal on Silicon)  |
| LSM                | 3D-Laser-Scanning-Mikroskop   |
| MEMS-SLM           | SLM auf Basis von Mikro-Elektro-Mechanischen-Systemen                         |
| MOEMS              | Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches-System  |
| N-SF <sub>11</sub> | Material für Dispersionsprismen   |
| NTT-AT             | Technologieunternehmen aus Japan  |
| RRS                | Rate auflösbarer Spots (engl.: Rate of Resolvable Spots)                      |
| SC                 | Strahlgleichförmigkeit (engl.: speckle contrast)                              |
| SiO <sub>2</sub>   | Siliziumdioxid oder auch Quarzglas  |
| SLM                | Räumlicher Lichtmodulator (engl.: Spatial Light Modulator)                    |
| TAG                | Steuerbare Gradientenoptik (engl.: Tunable Gradient Index of Refraction Lens) |
| TeO <sub>2</sub>   | Tellurdioxid  |
| UKP                | Ultrakurzpuls   |

## Bildverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 1. Bild 1: Prinzip von a) Galvanometer-Scanner (Zeichnung in Anlehnung an [18]) und b) Piezoscanner .....  | 6  |
| 2. Bild 2: Prinzip von a) Polygonscanner und b) MOEMS-Scanner .....  | 7  |
| 3. Bild 3: Prinzip von elektrooptischen Deflektoren mit a) Brechungsindexvariation am Prisma und b) Raumladungsverteilung im KTN-Kristall; Zeichnung in Anlehnung an [24] .....  | 7  |
| 4. Bild 4: Prinzip von a) adaptivem Spiegel (Zeichnung in Anlehnung an [28]) und b) MEMS-SLM .....   | 8  |
| 5. Bild 5: Prinzip von a) LCoS-SLM und b) DLP .....  | 9  |
| 6. Bild 6: Unterschiedliche Arten der akustooptischen Interaktion nach [41] .....  | 12 |
| 7. Bild 7: Typische frequenzabhängige Verteilung der Beugungseffizienz nach [45] .....   | 13 |
| 8. Bild 8: Bragg-Winkel in Abhängigkeit der Frequenz der Schallwelle nach [41] .....   | 14 |
| 9. Bild 9: Prinzip des a) akustooptischen Deflektors mit harmonischer Schallwelle und b) des akustooptischen Strahlformers mit schnell variierender Frequenz der Schallwelle .....   | 15 |
| 10. Bild 10: Der akustooptische Frequenzanalysator nach [47] .....   | 16 |
| 11. Bild 11: Im oberen Teil des Bildes ist eine Aufnahme des homogenen Linienprofils dargestellt. Im unteren Teil die Intensitätsverteilung eines zentralen Schnittes entlang des Linienprofils. Dieses Linienprofil ist aus den gestrichelt dargestellten Einzelprofilen zusammengesetzt [39]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren ..... | 17 |
| 12. Bild 12: a) Funktionsprinzip der TAG [50], b) Lichtmikroskopische Aufnahme mit erweiterter Tiefenschärfe [54] und c) Lasermaterialbearbeitung mit TAG [49]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren .....   | 18 |
| 13. Bild 13: a) Akustooptische Linse (AOL) aus 6 AODs für die Strahlformung im Mikroskop [57] und b) experimentelle Untersuchung zur Kompensation von Aberrationen mit einem System mit nur  |    |

|  |    |
|--|----|
| zwei AODs [58]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren .....   | 19 |
| 14. Bild 14: Datenübertragungsrate der bekannten Strahlführungs- und Strahlformungssysteme für die Lasermaterialbearbeitung; die Daten sind aus den Spezifikationen der im Anhang a gelisteten Systeme entnommen .....                         | 23 |
| 15. Bild 15: a) Akustooptische Strahlformung eines Barcodes durch subsequente Strahlformung mit zwei unabhängigen, orthogonalen Achsen, b) Realverteilung und c) Abfolge von 7 Profilen zur Formung der Buchstaben „LPT“ .....                 | 30 |
| 16. Bild 16: Umschaltrate von AOS .....  | 32 |
| 17. Bild 17: Maximale Laserleistung für AODs abhängig vom Aperturdurchmesser .....   | 34 |
| 18. Bild 18: Pulsdauererlängerung bei der Transmission durch einen 3 cm langen AOD-Kristall aus $\text{TeO}_2$ .....   | 36 |
| 19. Bild 19: a) Dynamische Kompensation der Dispersion beim AOD nach [72], b) starre Korrektur in einer Ebene nach [73], c) Winkel $I$ nach [74] und d) zweidimensional abgelenkter Laserstrahl ohne und mit Kompensation der Dispersion ..... | 38 |
| 20. Bild 20: a) Prinzipieller und b) tatsächlicher Aufbau des Experimentalsystems eines akustooptischen Strahlformers .....  | 39 |
| 21. Bild 21: Zusammenhang von optischer Phasenverteilung und akustischer Frequenz .....  | 44 |
| 22. Bild 22: Messung der Phasenverteilung mit a) einer verschobenen und b) einer ideal eingestellten Synchronisation .....   | 46 |
| 23. Bild 23: Schematische Darstellung des CBA und Auftreten von Schwebungen bei der Frequenzaddition .....   | 49 |
| 24. Bild 24: Blockschaltbild des Iterativen-Fourier-Transformations-Algorithmus zur Berechnung der akustischen Signale .....   | 50 |
| 25. Bild 25: a) 6 $\mu\text{s}$ langer Ausschnitt eines akustischen Signals aus IFTA und CBA (Periodenlänge: 2,5 $\mu\text{s}$ ) und b) spektrale Leistung beider Signale mit einer Abtastung von $\Delta f = 82,5 \text{ kHz}$ .....          | 52 |
| 26. Bild 26: Blockschaltbild für die Simulation der Intensitätsverteilung und des Abtrags .....  | 54 |

|   |    |
|---|----|
| 27. Bild 27: a) Zeitliche Beziehungen der Systemzeiten im AOS und b) Bestimmung der Verzögerungszeit .....  | 56 |
| 28. Bild 28: a) Überlagerung der Zielverteilungen bei der cw-Strahlformung und b) Formung der Buchstaben „LPT“ mit einem Laserpointer aus 7 akustischen Signalen ohne und c) mit Pausen .....   | 57 |
| 29. Bild 29: Beugungseffizienz aus a) punktwieser Messung von 100 x 100 Messpunkten mit Powermeter (3 Stunden) und b) 80 x 80 Messpunkten simultan mit Kamera erfasst (128 ms) und c) strahlgeformt (3 ms) .....  | 61 |
| 30. Bild 30: In Abhängigkeit der eingesetzten Bandbreite und der dazugehörigen winkelabhängigen Beugungseffizienz (rechts dargestellt aus Bild 29) ändert sich die Leistung und damit die Effizienz bei der Korrektur von Aberrationen am Beispiel des Defokus..... | 63 |
| 31. Bild 31: Gesamteffizienz von AOS im Vergleich zu einem idealen LCoS-SLM in Abhängigkeit der notwendigen Umschaltvorgänge.....   | 65 |
| 32. Bild 32: Bearbeitungsdauer mit AOS im Vergleich zu einem idealen LCoS-SLM in Abhängigkeit der notwendigen Umschaltvorgänge.....   | 66 |
| 33. Bild 33: Strahlgleichförmigkeit und Intensitätsverteilungen von einzelnen alternativen Phasenverteilungen mit CBA und IFTA .....  | 68 |
| 34. Bild 34: Homogenisierung durch einen nicht synchronisierten Betrieb der AOS.....  | 69 |
| 35. Bild 35: Überlagerte Intensitätsverteilung aus CBA und aus IFTA und Qualität des Strahlprofils in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen .....  | 70 |
| 36. Bild 36: Einfluss der Dispersion auf die Homogenität in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen N .....  | 72 |
| 37. Bild 37: Korrektur einer sphärisch aberrierten Wellenfront und Einbringung zusätzlicher Fehler erhöhen die maximale Intensität....  | 75 |
| 38. Bild 38: Versuche zu Lentikelschnitten mit einem ultravioletten Femtosekundenlaser und einem adaptiven Spiegel.....   | 76 |
| 39. Bild 39: a) akustooptisch verteilte Intensität b) vergrößerter Ausschnitt und c) Laserstrahlmarkierung eines QR-Codes mit AOS und gepulster Laserstrahlung.....   | 78 |

|   |     |
|---|-----|
| 40. Bild 40: Gleichförmigkeit der Tiefe der Struktur in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen.....   | 79  |
| 41. Bild 41: Einfluss der Dispersion auf die minimale Anzahl an alternativen Phasenverteilungen zum Erreichen einer homogenen Intensitätsverteilung oder Struktur .....   | 80  |
| 42. Bild 42: Napfstruktur mittels a) AOS und b) Galvanometerscanner erzeugt bei sonst unverändertem optischen System.....   | 81  |
| 43. Bild 43: Einfluss der Applikationsreihenfolge alternativer Phasenverteilungen [ABCD] auf die Abtragseffizienz und nicht vorhandener Einfluss auf die Rauheit $S_a$ .....  | 82  |
| 44. Bild 44: Antwortverhalten der verwendeten Kamera.....   | 91  |
| 45. Bild 45: Bestimmung der nichtlinearen Zerstörschwelle von $TeO_2$ ....  | 92  |
| 46. Bild 46: Simulation und Experiment einer einzigen Reihenfolge an Phasenverteilungen.....  | 97  |
| 47. Bild 47: a) Auswertebereich im Querschnitt eines Profils dargestellt zeigt den Ausschluss der Kanten b) Auswertebereich für die Erhebung der Daten für die Homogenität aus dem Strahlprofil und c) der topografischen Vermessung.....   | 99  |
| 48. Bild 48: Bestimmung der winkelabhängigen Beugungseffizienz mit Strahlformung. Die Zielverteilung a) und die Vergrößerung daraus d) hat eine homogene Verteilung. Hier hat jeder Pixel den Helligkeitswert 255. Durch die iterative Optimierung der Signaleberechnung kommt es zu der erwarteten Verteilung b)+e) mit einer in g) dargestellten relativen Leistungsverteilung. Das technische System führt zu der gemessenen Verteilung c)+f) mit der im Experiment ermittelten Effizienzverteilung h). Für die Messungen ist sichergestellt worden, dass die Kamera nicht in Sättigung aufgezeichnet. Kontrast und Helligkeit sind für die Darstellung hier optimiert worden..... | 101 |

# 1 Einleitung

*„Die Laserstrahlquellenhersteller haben ihre Hausaufgaben gemacht, nun liegt es an uns Systemintegratoren die zur Verfügung stehende Leistung sinnvoll auf die Straße zu bringen.“*

So endete 2015 der Vortrag von Dr. Thomas Kiedrowski auf dem 18. Fachseminar für Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik in Fürth. Diese Worte treffen den aktuellen Stand in der Lasermaterialbearbeitung mit ultrakurzgepulsten (UKP) Laserstrahlquellen genau. Aktuelle Entwicklungen zeigen UKP-Laserstrahlquellen mit über 1 kW mittlerer Leistung. Durch die eingesetzten Systemtechniken zur Laserstrahlableitung kann aber effektiv nur ein Bruchteil der verfügbaren Leistung genutzt werden, da Wärmeakkumulation sonst keine kalte Lasermaterialbearbeitung mit UKP ermöglicht und damit die Präzision der UKP-Lasermaterialbearbeitung sinkt. Zur Überwindung dieser geringen Nutzung müssen neuartige Technologien eingesetzt werden, die eine schnellere Verteilung oder eine Aufteilung der Laserleistung ermöglichen. Mit solchen Systemen kann dann die Akkumulation der Wärme vermieden werden und daraus ein höherer Nutzungsgrad der Laserstrahlquellen erfolgen. Dieses Ziel wird in dieser Arbeit mit der Technologie der Akustooptik verfolgt. Die hier vorgestellte akustooptische Strahlformung wird für den Einsatz mit UKP-Laserstrahlquellen hoher mittlerer Leistung beschrieben, charakterisiert und bewertet.

Dafür werden zuerst die prozesslimitierenden Faktoren aufgezeigt und die zum Einsatzkommenden Technologien für die Laserstrahlführung und -formung dargestellt. Da der Kern dieser Arbeit die Akustooptik ist, wird diese Technologie umfänglicher beschrieben. Basierend auf einer einheitlichen Größe werden bekannte Systeme für die Verteilung der Laserstrahlung auf einer Werkzeugoberfläche bewertet und verglichen. Daraus motiviert, werden im Kapitel 3 die Ziele und die der Arbeit zu Grunde liegenden Hypothesen formuliert, die dann in den folgenden Kapiteln behandelt werden. Es wird gezeigt, wie mit kommerziell erhältlichen Systemen eine akustooptische Strahlformung erreicht werden kann. Eine abschließende Demonstration der akustooptischen Strahlformung zeigt deren Einsatzfähigkeit in der Lasermaterialbearbeitung auf.



## 2 Stand der Technik und Forschung

Bevor jedoch der akustooptische Strahlformer beschrieben, charakterisiert und mögliche Einsätze dargestellt werden, werden die Einschränkungen bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen dargestellt. Die bei dieser Materialbearbeitung zum Einsatz kommenden Systeme zur Verteilung von Laserlicht auf einer Werkstückoberfläche werden aufgelistet und mit einer einheitlichen Größe bewertet und verglichen. Zum Verständnis dieser Arbeit werden in diesem Kapitel auch die Grundlagen der Akustooptik beschrieben.

### 2.1 Limitationen bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Der Laser, insbesondere die Klasse der Ultrakurzpulslaser, eignet sich besonders für die Erzeugung funktionaler Oberflächen [1]. Für den wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz der Ultrakurzpulslaser stehen nach dem Stand der Technik Strahlquellen mit ausreichender Leistung zur Verfügung [2]. Die Bereitstellung dieser Leistung an den Bearbeitungsstationen konnte zuletzt durch Hohlkernfasern, die seit kurzem vorhanden sind, deutlich vereinfacht werden [3]. Diese nun an der Bearbeitungsstation zur Verfügung stehende Leistung muss zum Erzeugen einer gewünschten Struktur auf einer Werkstückoberfläche verteilt werden. Da bisher nur auf bekannte Technologien aus anderen Bereichen der Lasertechnik zurückgegriffen wird, zeigen sich bei der Mikrostrukturierung von Metallen Einschränkungen. So ist die Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Struktur, welche weitgehend frei von Schmelzebildung und -aufwürfen ist, auf eine maximale Abtragsrate von etwa  $3 \text{ mm}^3/\text{min}$  limitiert [4]. Die Begrenzung der Abtragsrate auf diesen Wert resultiert aus einer Überlagerung verschiedener Effekte:

Wird die Pulsenergie und damit die Intensität auf der Werkstückoberfläche zu hoch gewählt, erzeugt jeder einzelne Laserpuls aufgrund überschüssiger Energie einen Schmelzefilm, sodass auch bei geringer Repetitionsrate mit zunehmender Pulsanzahl unerwünschte Schmelzerückstände in der eingebrachten Struktur verbleiben [5]. Bei der Erzeugung einer gegebenen Strukturgröße resultiert daraus eine Beschränkung der sinnvoll anwendbaren Pulsenergie. Diese liegt bei typischen Mikrostrukturierungsapplikationen im Bereich von etwa  $1 \text{ }\mu\text{J}$  bis  $100 \text{ }\mu\text{J}$ .

Zusätzlich akkumuliert Wärme beim Pulsüberlapp aufgrund der begrenzten Wärmeleitfähigkeit von Metallen ab etwa 400 kHz Repetitionsrate [6], d.h. die mittels eines Laserpulses eingebrachte Wärmeenergie wird während der Puls-zu-Puls-Pause nicht vollständig in das umliegende Material abgeführt. Es resultieren unerwünschte Schmelzeaufwürfe und eine vergrößerte Wärmeeinflusszone. Zusätzlich findet ab einer Repetitionsrate von wenigen 100 kHz Partikelabschirmung statt [7], d.h. der einfallende Laserpuls wird am teilweise kondensierten Materialdampf, welcher durch den vorangegangenen Puls erzeugt wurde, absorbiert und gestreut. Insgesamt nehmen die Qualität der erzeugten Struktur und die Effizienz des Prozesses ab. [8]

Um beide Effekte zu vermeiden, wird der Pulsüberlapp so gewählt, dass der laterale Abstand der durch Einzelpulse erzeugten Strukturen auf dem Werkstück in etwa 60% bis 100% des Strahldurchmessers entspricht [9]. D.h. aus der maximalen Ablenkgeschwindigkeit, welche durch die verwendete Strahlführung vorgegeben ist, resultiert die maximal anwendbare Repetitionsrate. Ist die Repetitionsrate höher, nimmt die Qualität der Strukturen aufgrund der erläuterten Effekte ab. Die Kombination aus Begrenzung der maximal einsetzbaren Repetitionsrate und Pulsenergie beschränkt die sinnvoll umsetzbare mittlere Leistung von Ultrakurzpulslaserquellen in der Mikrostrukturierung von Metallen. Bei Verwendung von Galvanometerscannern beträgt diese etwa 50 W, woraus hauptsächlich auch die aktuelle Beschränkung der maximal erreichbaren Abtragsrate resultiert. In gleicher Weise bestehen die beschriebenen Einschränkungen auch bei weiteren Werkstoffen, wie etwa Silizium [10] und Polymeren [11].

Statt die sinnvoll einsetzbare Repetitionsrate weiter über schnellere Strahlführung zu erhöhen, kann ebenfalls der Ansatz verfolgt werden, die sinnvoll einsetzbare Pulsenergie zu erhöhen [A6]. Dabei wird über geeignete Strahlformung die verfügbare Pulsenergie über einen definierten und i.d.R. größeren Interaktionsbereich so verteilt, dass die Intensität knapp oberhalb der Ablationsschwelle liegt. Die geometrische Form des Laserpulses entspricht dabei der zu erzeugenden Struktur. Zur Formung des Strahlprofils kommen refraktive [12], diffraktive [13] und interferometrische [14] Systeme zum Einsatz, seltener nichtlineare Absorber [15]. Entsprechend ausgestattete Lasermaschinen wurden erfolgreich bei Schichtablationen [16] bzw. oberflächennahen Strukturierungen getestet [17].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zur Erhöhung der Abtragsrate in der Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen die einsetzbare

mittlere Leistung durch schnelle Strahlablenkung oder durch Strahlformung erhöht werden kann. Um dabei weiterhin einen annähernd schmelzefreien Abtrag zu gewährleisten, werden neuartige systemtechnische Ansätze benötigt. So setzt die Erhöhung der Repetitionsrate eine schnelle Strahlführung voraus. Die Erhöhung der Pulsenergie kann über eine Strahlformung effektiv umgesetzt werden. Eine Kombination beider Strategien würde die momentane Abhängigkeit der Abtragsrate von der Strahlführung und -formung längerfristig kompensieren und einen effektiven Materialabtrag mit Ultrakurzpulslaserquellen hoher mittlerer Leistung ermöglichen.

## **2.2 Strahlführungs- und -formungssysteme**

Die Systeme für die Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern sind im Folgenden dargestellt und kurz beschrieben.

### **2.2.1 Galvanometerscanner**

Beim Galvanometerscanner handelt es sich um das Standardsystem für die Lasermaterialbearbeitung. Es besteht aus zwei Spiegeln, welche mit Motoren, die nach dem galvanometrischen Prinzip arbeiten, um je eine Achse in der Spiegelebene rotiert werden. Die Rotationsachsen beider Spiegel sind dabei senkrecht zueinander, sodass ein Spiegel für die Ablenkung des Laserstrahls in eine Richtung, der zweite für die Ablenkung senkrecht dazu, genutzt werden kann. In Bild 1a ist eine Skizze und die prinzipielle Funktionsweise eines Galvanometerscanners zu finden. Diese Systeme sind ausgereift und in den meisten Anlagen zur Lasermaterialbearbeitung als Ablenkensysteme zu finden.

### **2.2.2 Piezoscanner**

Über piezoelektrische Aktoren wird ein Spiegel in einer oder zwei Achsrichtungen ausgelenkt und damit ein Ablenken eines Laserstrahls erreicht, vgl. Bild 1b. Die Ablenkgeschwindigkeit eines solchen Systems ist rein von dem piezoelektrischen Aktor und der Masse des zu bewegenden Spiegels abhängig. Es wird dabei in zwei Betriebsmodi unterschieden: Den statischen Betrieb, bei dem eine beliebige Auslenkung über einen Regelkreis des piezoelektrischen Aktors und einen Wegaufnehmer eingestellt wird und der resonante Betriebsmodus, mit dem eine periodische vom Design des Piezoscanners abhängige Bewegung erreicht wird. Mit dem zweitgenannten Betriebsmodus werden hohe Ablenkgeschwindigkei-

ten erreicht, allerdings entsteht der Nachteil, dass eine periodische Auslenkung erfolgt, die von der Eigenresonanz des Systems bestimmt ist.

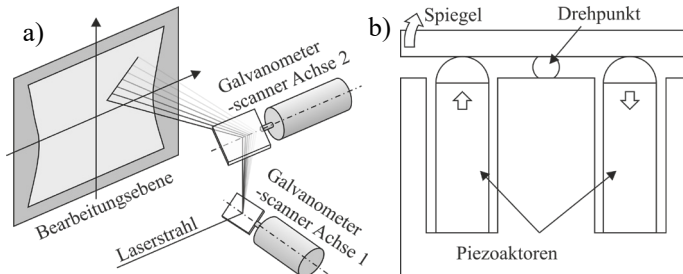


Bild 1: Prinzip von a) Galvanometer-Scanner (Zeichnung in Anlehnung an [18]) und b) Piezoscanner

### 2.2.3 Polygonscanner

Ein Polygonscanner ist ein meist eindimensionales Ablenssystem, bei dem ein reguläres Polygon mit einem Motor um den Mittelpunkt rotiert wird. An den tangentialen Flächen des Polygons befinden sich die Spiegel, mit denen ein Laserstrahl durch die Drehung des Polygons abgelenkt wird, siehe Bild 2a. Solche Systeme arbeiten bei konstanten und hohen Drehzahlen von mehreren zehn kHz und erreichen dadurch hohe Ablenkgeschwindigkeiten. Es wird immer eine vollständige Belichtung des Arbeitsfeldes durchgeführt, bevor der folgende Spiegel eine zweite Belichtung desselben Punktes erlaubt. Hier kann es bei Strukturen mit geringer Flächendeckung schnell zur ineffizienten Bearbeitung kommen, da für eine gewisse Zeit die erzeugte Laserleistung nicht genutzt werden kann. [19]

### 2.2.4 MOEMS-Scanner

MOEMS-Scanner oder Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches-System-Scanner sind Systeme geringer Baugröße, die eine hohe Dynamik durch einen geringen Anteil der bewegten Masse erreichen. Die Systeme stellen eine Ein-Chip-Lösung dar, wobei der Scannerspiegel kardanisches gelagert ist und sich in zwei Achsen, die senkrecht zueinander sind, kippen lässt. Bild 2b zeigt den schematischen Aufbau eines MOEMS-Scanners. Bei der statischen Ablenkung eines Laserstrahls, ähnlich wie bei einem Galvanometerscanner, bieten diese Systeme kaum Vorteile, erst im resonanten Betriebsmodus kann eine hohe Ablenkgeschwindigkeit erreicht werden, allerdings mit den Nachteilen einer resonanten Ablenkung. Ein Einsatz

dieser Systeme in der Mikromaterialbearbeitung ist nur auf Forschungsebene zu finden, da diese Systeme, bedingt durch ihren kompakten Aufbau, niedrige Laserzerstörungsschwellen besitzen. [20]

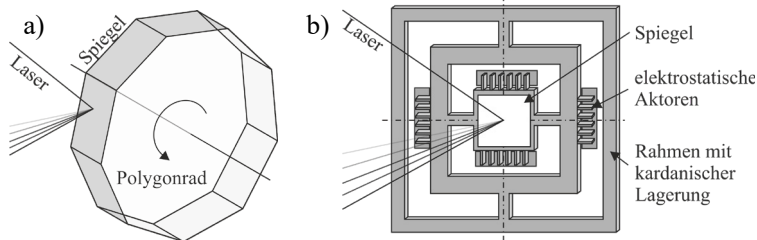


Bild 2: Prinzip von a) Polygonscanner und b) MOEMS-Scanner

### 2.2.5 Elektrooptische Deflektoren

Bei elektrooptischen Deflektoren (EOD) wird die Eigenschaft von Materialien ausgenutzt, die bei der Anlegung eines elektrischen Feldes zur Änderung dessen Brechungsindex führt. Eine Ablenkung kann dann verwirklicht werden, wenn das optische System nicht planparallel ist, sondern z.B. eine prismatische Form aufweist, siehe Bild 3a [21]. Wird der Brechungsindex des Prismas variiert, stellen sich unterschiedliche Ablenkwinkel ein. Eine etwas andere Methode verfolgt NTT-AT mit den KTN Kristallen: Hier wird ein Laserstrahl auch mit Hilfe des elektrooptischen Effekts abgelenkt, nur ist deren Kristall planparallel. Durch die Ausprägung einer Raumladungsverteilung, die einer eindimensionalen Brechungsindexvariation quer zur Propagationsrichtung des Laserstrahls entspricht, wird eine Ablenkung erreicht, siehe Bild 3b [22]. Mittels elektrooptischer Deflektion sind große Ablenkwinkel realisierbar [23] und da die Änderung des Brechungsindex instantan erfolgt, ist die Rate mit der ein Laserstrahl mit einem solchen System abgelenkt werden kann nur von der verwendeten Elektronik und deren Grenzen abhängig. Der Einsatz von EODs in der Lasermaterialbearbeitung ist limitiert, da nichtlineare Effekte bereits bei einer niedrigen Fluenz zu beobachten sind. [22]

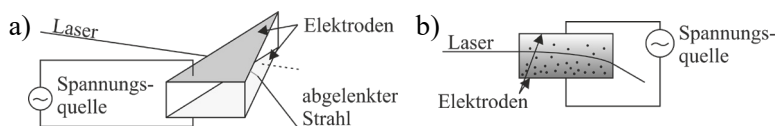


Bild 3: Prinzip von elektrooptischen Deflektoren mit a) Brechungsindexvariation am Prisma und b) Raumladungsverteilung im KTN-Kristall; Zeichnung in Anlehnung an [24]

### 2.2.6 Adaptiver Spiegel

Adaptive Spiegel, wie in Bild 4a gezeigt, sind Systeme, die für die Korrektur aberrierter Laserstrahlen und damit zur Reduzierung der Größe des Bearbeitungsfokus eingesetzt werden. Sie sind vor allem durch die typischerweise niedrige Anzahl an Aktoren noch ungeeignet, um die Energie eines Laserstrahls flächig in der Bearbeitungsebene aufzuteilen. Zudem basieren bekannte Systeme adaptiver Spiegel auf der Bewegung von Masse, was diese Systeme träge macht. Aus diesen Gründen werden adaptive Spiegel im Weiteren nicht betrachtet. [25]

### 2.2.7 MEMS-SLM

MEMS-SLM sind Strahlformer (SLM, engl.: spatial light modulator), die auf MEMS-Technologie (Mikro-Elektro-Mechanisches-System) basieren. Diese können mit mehreren Millionen aktiven Spiegelementen die räumliche Phasenverteilung eines Laserstrahls beeinflussen, indem sie die Höhe der einzelnen Spiegel relativ zueinander ändern [26] oder in zwei Achsrichtungen kippen [27], siehe Bild 4b. Ein Laserstrahl wird vor der Bearbeitungsoptik daran gebeugt, um eine Umverteilung der Intensität in der Bearbeitungsebene zu erreichen. Eine analoge Ansteuerung erlaubt dabei jede Position im Verfahrbereich zu halten. Gleichzeitig wird durch die geringe Masse der einzelnen Spiegelemente eine hohe Umschaltrate erreicht.

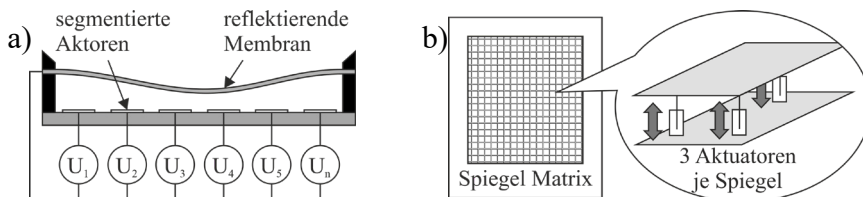


Bild 4: Prinzip von a) adaptivem Spiegel (Zeichnung in Anlehnung an [28]) und b) MEMS-SLM

### 2.2.8 LCoS-SLM

Die wohl bekanntesten Systeme für die räumliche Verteilung der Energie eines Laserstrahls sind SLMs basierend auf Flüssigkristalldisplaytechnologie (LCoS, engl.: Liquid Crystal on Silicon). LCoS-SLMs gleichen prinzipiell dem Aufbau von Displays aus der Consumer-Elektronik. Hier wird durch die Drehung der Polarisation zwischen zwei orthogonalen Polarisations-

toren eine Modulation der Amplitude eingestellt wodurch hohe optische Verluste auftreten. Systeme für die Strahlformung zeigen anstelle einer verdrillten eine Parallelorientierung der Flüssigkristalle, woraus eine reine Phasenmanipulation einer elektromagnetischen Welle resultiert, vgl. Bild 5a [25]. Neben der elektronischen Ansteuerung besteht auch die Möglichkeit einer optischen Adressierung der Pixel [29]. Diese oft auch als holografische Strahlformer bezeichneten Displays ermöglichen eine annähernd beliebige Verteilung der Energie des Laserstrahls in der Bearbeitungsebene [30]. Hierbei entstehen Beugungsverluste von weniger als 10% [A1] bei Display typischen Umschaltraten bei mehreren hundert Hz [31].

### 2.2.9 DLP

Eine weitere weitverbreitete Technologie der räumlichen Lichtverteilung stellen Digitale Lichtprozessoren (DLP) dar. Basierend auf MEMS-Technologie können mehrere Millionen Mikrospiegel, die in einem zweidimensionalen Feld angeordnet sind, unabhängig voneinander diagonal verkippt werden, siehe Bild 5b. Texas Instruments, der einzige Hersteller dieser Technologie, baut und vertreibt diese Systeme für Videoprojektoren, wo die DLPs zur Erzeugung des Bildes eingesetzt werden. Prinzipiell ist diese Technologie dafür geeignet, Laserlicht abzulenken und zu formen [32]. Aber trotz der hohen Umschaltrate von mehreren zehn kHz zeigt sich ein nicht akzeptierbarer Nachteil: Diese Technologie eignet sich nur für die Amplitudenmodulation, d.h. die Leistung wird nicht umverteilt, sondern lediglich stellenweise absorbiert. [33] Die Möglichkeit der Phasenmodulation ist beschränkt und einhergehend mit hohen Verlusten. [87, 88]

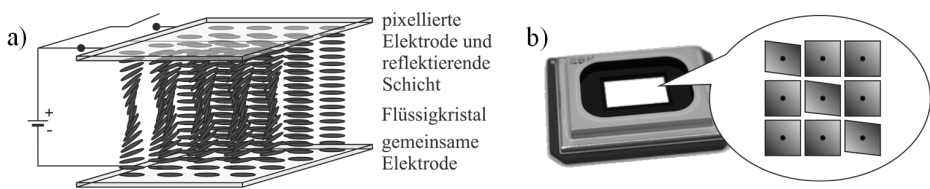


Bild 5: Prinzip von a) LCoS-SLM und b) DLP

### 2.2.10 Akustooptische Deflektoren

Der akustooptische Deflektor (AOD) bildet die dieser Arbeit zu Grunde liegende Technologie und wird daher umfassender in den Grundlagen behandelt. Der AOD besteht aus einem Kristall, an dem einseitig ein

piezoelektrischer Schwinger angebracht ist. Dieser erzeugt aus einem sinusförmigen elektrischen Signal eine Schallwelle, die durch den Kristall propagiert und am gegenüberliegenden Ende absorbiert wird. Diese Schallwelle entspricht einer periodischen Druckverteilung im Kristall, was wiederum einer periodischen Verteilung des Brechungsindex gleicht und damit ein Volumengitter darstellt. An einem solchen Volumengitter wird ein Laserstrahl gebeugt und damit abgelenkt. Der Ablenkwinkel ist dabei von der Frequenz der Schallwelle abhängig. Da die Ablenkung durch eine kontinuierliche Änderung der Schallfrequenz geändert wird entsteht eine Verzerrung des Laserstrahls im Fokus. Dieser sogenannte Zylinderlinseffekt kann bei gepulster Laserstrahlung verhindert werden indem die Änderung der Schallfrequenz zwischen den Laserpulsen stattfindet. Dabei entspricht die Ablenkgeschwindigkeit dann dem Inversen der Dauer, die der Schall benötigt, die Apertur zu durchlaufen, und ist damit nur von der Schallgeschwindigkeit des Kristallmaterials und dem Durchmesser der Apertur abhängig. So kann zum Beispiel für einen gepulsten Laserstrahl, der durch einen AOD abgelenkt wird, von einem zum folgenden Puls der Ort, an dem dieser auf der Werkstückoberfläche landet, geändert werden, wenn die Repetitionsrate des Lasers der Ablenkgeschwindigkeit des AODs gleicht. Es muss lediglich eine Synchronisation mit den Pulsen des Lasers vorgenommen werden. Da der Laserpuls wesentlich schneller durch den Kristall propagiert als der Schall, wird der Laser an einem quasi statischen Volumengitter gebeugt. [A2]

Die Grundlage für den AOD ist der akustooptische Effekt, der im Folgenden beschrieben wird.

### **2.3 Der akustooptische Effekt**

Der akustooptische Effekt war weit vor der Erfindung des Lasers bekannt: So hat Brillouin 1922 die Beugung von Licht an einer akustischen Welle vorhergesagt [34]. Debye und Sears [35] sowie Lucas und Biquard [36] konnten diese Vorhersage 1932 bestätigen. Bereits fünf Jahre später haben Raman und Nath ein Model zur vollständigen Beschreibung der Interaktion der Schall- und der Lichtwelle vorgestellt. Zu dieser Zeit wurde der akustooptische Effekt lediglich in Laboraufbauten zur Bestimmung akustooptischer Koeffizienten verwendet. Erst die Erfindung des Lasers im Jahre 1960 führte zu Anwendungen des akustooptischen Effekts. Mit der Erfindung des Lasers sind Modulatoren, Deflektoren, Phasenschieber und Signalanalytoren entwickelt worden. Technische Fortschritte beim Kristallwachstum und bei hochfrequenten Piezoschwingern haben zur steti-

gen Verbesserung akustooptischer Gerätschaften geführt. Im Jahr 2013 ist von Bechtold et al. die Idee, den akustooptischen Effekt zur Laserstrahlformung einzusetzen, vorgestellt [37] und patentiert [38] worden. Veröffentlichungen dazu in den Folgejahren bestätigen die Funktionsfähigkeit des akustooptischen Strahlformers [39, 40, A3, A4]. Neben der schon fast 100 Jahre zurückreichenden Historie der Akustooptik ist zum Verständnis dieser Arbeit und damit der Technologie des akustooptischen Strahlformers die physikalische Grundkenntnis über das Verhalten der Beugung einer elektromagnetischen Welle an einem akustischen Schallfeld notwendig. Dies wird in aller Kürze auf den folgenden zwei Seiten behandelt, bevor dann ein Überblick zu Strahlformungssystemen, die über die reine Ablenkung von Licht hinausgehen, gegeben wird.

Bei der Beugung einer ebenen elektromagnetischen Welle an einem Schallfeld unterscheidet man zwischen einer Beugung an einem ebenen Gitter, dem Raman-Nath-Bereich und der Beugung an einem Volumengitter. Während im Raman-Nath-Bereich örtliche unterschiedliche Phasenverzögerungen zu einer Beugung am Gitter mit mehreren Beugungsmaxima führen, wird bei der Bragg Beugung die elektromagnetische Welle an der Schallwelle reflektiert. Unter einem spezifischen Winkel, dem Bragg-Winkel, überlagern alle reflektierten Anteile konstruktiv, sodass es zur Ablenkung des Laserstrahls führt. Der Klein-Cook-Parameter  $Q$  nach Gleichung (1) gibt wieder, ob eine Beugung nach Raman-Nath oder Bragg vorliegt.

$$Q = \frac{2\pi\lambda f^2}{nv^2} \quad (1)$$

Dieser wird über den Brechungsindex  $n$ , die akustische Frequenz  $f$ , die Schallgeschwindigkeit  $v$ , die Interaktionslänge  $l$  und die Wellenlänge der elektromagnetischen Welle  $\lambda$  bestimmt. Der maßgebliche Unterschied, der die beiden Grenzfälle definiert, ist die Interaktionslänge  $l$  von akustischer und der elektromagnetischer Welle. Reale Systeme befinden sich zwischen den Grenzfällen und sind möglichst, je nach vorgesehener Anwendung, hinzu einem Bereich optimiert. Bild 6 zeigt die zwei Arten akustooptischer Interaktion, die mit dem Klein-Cook Parameter eingegliedert werden. Im Raman-Nath-Bereich, mit sehr kleinen Werten für  $Q$ , treten viele Beugungsordnungen auf. Dieser Bereich ist vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle unabhängig. Er zeichnet sich durch kleine akustische Frequenzen und kurze Interaktionslängen aus. Die Beugung ist hier mit der von dünnen Phasengittern zu vergleichen und die Richtung der gebeugten Teilstrahlen kann mit der Gittergleichung

beschrieben werden. Nach den Raman-Nath-Gleichungen ergibt sich eine maximale Beugungseffizienz in die erste Beugungsordnung von 34% bezogen auf die einfallende Welle [42]. Durch die geringe Beugungseffizienz eignet sich dieser Bereich nur schlecht für die Ablenkung von Laserlicht zur Materialbearbeitung und wird daher nur zur Modulation des ungebeugten Anteils eingesetzt, zum Beispiel als Güteschalter.

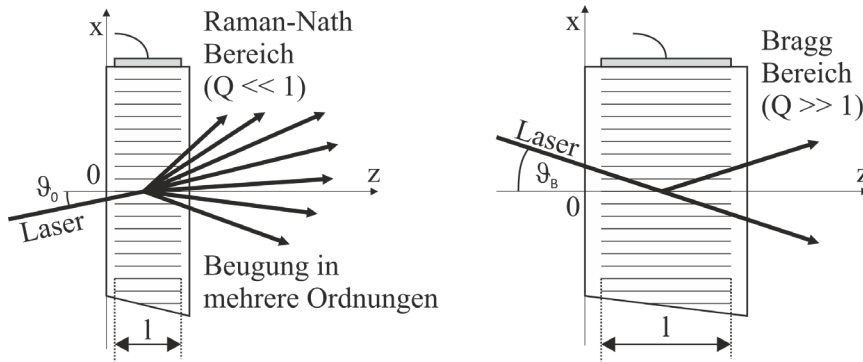


Bild 6: Unterschiedliche Arten der akustooptischen Interaktion nach [41]

Bei großen Werten für  $Q$  befindet man sich im Bereich der Bragg-Beugung. Hier ist die theoretische Beugungseffizienz für die erste Beugungsordnung 100% für eine sehr große Interaktionslänge  $l$ . Klein und Cook konnten durch numerisches Lösen der Raman-Nath-Gleichungen eine maximale Beugungseffizienz von 90% für reale Systeme bestimmen [43], die nur unter Einhaltung eines charakteristischen Winkels eintritt. Im Gegensatz zum Raman-Nath-Bereich resultiert bei der Bragg-Beugung lediglich ein Beugungsmaximum, wenn eine elektromagnetische Welle im Bragg-Winkel  $\vartheta_B$  einfällt und mit diesem Winkel dann auch reflektiert wird. Der Bragg-Winkel ist durch Gleichung (2) bestimmt.

$$\sin\vartheta_B = \frac{\lambda f}{v} \quad (2)$$

Da der Raman-Nath und der Bragg-Bereich lediglich die beiden Extremfälle akustooptischer Interaktion beschreiben, ist immer ein Mischfall zu beobachten. Generell gilt dabei, dass der Bereich der Bragg-Beugung wegen geringer ausfallenden Beugungsverlusten für die Ablenkung zu bevorzugen ist. Damit ist auch eine starke Winkelabhängigkeit des abgelenkten Teilstrahls zu beachten. [42]

Somit ergibt sich für AODs eine steuerungsfrequenzabhängige Verteilung der Beugungseffizienz  $\eta(f)$  die nach Gleichung (3) von der Frequenz der

Schallwelle  $f$ , der Mittenfrequenz  $f_m$  und der maximalen Beugungseffizienz beim Bragg-Winkel  $\eta_{max}$  abhängt [44].

$$\eta(f) \sim \eta_{max} \cdot \text{sinc}^2(f/f_m \cdot (1 - f/f_m)) \quad (3)$$

In der Realität zeigt sich jedoch, dass bereits gebeugtes Licht an der Schallwelle erneut gebeugt wird. Dadurch ergibt sich eine Reduzierung der Beugungseffizienz um die Mittenfrequenz, siehe Bild 7. Es zeigt sich daher in realen Systemen kein analytischer Zusammenhang zwischen der Frequenz der Schallwelle und der Beugungseffizienz [45].

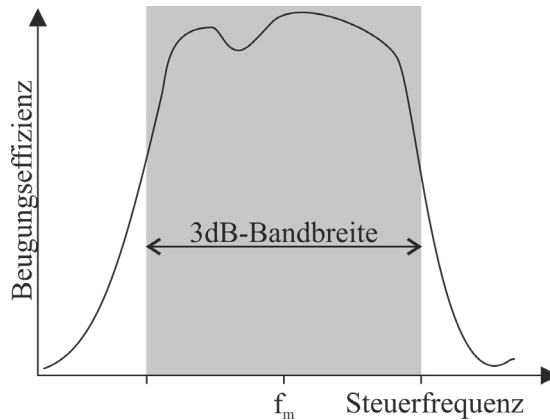


Bild 7: Typische frequenzabhängige Verteilung der Beugungseffizienz nach [45]

Da das Material akustooptischer Kristalle in der Regel doppelbrechend ist, wird die Polarisation der elektromagnetischen Welle beeinflusst. Bild 8 zeigt dafür qualitativ den Bragg-Winkel in Abhängigkeit der Frequenz der Schallwelle. Die Kurve mit den Quadraten spiegelt das Verhalten von isotropen Materialien wider: Hier erfährt die einfallende elektromagnetische Welle denselben Brechungsindex wie die ausfallende ( $n_e = n_a$ ). Die beiden anderen Fälle gelten für doppelbrechendes Material und werden als anisotrope Beugung bezeichnet, hier ist  $n_e \neq n_a$ . Die Kurve mit den Dreiecken und die mit den Punkten zeigen dabei die Grenzfälle auf, bei denen die Hauptachse  $\mathbf{H}$  des doppelbrechenden Kristalls mit der Polarisationssebene der einfallenden elektromagnetischen Welle übereinstimmt oder den umgekehrten Fall, wenn die Hauptachse mit der Polarisationssebene der ausfallenden elektromagnetischen Welle übereinstimmt. Je nach Anwendungsfall sind unterschiedliche Arbeitspunkte zu bevorzugen. Für den Zweck der Laserstrahlableitung bzw. -formung ist der Arbeitspunkt, der mit  $\mathbf{d}$  gekennzeichnet ist, zu wählen, da hier über einen großen

Bereich von Frequenzen der Schallwelle die Änderung des Bragg-Winkels gering ausfällt. Die Arbeitsbereiche um die Punkte **m** und **f** hingegen sind für akustooptische Modulatoren oder Phasenschieber besser geeignet.

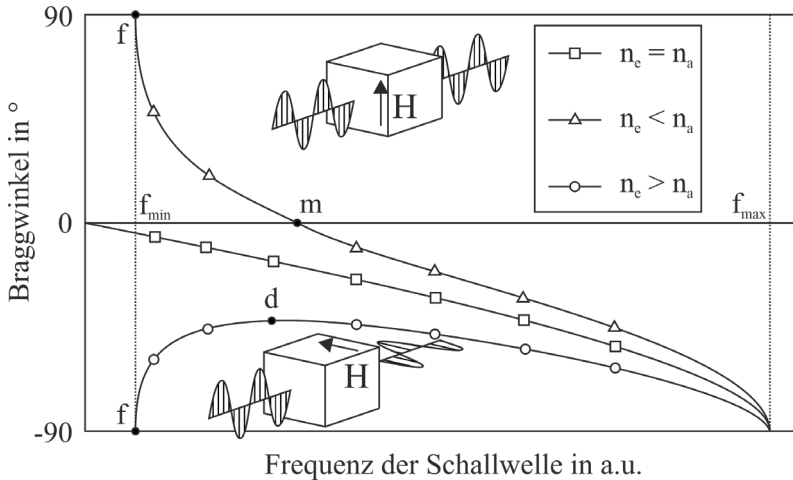


Bild 8: Bragg-Winkel in Abhängigkeit der Frequenz der Schallwelle nach [41]

Laserstrahlablekende Systeme, sog. akustooptische Deflektoren (AOD), können darüber hinaus mit longitudinalen und scherenden Schallwellen betrieben werden. Longitudinale führen zu einer höheren Beugungseffizienz, während der Betrieb mit scherenden Schallwellen eine geringere Abhängigkeit von der Polarisation der Laserstrahlung zeigt. Der bedeutendere Vorteil liegt aber in der um eine Größenordnung geringeren Schallgeschwindigkeit, wodurch niedrigere Frequenzen für die Schallwelle verlangt werden.

Durch die Propagation der Schallwelle mit Schallgeschwindigkeit ergibt sich gemäß dem Dopplereffekt ein Impulsübertrag an die gebeugten Anteile der elektromagnetischen Welle. Die damit einhergehende Frequenzverschiebung der elektromagnetischen Welle ist in Bezug auf die 4 Größenordnungen der Geschwindigkeitsunterschiede marginal und lässt sich nur mit schmalbandigen Strahlquellen bestimmen und nutzen. Eine weitere Betrachtung dieses Effektes findet im Rahmen dieser Arbeit daher nicht statt.

Während nach aktuellem Stand der Technik akustooptische Gerätschaften mit harmonischen Schallfeldern arbeiten, die sich dadurch auszeichnen, dass über viele Wellenzyklen keine Änderung der Frequenz auftritt, baut das Prinzip der akustooptischen Strahlformung (AOS) darauf auf,

dass Schallwellen induziert werden, die eine schnelle Änderung der Frequenz aufweisen. Diese Signale mit lokal unterschiedlichen Frequenzen führen zu lokal unterschiedlichen Ablenkwinkeln der einfallenden elektromagnetischen Welle und damit zu einer räumlichen Umverteilung der Energie eines Laserstrahls nach einer gewissen Propagationsstrecke, vgl. hierfür die skizzierten Prinzipien des AOD und des AOS in Bild 9. Aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen zeigen Ansätze, die zu einer Umverteilung von Laserlicht führen, weshalb diese im folgenden Kapitel vorgestellt und diskutiert werden.

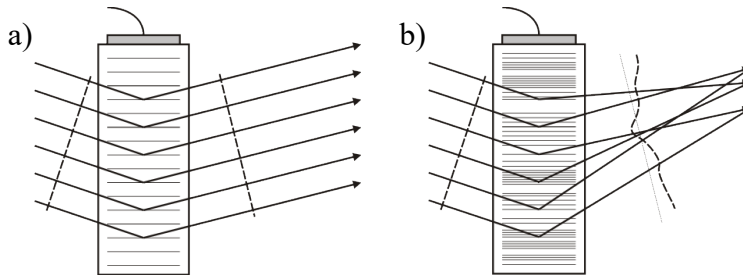


Bild 9: Prinzip des a) akustooptischen Deflektors mit harmonischer Schallwelle und b) des akustooptischen Strahlformers mit schnell variierender Frequenz der Schallwelle

## 2.4 Aktuelle Forschung zur akustooptischen Strahlformung

### 2.4.1 Der akustooptische Frequenzanalysator

Der akustooptische Frequenzanalysator dient der Analyse eines unbekanntes elektrischen Signals. Dieses wird in einen AOD gespeist und die Verteilung eines Laserstrahls, der dadurch abgelenkt wird, entspricht den im Signal vorhandenen Frequenzen. Die Leistungsverteilung des Laserstrahls entspricht der Amplitude der jeweiligen Frequenzen im elektrischen Signal unter der Berücksichtigung der frequenzabhängigen Beugungseffizienz. Der Frequenzanalysator gleicht dabei dem umgekehrten Prinzip des AOS. Die detaillierte Funktionsweise ist in [46] zu finden und in Bild 10 ist der Aufbau gezeigt. Der akustooptische Frequenzanalysator zeigt die Möglichkeit der räumlichen Energieverteilung prinzipiell auf. Das Wissen über die Berechnung des notwendigen elektrischen Signals zum Erreichen einer angestrebten Verteilung ist dabei unbekannt. Des Weiteren ist dieses System eindimensional und eine zweidimensionale Verteilung und damit Analyse zweier Signale erfolgt so nicht. Sind mehre-

re Kanäle elektrischer Signale zu analysieren, sind dementsprechend viele Frequenzanalytoren oder sukzessive Messungen vonnöten.

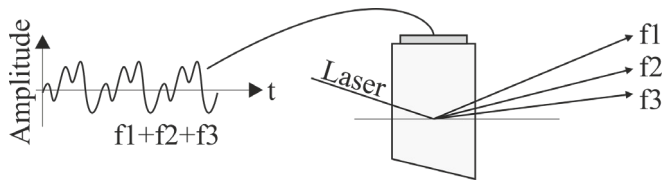


Bild 10: Der akustooptische Frequenzanalytator nach [47]

### 2.4.2 Laserlinie durch Frequenzüberlagerung

Ein erster Ansatz der gezielten Verteilung von Laserlicht mittels Akustooptik wurde zeitgleich mit dem Patent und den Arbeiten vom Lehrstuhl für Photonische Technologien veröffentlicht. Trypogeorgos et al. zeigen in [39] wie mit Hilfe einer gezielten Überlagerung von Schallwellen ein Laserstrahl eines HeNe-Lasers in ein Linienprofil überführt werden kann. In Abhängigkeit der Frequenz und der Amplitude der einzelnen Schallwellen ergibt sich daraus eine gewünschte Zielintensitätsverteilung. Die Arbeit zeigt auch, dass eine homogene Linie ohne Interferenzerscheinungen in Form von Speckle erzeugt werden kann, vgl. Bild 11. Dies ist durch den schmalbandigen HeNe-Laser und der Frequenzverschiebung, die eine elektromagnetische Welle bei der Ablenkung durch eine propagierende Schallwelle erfährt, möglich. Dadurch wird die kohärente Beziehung zwischen den einzelnen Teilstrahlen soweit verändert, dass diese nicht mehr zu Speckle interferieren. Die Autoren folgern daraus weiter, dass dies nur im eindimensionalen Fall möglich ist und bei der 2D-Formung Speckle auftreten werden [39]. Zusätzlich fällt die Frequenzverschiebung bei einem breitbandigen Laserstrahl, wie es für ultrakurze Laserpulse der Fall ist, zu gering aus. D.h. dass bei der Strahlformung ultrakurzer Laserpulse mit Speckle zu rechnen ist. Eine Materialbearbeitung ist nicht gezeigt worden. Die Autoren wollen diese Methode zum Einfangen und Halten ultrakalter Atome in Ionenfallen nutzen. Im Kapitel 5 wird dieser Algorithmus für die 2D-Anwendung erweitert und untersucht.

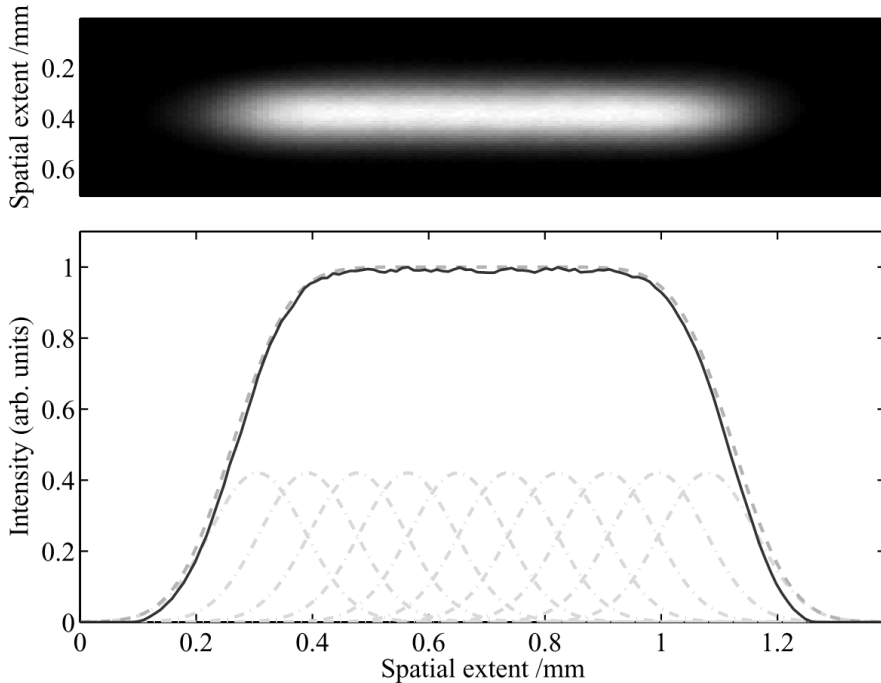


Bild 11: Im oberen Teil des Bildes ist eine Aufnahme des homogenen Linienprofils dargestellt. Im unteren Teil die Intensitätsverteilung eines zentralen Schnittes entlang des Linienprofils. Dieses Linienprofil ist aus den gestrichelt dargestellten Einzelprofilen zusammengesetzt [39]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren

### 2.4.3 Die steuerbare Gradientenoptik

Craig B. Arnold stellt in seinen Arbeiten [48 bis 51] die von ihm patentierte steuerbare Gradientenoptik (TAG, engl.: Tunable Acoustic Gradient Index of Refraction, Bild 12a) zur schnellen Variation der Fokuslage eines optischen Systems vor, siehe Bild 12a [52]. Einsatzgebiete sind in der Mikroskopie und in der Lasermaterialbearbeitung zu finden, vgl. Bild 12b,c. Die TAG-Linse ist ein mit Flüssigkeit gefüllter piezoelektrischer Hohlzylinder. Das System wird bei seiner Resonanzfrequenz betrieben. Daraus resultiert eine periodisch schwingende Brechungsindexverteilung im Inneren des Hohlzylinders. Die Verteilung folgt einer Besselfunktion erster Gattung und nullter Ordnung, die in ihrer Amplitude symmetrisch um null schwingt. Da diese Verteilung bis zur ersten Nullstelle, der einer Parabel gut gleicht, kann mit der TAG-Linse eine periodische Defokussie-

rung erzielt werden. Damit kann dann die Tiefenschärfe optischer Mikroskope [53] oder der axiale Arbeitsbereich von Laserstrukturierungsanlagen erweitert werden [49]. Da die TAG-Linse ein resonantes System ist, folgt die Verteilung des Brechungsindex immer der Resonanzbedingung dieses Systems und ist damit nicht frei einstellbar. Über die Defokussierung hinaus kann damit keine weitere Strahlformung erreicht werden. Zusätzlich ergeben sich Schwierigkeiten bei der Steuerung der Fokuslage und dem Betrieb mit anderen resonanten Systemen, wie zum Beispiel Ultrakurz-pulslasern, da beides Masteroszillatoren mit ähnlichen Resonanzfrequenzen sind.

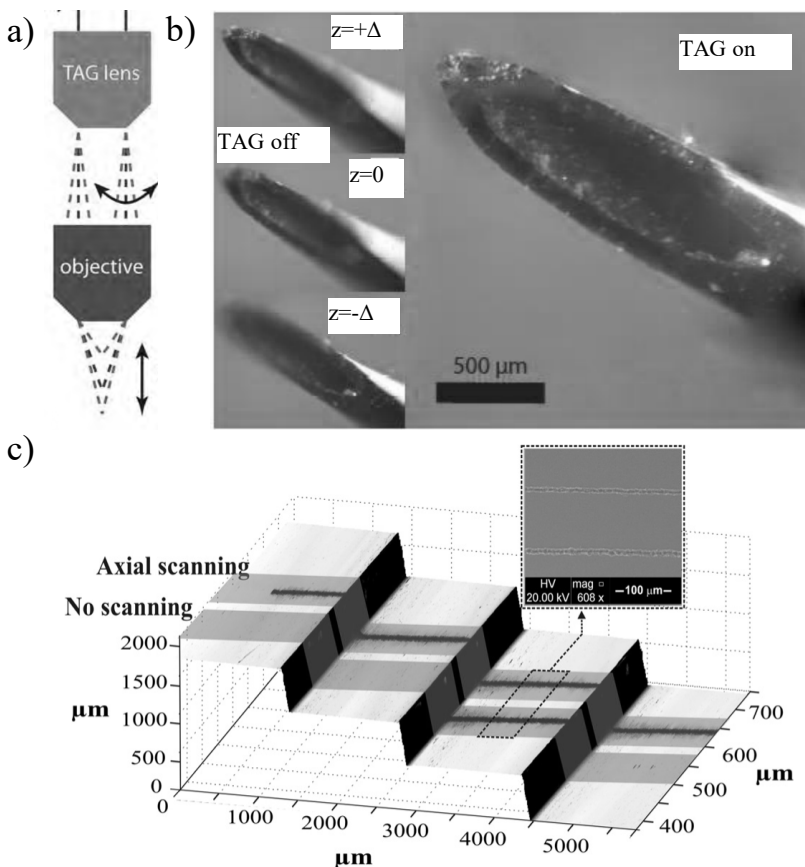


Bild 12: a) Funktionsprinzip der TAG [50], b) Lichtmikroskopische Aufnahme mit erweiterter Tiefenschärfe [54] und c) Lasermaterialbearbeitung mit TAG [49]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren

### 2.4.4 Die akustooptische Linse

Weitere Anwendungen akustooptischer Strahlformung zum Einbringen und Ausgleichen von Aberrationen finden sich in der Mikroskopie. Hier konnten Kaplan et al. bereits 2001 die eindimensionale Fokussierung durch eine Zylinderlinse mithilfe von zwei AODs aufzeigen und ermöglichten damit einen axialen Scan [55]. In den darauf folgenden Untersuchungen wurde eine zweidimensionale Fokussierung erreicht [56] und Aberrationen höherer Ordnung damit kompensiert [57]. Dabei sind zwei weitere AODs in den optischen Pfad eingebaut worden. Zur Korrektur der ersten acht Aberrationen nach Zernike sind sogar sechs AODs notwendig [57], die wie in Bild 13a dargestellt ausgerichtet sind.

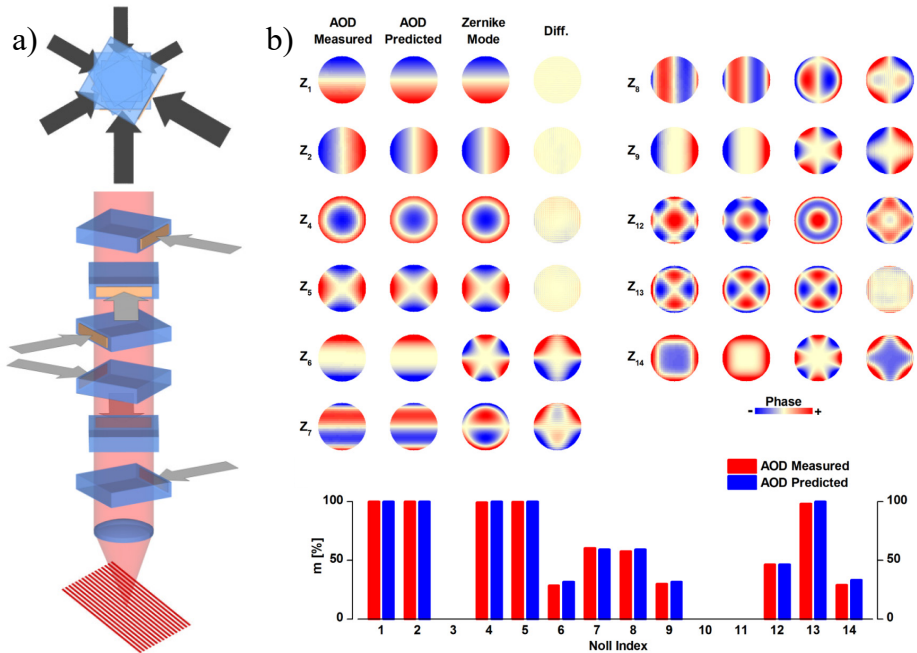


Bild 13: a) Akustooptische Linse (AOL) aus 6 AODs für die Strahlformung im Mikroskop [57] und b) experimentelle Untersuchung zur Kompensation von Aberrationen mit einem System mit nur zwei AODs [58]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Autoren

Dabei ergeben sich hohe Beugungsverluste, die in der Mikroskopie noch akzeptiert werden, für die Lasermaterialbearbeitung aber zu hoch ausfallen. Erst mit der von Bechtold et al. vorgeschlagenen [37] und von Ake- mann et al. [58] experimentell bestätigten Lösung, die lediglich zwei AODs für die Formung der Wellenfront eines Laserstrahls vorsieht, ist ein

Einsatz in der Lasermaterialbearbeitung möglich. Bei dieser Lösung findet nur eine teilweise Korrektur der Aberrationen statt, siehe Bild 13b. Abgesehen von diesen vereinzelt Einsätzen ist der akustooptische Effekt für die Strahlformung in der Materialbearbeitung noch gar nicht untersucht worden.

## 2.5 Möglichkeiten der Energieverteilung eines Laserstrahls auf dem Werkstück

Um die im vorangegangenen beschriebenen System für die Lasermaterialbearbeitung in ihrer Geschwindigkeit zu vergleichen wird für jedes System die Rate bestimmt mit der einzelne Punkte einer beliebigen Struktur erzeugt werden können. Diese in der Kommunikationstechnik als Datenübertragungsrate  $C$  bezeichnete Größe gibt an wie schnell Information übertragen werden kann. Für die Materialbearbeitung bedeutet dies, wie schnell die Punkte einer diskretisierten Struktur erzeugt werden können. Dabei können Strukturen durch sequenzielles Verteilen oder durch eine Parallelisierung aufgebaut werden. Die Datenübertragungsrate für sequenzielle Systeme ergibt sich wie folgt:

Die Manipulation des Laserstrahls ist im einfachsten Fall dessen sukzessive Ablenkung. Dabei wird der Winkel des Laserstrahls vor der Bearbeitungsoptik geändert, was zu einem Versatz in der Bearbeitungsebene führt. Da diese Winkeländerung und die daraus resultierende Ablenkgeschwindigkeit nicht unabhängig von der Bearbeitungsoptik ist, wird in [59] eine Methode präsentiert, die einen unabhängigen Vergleich von Strahlführungssystemen ermöglicht. Dabei wird die Rate der auflösbaren Spots ( $RRS$ ) nach Gleichung (4) aus [59] mit der Wellenlänge  $\lambda$ , dem Aperturdurchmesser  $d$  und der maximalen Ablenkgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_{max}$  bestimmt. Dieses Maß beschreibt unabhängig von einer Vergrößerung des Systems die Geschwindigkeit, mit der Fokuspunkte nebeneinander platziert werden können, sodass diese nach dem Rayleigh-Kriterium gerade noch als trennbare Punkte bestimmt werden können. Für ein sequenzielles System entspricht die Datenübertragungsrate  $C$ , also die Anzahl an unabhängigen Strukturpunkten, die pro Zeiteinheit erzeugt werden können, dem Wert von  $RRS$ , siehe Gleichung (5) aus [59].

$$RRS = \frac{1,64}{\lambda} \cdot d \cdot \dot{\alpha}_{max} \quad (4)$$

$$C = RRS \quad (5)$$

Diese Bewertung ist für gepulste und kontinuierlich emittierende Systeme gültig. Anhand gepulster Systeme kann die Bedeutung von  $C$  aber am einfachsten veranschaulicht werden: Hat man die Bestrahlung einer Fläche zum Ziel, limitiert  $C$  die Repetitionsrate ( $f_{rep}$ ) des Lasersystems. Je nach Werkstoff gibt es verschiedene Grenzen für den Pulsüberlapp, bei denen die negativen Einflüsse wie zum Beispiel die Wärmeakkumulation noch vermieden werden [60]. Dabei existiert, wie im Abschnitt 2.1 erläutert, ein Limit für die Energiedichte bzw. die Pulsenergie ( $Ep$ ). Da die Energiedichte im Bearbeitungsfokus bei Strahlführungssystemen nicht beeinflusst werden kann, ist die maximal anwendbare Leistung durch  $C$  des Strahlführungssystems limitiert. Die zur Verfügung stehende Leistung moderner Strahlquellen wird dabei noch nicht voll genutzt, was zu einem ineffizienten Einsatz solcher Strahlquellen führt.

Andere Systeme für die Lasermaterialbearbeitung erlauben eine Parallelisierung der Bearbeitung. Dabei gilt: Während die anwendbare Pulsenergie weiterhin durch den Werkstoff limitiert ist, wird die bereitgestellte Energie des Lasers gleichzeitig auf mehrere Orte aufgeteilt. Die Anzahl der Orte die gleichzeitig belichtet werden können bestimmt sich aus dem Grad der Parallelisierung  $G$ , nach Gleichung (6) aus [59].

$$G = \frac{1,64}{\lambda} \cdot d \cdot \alpha_{max} \quad (6)$$

Für eine zweidimensionale Strahlformung bei der Fokuspunkte unabhängig voneinander erzeugt werden können, findet eine Quadrierung von  $G$  statt. Besteht eine Abhängigkeit beider Dimensionsrichtungen d.h. Fokuspunkte können damit nicht beliebig unabhängig voneinander verteilt werden, so wird  $G$  lediglich verdoppelt. Um Systeme, die paralleles Verteilen ermöglichen, mit sequenziell arbeitenden zu vergleichen, muss der Grad der Parallelisierung  $G$  mit der Umschaltrate  $f_U$  multipliziert werden. Die Umschaltrate gibt an mit welcher Rate der Strahlformer eine Verteilung wechseln kann. Daraus ergibt sich die Datenübertragungsrate  $C$  solcher Systeme nach Gleichung (7).

$$C = G \cdot f_U \quad (7)$$

### Kombination

Ein ideales System mit hoher Datenübertragungsrate kann auch aus der Kombination eines schnellen sequenziellen und eines mit hohem Grad an Parallelisierung gebildet werden. Durch eine derartige Kombination kön-

nen Hochleistungsstrahlquellen bei hoher Repetitionsrate und hoher Pulsenergie betrieben und effizient genutzt werden. Die werkstoffbedingten Limitationen können dabei eingehalten werden. Die hierbei auftretende Limitation ist die Laserzerstörschwelle der einzelnen Komponenten, da viele Systeme für Einsatz mit hohen Leistungsdichten nicht geeignet sind, ist dies für jedes Subsystem zu prüfen. Da die Kombination zweier Systeme annähernd beliebig ausfallen kann, werden im Folgenden nur Einzelsysteme bewertet.

## 2.6 **Datenübertragungsrate in Spots/s**

Um den Stand der Technik und Forschung zusammenzufassen ist die Datenübertragungsrate  $C$ , welche die Anzahl unabhängiger Strukturpunkte pro Zeiteinheit beschreibt, realer Strahlführungs- und -formungssysteme bestimmt und in der Grafik in Bild 14 zusammengefasst worden. Eine Übersicht der evaluierten Systeme ist im Anhang a in tabellarischer Form beigefügt. Mit Galvanometerscannern, die den aktuellen Standard von Ablenkensystemen bei der Lasermaterialbearbeitung darstellen, können im Mittel 1.500/s unabhängige Strukturpunkte erzeugt werden. Für piezoelektrische Scanner ergibt sich ein Mittelwert von 360.000/s. Polygonscanner erreichen durch ihre kontinuierliche Rotation einen mittleren  $C$ -Wert von 39.000.000/s. Trotz der geringen Masse, aber wegen der aufwendigen Regelungstechnik für eine statische Auslenkung von MOEMS-Scannern, erreichen diese 3.300 Strukturpunkte pro Sekunde im nicht-resonanten Betriebsmodus. Im resonanten Betriebsmodus hingegen können im Mittel 7.400.000/s Strukturpunkte generiert werden. Das System, welches sich am dynamischsten zeigt, ist der EOD. Hier wird ein mittlerer  $C$ -Wert von 19.000.000.000/s erreicht. Diese Systeme sind aber noch Bestandteil aktueller wissenschaftlicher Untersuchungen und nicht in Materialbearbeitungsanlagen etabliert. Es hat sich aber bereits gezeigt, dass vor allem wegen deren kleinen Aperturen hohe Intensitäten entstehen und damit eine nichtlineare Interaktion im EOD stattfindet. Dies hat ein Versagen der Ablenkung zur Folge bei wenigen Watt gepulster Laserstrahlung [22]. Das Potential, das diese Technologie birgt, kann daher aktuell noch nicht genutzt werden und weiterer Forschungsbedarf ist hier notwendig.

Bei den strahlformenden Systemen muss der Grad der Parallelisierung mit der Umschaltrate multipliziert werden, um so die Datenübertragungsrate für diese Systeme zu bestimmen. Dabei ergibt sich für MEMS-SLMs und LCoS-SLMs ein mittlerer Wert von 57.000.000/s bzw. 190.000.000/s. Es

zeigt sich, dass trotz geringer Umschaltrate, aber wegen des hohen Grades an Parallelisierung mehr Strukturpunkte pro Sekunde erzeugt werden können als mit den gängigen Systemen, die eine reine sequenzielle Bearbeitung erlauben.

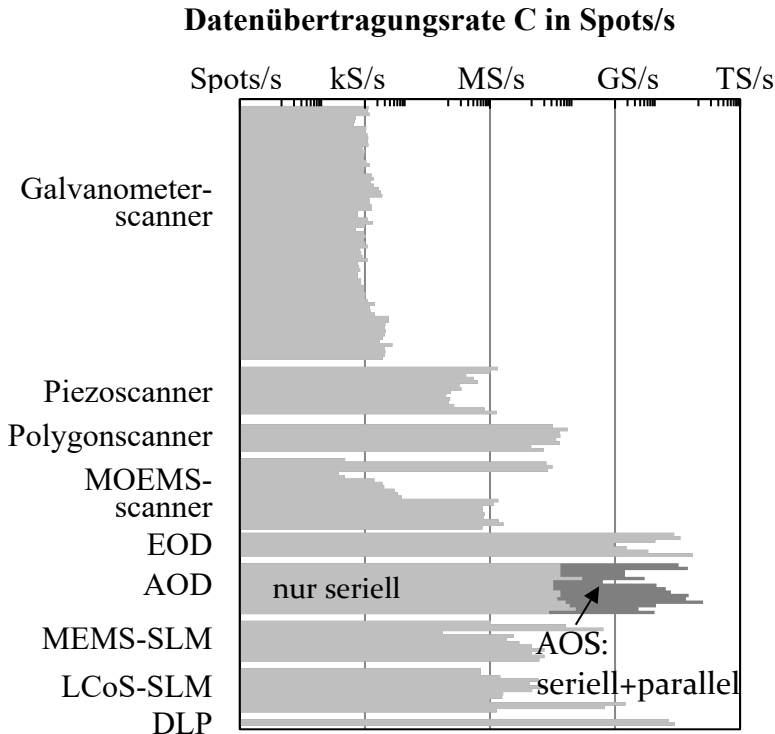


Bild 14: Datenübertragungsrate der bekannten Strahlführungs- und Strahlformungssysteme für die Lasermaterialbearbeitung; die Daten sind aus den Spezifikationen der im Anhang a gelisteten Systeme entnommen

Betrachtet man dann noch die strahlformenden Systeme mit hohen Umschaltraten ergibt sich für DLPs der höchste mittlere  $C$ -Wert von 21.000.000.000/s. Aus oben genanntem Grund ist der Einsatz von DLPs in der Lasermaterialbearbeitung bisher nur in wissenschaftlichen und prototypischen Untersuchungen zu finden, bei denen eine Funktionserweiterung mit stark verminderter Effizienz akzeptiert werden kann [61]. Mit AODs, die eigentlich der Kategorie der sequenziellen Bearbeitung zugehörig sind, wird ein mittlerer  $C$ -Wert von 60.000.000/s erreicht. Da in dieser Arbeit über den aktuellen Stand der Technik und Forschung hinausgegangen wird und der akustooptische Effekt für die Strahlformung

untersucht wird, können diese Systeme jetzt der Kategorie der Strahlformer zugeschrieben werden. Berücksichtigt man dann den Grad der Parallelisierung, der mit der Erweiterung des Funktionsumfangs von AODs erreicht wird, ergibt sich für die Datenübertragungsrate eines AODs mit Strahlformung ein mittlerer  $C$ -Wert von 27.000.000.000/s Strukturpunkten pro Sekunde. Diese Steigerung ist als dunkelgrauer Bereich in Bild 14 dargestellt. Hier zeigt sich bereits das enorme Potential, das mit der Technologie der akustooptischen Strahlformung erreicht werden kann und im Folgenden vorgestellt, untersucht und im Speziellen für die Lasermaterialbearbeitung charakterisiert wird.

### 3 Zielsetzung

Die Lasermaterialbearbeitung ist wie im Abschnitt 2.1 dargestellt nicht mehr von der Verfügbarkeit leistungsstarker Laserstrahlquellen beschränkt, sondern vielmehr können aktuelle Laserstrahlführungs- und -formungssysteme die verfügbare Leistung nicht zufriedenstellend auf einer Werkstückoberfläche verteilen, ohne negative Effekte wie Wärmeakkumulation und Inkubation zu vermeiden. Daher können die Laserstrahlquellen nicht ausgenutzt werden und dies führt zu ineffizienten Prozessen und langen Zykluszeiten. Daher werden bestehende Technologien, die im Abschnitt 2.2 dargestellt sind, optimiert und neue Strahlführungs- und -formungssysteme für die Materialbearbeitung untersucht. Auch diese Arbeit widmet sich der Erforschung einer neuen Strahlformungstechnologie, deren Grundlage der im Abschnitt 2.3 beschriebene akustooptische Effekt ist.

Die Evaluierung hinsichtlich der Datenübertragungsraten gängiger Strahlführungs- und -formungssysteme im Abschnitt 2.6 fasst den aktuellen Stand der Technik und Forschung zusammen und zeigt das Potential, das in der hier vorgestellten und untersuchten akustooptischen Laserstrahlformung (AOS) liegt. So ist die Datenübertragungsratenrate oder anders ausgedrückt die Anzahl an Strukturpunkten pro Sekunde, die damit erreicht werden kann, konkurrenzlos. Lediglich EODs und DLPs erreichen selbe Raten aber mit Nachteilen, die für eine effiziente Materialbearbeitung nicht akzeptabel sind. Die Technologie der AOS ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit erforscht worden und die Eigenschaften dieser werden anhand der im Folgenden formulierten Hypothesen untersucht:

1. Eine Strahlformung eines gaußförmigen Laserstrahlprofils hin zu materialbearbeitungsrelevanten Strahlprofilformen ist mit der AOS möglich.
2. Bereits verfügbare AOD Systeme erlauben die Nutzung der AOS in der Materialbearbeitung mit aktuellen Hochleistungslasern.
3. Eine Strahlformung von gepulsten und kontinuierlich emittierenden Lasern ist möglich, trotz der mit Schallgeschwindigkeit propagierenden Wellenfrontmanipulation.
4. Durch die Anwendung dieser Strahlformungstechnologie kann die Bearbeitungszeit verkürzt und die Effizienz gesteigert werden.

5. Die Bewertung der Qualität der Strahlprofile aus kameratechnischer Erfassung und der Vermessung der damit erzeugten Strukturen führt zum selben Ergebnis.
6. Die erreichbare Qualität der Strukturierung mit AOS entspricht der von konventionell hergestellten Strukturen mittels Galvanometerscannern.

Durch die Verifizierung dieser Hypothesen sollen die Eigenschaften der AOS dargestellt und charakterisiert werden. Hierfür wird zunächst im Kapitel 4 das Funktionsprinzip der AOS im Allgemeinen erklärt und die Möglichkeiten für die Strahlformung daran diskutiert. Darauf folgend werden universal gültige Spezifikationen für diese Technologie aus den physikalischen Grundlagen der Systeme abgeleitet, bevor das Experimentalsystem für die spezifische Untersuchung dieser Technologie vorgestellt wird.

Für den Betrieb der AOS ist eine neue Ansteuerung entwickelt worden, daher befasst sich das Kapitel 5 mit der Berechnung der notwendigen akustischen Signale. Dabei werden zwei Ziele der Strahlformung unterschieden: Die Strahlformung zur Korrektur von Aberrationen, mit der auch eine Defokussierung und damit eine Verschiebung der Bearbeitungsebene entlang der Strahlausbreitungsrichtung möglich ist. Dieses Ziel der Strahlformung ist vor allem bei der Innenstrukturierung transparenter Materialien von Bedeutung. Das zweite Ziel ist die geometrische Formung der Intensitätsverteilung in der Bearbeitungsebene. Diese findet bei absorbierenden Werkstoffen Anwendung, da hier flächige Intensitätsverteilungen zu einer kürzeren Bestrahlungsdauer und somit zu einem effizienteren Prozess bei gleichbleibender Qualität führen. Zur Berechnung der akustischen Signale werden bekannte Algorithmen erweitert und bewertet. Besonders für die zweite Art der Strahlformung ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer Berechnungsalgorithmus entwickelt worden, der die bedeutendste Innovation auf diesem Gebiet darstellt. In diesem Kapitel wird auch der Einsatz der AOS mit Laserstrahlquellen im gepulsten oder kontinuierlichen Betriebsmodus diskutiert.

Für den produktiven Einsatz der AOS ist nicht nur die reine Betrachtung der Beugungseffizienz die mit 20-30% nicht wirtschaftlich erscheint, sondern die Gesamteffizienz von Bedeutung, die auch den zeitlichen Anteil an genutzter Laserleistung berücksichtigt. Daher wird in Kapitel 6 auch ein Vergleich zu einem idealen Strahlformungssystem mit LCoS-SLM angestellt.

Im Kapitel 7 wird die mit der AOS erreichbare Qualität der Strahlprofile und Strukturen erfasst und bewertet. Da hierbei bekannter Weise Interferenzen in Form von Speckle auftreten, wird die Anzahl der minimal notwendigen Phasenverteilungen zum Erreichen einer homogenen Intensitätsverteilung mit kameratechnischer Erfassung der Strahlprofile bestimmt. Dabei zeigt die Dispersion durch die Beugung an einem AOS einen großen Einfluss auf die Homogenität. Dieser wird hier erfasst und diskutiert.

Des Weiteren wird im Kapitel 7 der Einsatz dieser Technologie für diverse Anwendungen diskutiert und demonstriert. Die Anzahl der minimal notwendigen Phasenverteilungen wird zudem aus den Daten der Topografie der Strukturen bestimmt und mit den Ergebnissen aus der kameratechnischen Bewertung der Strahlprofile verglichen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulation zur Vorhersage der Strahlprofile und der Abtragstruktur dient der theoretischen Untersuchung eines idealen Systems für akustooptische Strahlformung und ergänzt die experimentellen Untersuchungen. Abschließend wird die Qualität von Strukturen mit AOS und mit einem Galvanometerscanner verglichen.

Zuletzt wird die vorliegende Arbeit mit einer zusammenfassenden Darstellung abgeschlossen.



## 4 Die akustooptische Strahlformung

Bevor das Experimentalsystem für die spezifischen Untersuchungen der akustooptischen Strahlformung (AOS) dargestellt wird, wird das Funktionsprinzip der AOS im Allgemeinen erklärt und die damit darstellbaren Intensitätsverteilungen besprochen. Anschließend werden die charakteristischen Eigenschaften diskutiert, die die allgemeinen Spezifikationen eines Systems zur akustooptischen Strahlformung darstellen.

### 4.1 Funktionsprinzip der akustooptischen Strahlformung

Wie bereits beim Stand der Technik erläutert, arbeiten akustooptische Gerätschaften wie auch die AOS nach dem Prinzip des akustooptischen Effekts, der auf dem elasto-optischen Effekt basiert [42]. Bisher werden akustooptische Kristalle mit harmonischen Schallfeldern, bei denen über viele Wellenzyklen keine Änderung der Frequenz auftritt, eingesetzt. Das Prinzip der akustooptischen Strahlformung beruht auf der Einkopplung von Schallwellen, die eine schnelle Änderung der Frequenz aufweisen. Durch diese Signale mit lokal unterschiedlichen Frequenzen kommt es zu einer lokal unterschiedlichen Ablenkung einer einfallenden elektromagnetischen Welle und damit zu einer räumlichen Umverteilung der Energie eines Laserstrahls entlang der AOD-Achse nach einer gewissen Propagationsstrecke (vgl. hierfür die skizzierten Prinzipien des AOD und des AOS in Bild 9). Die Tatsache, dass mit einem AOD nur Wellenvektoren in eine Achsrichtung erzeugt werden können, ähnlich wie bei einem optischen Gitter, führt zu einer Strahlformung in nur eine Achsrichtung. Eine zweidimensionale Strahlformung wird dann erreicht, wenn zwei zueinander senkrechte Achsen eine subsequente, eindimensionale Strahlformung erzeugen. Dabei wird ein Laserstrahl erst in die eine, dann in die andere Achse umverteilt. In der Bearbeitungsebene entspricht dies mathematisch einer Faltung zweier eindimensionaler Verteilungen und ist in Bild 15a,b dargestellt. Die X-Achse formt einen Laserstrahl, der ohne Interaktion am Ort der  $0,te$  Beugungsordnung landen würde, in das Strichmuster, das als  $1,0te$  (ausgesprochen: „Einsnullte“) Beugungsordnung bezeichnet wird. Diese Verteilung wird durch die zweite Achse, als Y-Achse bezeichnet, senkrecht zur X-Achse verteilt. Dabei entstehen aus der Ablenkung der  $0,ten$  Beugungsordnung die  $0,ite$  (ausgesprochen: „Nulleinte“) Beugungsordnung und die gewünschte zweidimensionale Strahlform, die als  $1,ite$

(ausgesprochen: „Einseite“) Beugungsordnung bezeichnet wird. Durch diese nicht-axiale Strahlformung weg von der 0ten Beugungsordnung ist eine Filterung der ungewollten Beugungsordnungen einfach mit einer Blende zu bewerkstelligen, im Gegensatz zu einer isotropen Strahlformung zentral um die 0te Beugungsordnung, wie sie meist bei anderen strahlformenden Systemen auftritt.

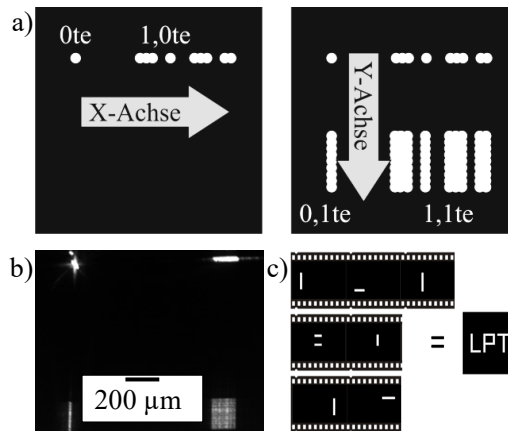


Bild 15: a) Akustooptische Strahlformung eines Barcodes durch subsequente Strahlformung mit zwei unabhängigen, orthogonalen Achsen, b) Realverteilung und c) Abfolge von 7 Profilen zur Formung der Buchstaben „LPT“

Des Weiteren ist durch diese Art der Strahlformung die Designfreiheit der erzeugbaren Intensitätsformen limitiert. Denn durch die Überlagerung von zwei einachsigen Strahlformern, die senkrecht zueinander sind, können lediglich Wellenvektoren in die zwei zueinander senkrechten Achsen der AODs erzeugt werden. Damit erreicht man Intensitätsverteilungen nach der Propagation ins Fernfeld die entweder der ursprünglichen Verteilung gleichen oder aus einer Überlagerung der ursprünglichen Verteilung entlang der Richtung der darstellbaren Wellenvektoren zusammengesetzt sind. Für die AOS mit zwei senkrechten AODs ergeben sich somit Verzerrungen des ursprünglichen Gauß-Profiles entlang der beiden AOD-Achsen. Bei größeren Ablenkwinkeln können Symmetrien erreicht werden, die parallel zu den AOD-Achsen sind und durch eine mathematische Faltung darstellbar sind. Auch ist es denkbar mit jeder Achse einen Intensitätsverlauf darzustellen und damit in der Faltung einen Verlauf der Intensität zu erreichen. Jedoch wird im Folgenden immer das Ziel einer möglichst homogenen Intensitätsverteilung in der 1,1ten Beugungsordnung verfolgt, da dies zum Stand der Technik und Forschung als relevante

Strahlformen für die Lasermaterialbearbeitung angesehen wird. So kann zum Beispiel ein Barcode, der aus mehreren parallelen, gleichlangen Linien oder Balken besteht, in nur einem Profil erzeugt werden. Eine Zielverteilung, die aus den Buchstaben „LPT“ besteht, muss hingegen aus einer Abfolge an Basisstrukturen zusammengesetzt werden, vgl. hierzu Bild 15c.

Damit wäre die Erklärung der *Strahlformung eines gaußförmigen Laserstrahlprofils hin zu materialbearbeitungsrelevanten Strahlprofilformen mit der AOS* gegeben und die 1. Hypothese dieser Arbeit teilweise belegt.

## 4.2 Allgemeine Spezifikationen

### 4.2.1 Umschaltrate

Die hohe Datenübertragungsrate ist der wesentliche Vorteil dieser Technologie. Dies ist dadurch begründet, dass bei dieser Ablenkung von Laserstrahlung keine Massen bewegt werden müssen. Die Umschaltrate  $f_U$  ist nur davon abhängig, wie schnell die Apertur des Systems mit einem neuen Schallfeld gefüllt werden kann. Das entspricht dem Inversen der Füllzeit  $t_f$ , die der Schall benötigt, einmal die Apertur zu durchlaufen:

$$f_U = \frac{1}{t} \quad \text{mit} \quad t_f = \frac{d}{v} \quad (8)$$

Die Dauer berechnet sich dabei aus der Schallgeschwindigkeit  $v$  und dem Aperturdurchmesser  $d$ . Die Schallgeschwindigkeit für die gängigen Materialien akustooptischer Kristalle entspricht für  $\text{TeO}_2$  660 m/s und für  $\text{SiO}_2$  5720 m/s. Für gängige Aperturdurchmesser, die sich in einem Bereich von 0,5 bis 10,0 mm befinden, ergeben sich damit Umschaltraten im Bereich von 66,0 kHz bis 11,4 MHz. Die Umschaltrate befindet sich im selben Bereich wie die Repetitionsrate aktueller Laserstrahlquellen hoher Leistung [2] und darüber. Für den für die späteren Untersuchungen gewählten Kristall mit einer Aperturgröße von 8 mm ergibt sich eine maximale Umschaltrate von 82,5 kHz. In Bild 16 ist die Umschaltrate in Abhängigkeit des Aperturdurchmessers in doppeltlogarithmischer Form dargestellt.

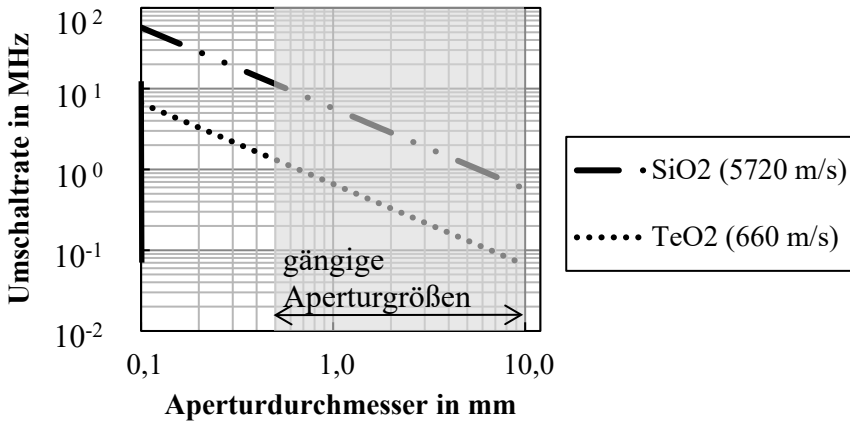


Bild 16: Umschaltrate von AOS

#### 4.2.2 Leistungsgrenzen

Verglichen mit anderen strahlformenden Systemen können bei der AOS relativ einfache optische Systeme verwendet werden, die lediglich aus antireflexionsbeschichteten akustooptischen Kristallen bestehen. Dadurch ist die Laserleistungsgrenze, mit der AOS-Systeme betrieben werden können, lediglich vom Kristallmaterial selbst oder der Beschichtung beschränkt. Für die Grenze der optischen Belastbarkeit sind dabei der kontinuierliche Belastungsfall (cw) sowie das durch hohe Pulsspitzenleistungen verursachte Versagen zu beachten. Bei gepulsten Systemen wird noch zwischen der Zerstörschwelle eines einzelnen Laserpulses und der aus einer Vielzahl an Pulsen unterschieden. Beide Zerstörschwellen unterscheiden sich. Für die Charakterisierung des AOS ist die zweitgenannte Schwelle interessant, da das System mit gepulster Strahlung im Dauereinsatz betrieben werden soll. Die von Herstellern angegebenen Grenzwerte für AODs aus TeO<sub>2</sub> liegt bei 10 W/mm<sup>2</sup> [62] bzw. bei 0,05 W/mm<sup>2</sup> [63] bei infraroter und kontinuierlicher Laserstrahlung. Diese Werte befinden sich weit unter dem tatsächlich anwendbaren: So ist laut eines anderen Herstellers ein Betrieb mit einem ähnlichen System bei Laserleistungsdichten von bis zu 350 W/mm<sup>2</sup> und für Pulsspitzenleistungen von bis zu 0,5 MW/mm<sup>2</sup> möglich [64]. Da sich die spezifizierten Werte, von denen auf Anfrage übermittelten, weit unterscheiden ist im Rahmen dieser Arbeit eine Untersuchung zur Zerstörschwelle typischer Kristallmaterialien durchgeführt worden. Die Untersuchung des reinen Kristalls und dessen

Beschichtung unter Außerachtlassung des übrigen Systems ist valide, da mögliche Folgen wie das Versagen der Elektronik oder die Ausprägung thermischer Linseneffekte durch bereits vorhandene Möglichkeiten der Kühlung entgegengewirkt werden kann. Dabei wird vom technologischen Fortschritt in Laserresonatoren profitiert, denn hier erfahren akustooptische Systeme Leistungen, die 2-3 Größenordnungen höher sind als die des Rohstrahls. [89] Die Untersuchungen stützen sich auf Werte aus der Literatur und den im Anhang c experimentell gemessenen Zerstörschwellen und sind in nachfolgender Tabelle 1 zusammengetragen:

Tabelle 1: Laserinduzierte Zerstörschwelle bei infraroter Laserstrahlung

| Belastungsfall  | SiO <sub>2</sub>                           | TeO <sub>2</sub>   |
|---|--|--|
| ultrakurz gepulst mit<br>300 fs und 1064 nm:<br>Pulsenergie $E_p$ | 3 J/cm <sup>2</sup> [65] aus<br>12 Quellen | 0,8 J/cm <sup>2</sup> [66]<br><br>eigene Messungen:<br>0,41 J/cm <sup>2</sup> unbeschichtet<br>0,18 J/cm <sup>2</sup> AR-beschichtet |
| cw:<br>Intensität $I_{max}$                                       | 200 kW/mm <sup>2</sup> [67]                | 350 W/mm <sup>2</sup> [64]   |

Die experimentell bestimmte maximale Pulsenergie bei 0,41 J/cm<sup>2</sup> ist 49% geringer als vergleichbare Werte aus der Literatur bei 0,8 J/cm<sup>2</sup>. Für das System mit einer Antireflexionsbeschichtung (AR) ist eine noch geringere Zerstörschwelle bei 0,18 J/cm<sup>2</sup> (23%) zu messen. Für einen Betrieb bei hohen Pulsenergien sollte daher auf AR-Beschichtungen verzichtet werden. Mit diesen Werten ergibt sich für den kontinuierlichen Belastungsfall die maximale anwendbare Leistung  $P_{cw,max}$  nach Gleichung (9):

$$P_{cw,max} = I_{max} \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \pi \quad (9)$$

Bei gepulsten Strahlquellen ist zusätzlich das Versagen durch eine zu hohe Energie zu verhindern. Die damit anwendbare mittlere Leistung  $P_{p,max}$  errechnet sich nach Gleichung (10) aus der eingesetzten Pulsenergie  $E_p$  und der Repetitionsrate  $f_{rep}$ . Um alle Möglichkeiten der AOS zu nutzen entspricht  $f_{rep}$  maximal der Umschaltrate  $f_U$ . Es kann aber auch Anwendungen geben die mit einer höheren Repetitionsrate einhergehen, dabei entstehen dann Einschränkungen in der der AOS. Generell ist darauf zu achten, dass weder die Leistungsgrenze  $P_{cw,max}$  aus der linearen Zerstörschwelle noch die zulässige Pulsenergie  $E_p$  nicht überschritten werden.

$$P_{p,max} = E_p \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \pi \cdot f_{rep} = E_p \cdot \frac{dv}{4} \cdot \pi \quad (10)$$

Für eine versagensfreie Anwendung muss die mittlere Leistung des verwendeten Lasers geringer ausfallen. In Abhängigkeit der Aperturgröße des AODs ergibt sich dabei folgendes, in Bild 17 dargestelltes Verhalten. Während für AODs aus TeO<sub>2</sub> der cw-Belastungsfall bei Aperturdurchmesser bis 3 mm zuerst erreicht wird und dann die nichtlineare Zerstörschwelle, muss beim Einsatz von SiO<sub>2</sub> auf die nichtlineare Zerstörschwelle geachtet werden. So ist bei einem AOS-System mit 8 mm Aperturdurchmesser darauf zu achten, dass beim Betrieb die mittlere Leistung von 7.500 W nicht überschritten wird. Für den Betrieb mit cw-Lasern ergibt sich eine obere Leistungsgrenze von 17.600 W. Da diese Werte weit von der Leistungsfähigkeit aktueller Strahlquellen entfernt sind, kann ein bedenkenloser Betrieb mit einem solchen System durchgeführt werden. Selbst wenn eine inhomogene Intensitätsverteilung im AOD vorliegt, ist der Sicherheitsfaktor damit ausreichend groß. Damit ist diese Technologie auch prinzipiell für zukünftige Anwendungen mit immer weiter steigenden Laserleistungen geeignet.

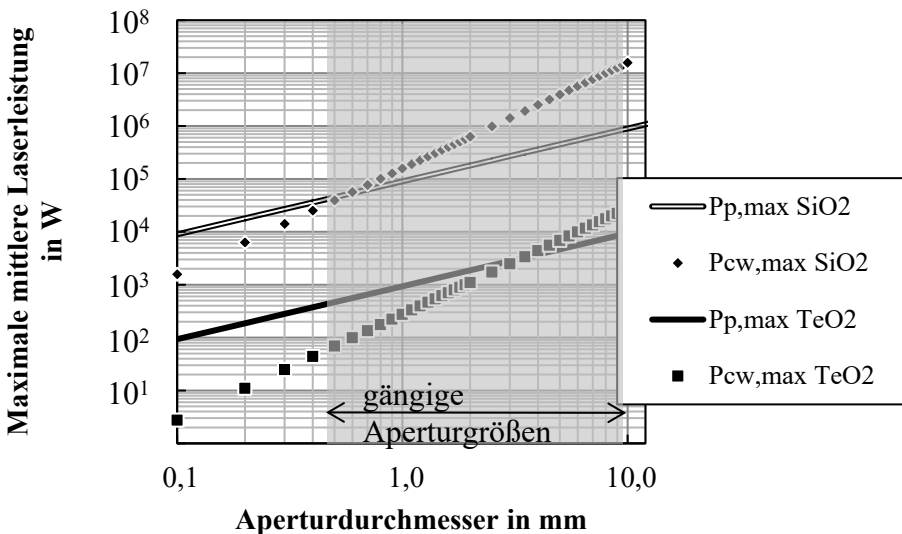


Bild 17: Maximale Laserleistung für AODs abhängig vom Aperturdurchmesser

Hier ist die AOS im Gegensatz zu anderen Technologien, wie zum Beispiel dem LCoS-SLM, konkurrenzlos. Bei der letztgenannten Technologie

ist die bestätigte Obergrenze für die Laserleistung bei 220 W in [68] zu finden.

Die allgemeine Betrachtung der Zerstörschwelle belegt die 2. Hypothese dieser Arbeit: *Bereits verfügbare AOD Systeme erlauben die Nutzung der AOS in der Materialbearbeitung mit aktuellen Hochleistungslasern.*

### 4.2.3 Zeitliche Dispersion – Auswahl der passenden Pulsdauer

Da es sich bei akustooptischen Systemen um Kristalle mit einer Transmissionslänge von mehreren Zentimetern handelt, ist vor allem bei deren Betrieb mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung die Dispersion mit ihren zeitlichen und räumlichen Folgen zu beachten. Unter Dispersion versteht man die Eigenschaft, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Medium von der Frequenz der elektromagnetischen Welle selbst abhängig ist. Dabei beschreibt die Phasengeschwindigkeit  $v_P$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit, mit der sich Ebenen konstanter Phasen einer monochromatischen Welle ausbreiten. Sie ist über die Wellenzahl  $k = 2\pi/\lambda$  und Kreisfrequenz  $\omega_f$  definiert, siehe Gleichung (11).

$$v_P = \frac{\omega_f}{k} = \frac{c_0}{n(\omega_f)} \quad (11)$$

Die Tatsache, dass die Phasengeschwindigkeit von der Wellenzahl und damit von der Wellenlänge abhängig ist, bezeichnet man Phasengeschwindigkeitsdispersion oder Dispersion erster Ordnung. Aus dem folgt ein wellenlängenabhängiger Brechungsindex:  $n(\omega_f) = c_0/v_P$  mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$ .

Bei Ultrakurzpulslasern, deren Pulse eine breite spektrale Bandbreite aufweisen, ist die Gruppengeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit mit der sich der Laserpuls im Medium ausbreitet, relevant. Die Gruppengeschwindigkeit  $v_G$  ist die inverse der ersten Ableitung der Wellenzahl nach der Kreisfrequenz.

$$v_G = \left( \frac{\partial k}{\partial \omega_f} \right)^{-1} = \frac{c_0}{n(\omega_f) + \omega_f \frac{\partial n}{\partial \omega_f}} \quad (12)$$

Für die Verbreiterung eines Laserpulses in einem dispersiven Medium ist vor allem aber die Änderung der Gruppengeschwindigkeit, also die Gruppengeschwindigkeitsdispersion  $GGD$ , ausschlaggebend. Die  $GGD$  ist die

Änderung der Gruppengeschwindigkeit über der Frequenz der elektromagnetischen Welle. Sie ist die Ableitung der inversen Gruppengeschwindigkeit nach der Kreisfrequenz, siehe Gleichung (13). Hier spricht man von der Dispersion zweiter Ordnung.

$$GGD = \frac{\partial}{\partial \omega_f} \left( \frac{1}{v_G} \right) = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega_f^2} \quad (13)$$

Mit der  $GGD$  kann die Pulsdauerverlängerung eines Laserpulses beim Durchgang durch ein dispersives Medium nach Gleichung (14) aus [69] bestimmt werden.

$$\tau_{out} = \tau_{in} \sqrt{1 + \left( \frac{4 \cdot \ln(2) \cdot l \cdot GGD}{\tau_{in}^2} \right)^2} \quad (14)$$

Dabei beschreibt  $\tau_{in}$  die anfängliche, zeit-bandbreite limitierte Dauer eines Gaußpulses und  $\tau_{out}$  die Dauer des Gaußpulses, der durch das dispersive Medium propagiert ist. Darüber hinaus sind für die Berechnung die Transmissionslänge  $l$  und die Gruppengeschwindigkeitsdispersion  $GGD$  für das Material notwendig. Ein typischer AOD hat eine Transmissionslänge von 3 cm und die  $GGD$  von  $\text{TeO}_2$  liegt bei  $8683 \text{ fs}^2/\text{cm}$  bei einer Wellenlänge von  $1064 \text{ nm}$  [70], womit sich das in Bild 18 dargestellte Verhalten der Pulsdauer ergibt.

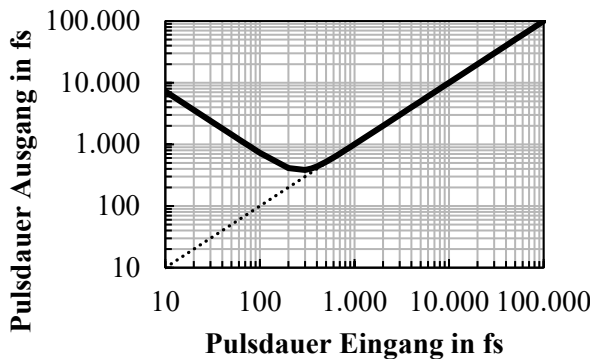


Bild 18: Pulsdauerverlängerung bei der Transmission durch einen 3 cm langen AOD-Kristall aus  $\text{TeO}_2$

Aus Bild 18 ist ersichtlich, dass sich bei Lasersystemen mit einer Pulsdauer kürzer als 300 fs eine ausgeprägte Verlängerung der Pulsdauer einstellt. Eine Pulsdauerverlängerung kann prinzipiell im Vorfeld kompensiert

werden [71], bei der Verwendung mit längeren Pulsdauern wird eine Kompensierung nicht notwendig.

#### 4.2.4 Räumliche Dispersion und Beugung am Gitter – Auswirkung auf den Bearbeitungsfokus

Die Tatsache, dass der Brechungsindex  $n(\omega_f)$  von der Kreisfrequenz und damit von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängig ist, führt bei der Brechung eines breitbandigen Laserpulses zu einer räumlichen Aufspaltung des Laserstrahls in seine spektralen Komponenten. Doch da die Facetten der akustooptischen Kristalle des AODs annähernd planparallel sind und der Laserstrahl unter kleinen Winkeln zur Oberflächennormalen auftritt, hat die Dispersion bei der Brechung keinen messbaren Einfluss auf die Energieverteilung quer zum Laserstrahl. So zeigt der ungebeugte Anteil der Laserstrahlung keine Verzerrung des runden Fokus. Dahingegen ist der abgelenkte Anteil in der Bearbeitungsebene deutlich elliptisch, siehe Bild 19d. Dies wird durch Dispersion bei der Beugung am akustooptischen Gitter mit der Gitterkonstante  $g$  verursacht, da sich für jede spektrale Komponente ein geringfügiger anderer Ablenkwinkel  $\alpha$  ergibt:  $\sin(\alpha) = \lambda/g$ . Zur Kompensation dieser elliptischen Verzerrung des Fokus existieren in der Literatur verschiedene Lösungen: Viele sehen dabei den Einsatz eines oder mehrerer weiterer AODs vor, die mit einer räumlich umgekehrten Schallausbreitungsrichtung betrieben werden und damit eine dynamische Kompensierung der Dispersion je nach Ablenkwinkel erlauben [72], siehe auch Bild 19a. Da bei der Strahlformung viele Winkel gleichzeitig erzeugt werden, ist eine solche dynamische Anpassung nicht möglich und es wird eine starre Kompensation um den mittleren Ablenkwinkel nach [73] vorgeschlagen. Diese Lösung sieht den Einsatz eines Prismas vor, durch das dem System die umgekehrte Dispersion auferlegt wird, siehe Bild 19b. Das Prisma wird für die Korrektur der Dispersion von zwei AOD-Achsen in einem Winkel von  $45^\circ$  um die Propagationsrichtung rotiert, sodass dieses diagonal zu beiden Achsen des AODs steht. So kann mit nur einem Prisma eine Korrektur beider Achsen erfolgen. Für die Auswahl und die Platzierung des Prismas in den Strahlengang vor dem AOD muss Gleichung (15) erfüllt sein.

$$\sigma_{AOD} + \sigma_P = 0 \quad (15)$$

Das bedeutet, dass die Dispersion durch den AOD  $\sigma_{AOD}$  und die des Prismas  $\sigma_P$  sich gegenseitig aufheben. Die Dispersion des AODs berechnet

sich aus der Schallgeschwindigkeit  $v$  und der Frequenz  $f$  der Schallwelle nach Gleichung (16).

$$\sigma_{AOD} = \frac{\sqrt{2} f}{v} \tag{16}$$

Der Faktor  $\sqrt{2}$  berücksichtigt die zweifache Ablenkung durch die orthogonalen Achsen des AODs. Die Dispersion durch das Prisma wird vom Material und dessen Positionierung im Strahlengang nach Gleichung (17) bestimmt [74].

$$\sigma_P = \frac{\cos(I_2) \tan(I_1') + \sin(I_2)}{\cos(I_2')} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \tag{17}$$

Die Dispersion  $dn/d\lambda$  ist durch die Wahl des Materials des Prismas gegeben. Die Winkel  $I$  sind jene, welche die Propagationsrichtung des Laserstrahls mit den Oberflächennormalen des Prismas aufspannen, wie in Bild 19c dargestellt.

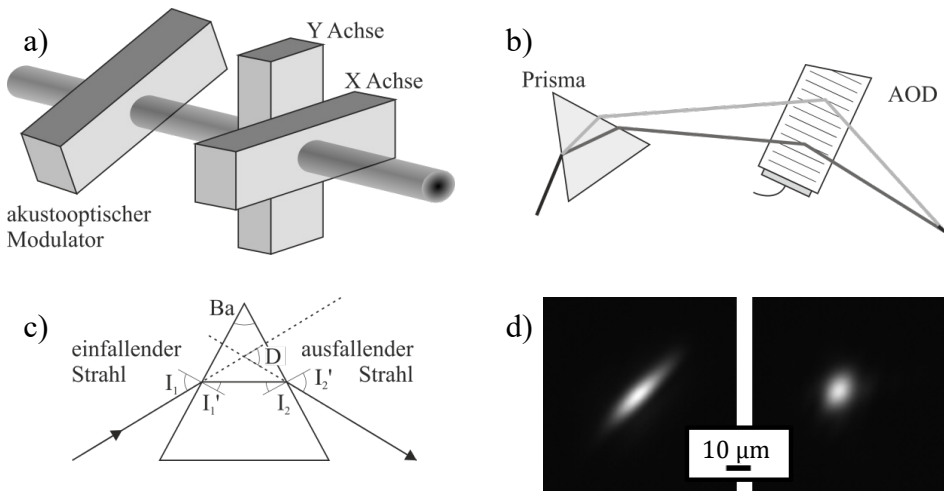


Bild 19: a) Dynamische Kompensation der Dispersion beim AOD nach [72], b) starre Korrektur in einer Ebene nach [73], c) Winkel  $I$  nach [74] und d) zweidimensional abgelenkter Laserstrahl ohne und mit Kompensation der Dispersion

Für einen AOD aus  $\text{TeO}_2$  und mit einer Frequenz der Schallwelle von  $50 \pm 15$  MHz ist die Gleichung (15) dann erfüllt, wenn ein Prisma aus N-SF<sub>11</sub> mit einer Dispersion von  $-0.031037 \mu\text{m}^{-1}$  und einem Basiswinkel  $Ba$  von  $60^\circ$  eingesetzt wird. Dabei ergibt sich für den Winkel  $D$  zwischen ein- und ausfallendem Strahl ein Wert von  $66,1^\circ$ . Das vorher ovale Profil des Fokus

wird nun mittels Prismas in die gewünschte runde Zielverteilung zurückgeführt. Dadurch lassen sich nicht nur höhere Leistungsdichten aufgrund der kleineren Bestrahlungsfläche erreichen, sondern auch die Geometrie der Zielverteilung bei Strahlprofilformung wird genauer eingehalten. Da hierbei eine Kompensation der Dispersion nur bei einer Frequenz der Schallwelle und nicht im gesamten Arbeitsbereich erreicht werden kann, muss der Einfluss der verbleibenden Dispersion auf die Strahlformung und die Strukturierung bewertet und diskutiert werden. Denn im Hinblick auf die Transmission von 91% des Prismas und der damit einhergehenden Reduktion der Effizienz könnte die Dispersion aus der Beugung am Gitter bei der AOS durchaus akzeptiert werden.

### 4.3 Laboraufbau zur Untersuchung der AOS

Als Strahlquelle fungiert ein Ultrakurzpulslaser Origami-10XP der Firma Onefive. Dieser emittiert Laserlicht der Wellenlänge 1030 nm mit einer Pulsdauer von 400 fs. Der Resonator kann mit einer Grundfrequenz von 50 kHz bis 1 MHz betrieben werden, wobei eine maximale mittlere Leistung von 3 W erzeugt wird. Die spektrale Bandbreite beträgt 4 nm. Eine Phasenplatte mit  $\lambda/2$  (Thorlabs, WPH10M-1030) ermöglicht die Einstellung der Polarisation und damit der Transmission für das Prisma (Thorlabs, PS853), welches im Abschnitt 4.2.4 beschrieben wird. Eine weitere, identische Phasenplatte dient zur Anpassung der Polarisation vor dem AOD, da die Effizienz der Beugung am AOD polarisationssensitiv ist. Der AOD ist aus zwei separaten Kristallen aus  $\text{TeO}_2$  aufgebaut.

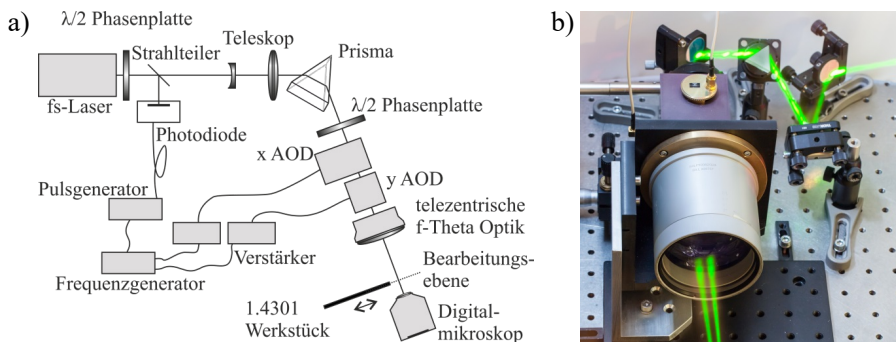


Bild 20: a) Prinzipieller und b) tatsächlicher Aufbau des Experimentalsystems eines akustooptischen Strahlformers

Das AOD-System 2DS8-50-30-1030 von der Firma Brimrose hat eine Apertur von 8 mm Größe und wird in einem Frequenzbereich von 35-65 MHz betrieben. Zur Justierung ist der AOD auf einem Achssystem mit zwei rotatorischen und einer translatorischen Achse montiert. Die nachfolgende telezentrische F-Theta-Optik der Firma Sill (S4LFT0082/328) ist mit der rückseitigen Eingangsapertur so platziert, dass diese mittig zwischen beiden Kristallen des AODs liegt, da hier die Phasenmanipulation für die Strahlformung stattfindet. Diese Ebene wird im Folgenden als Fourierebene bezeichnet. Es ist sicherzustellen, dass diese Ausrichtung erreicht ist und somit die Fourier-Beziehung gilt. Dadurch können die gewünschten Intensitätsverteilungen berechnet, im Experiment dargestellt und qualifiziert werden. Durch die F-Theta-Optik wird aus der Manipulation der räumlichen Phase in der Eingangsapertur eine Umverteilung der Laserleistung in der Bearbeitungsebene, die der Brennebene der Linse entspricht. In dieser Ebene findet die Strukturierung von Edelstahl (1.4301) statt oder eine Erfassung und darauffolgende Bewertung der erzielten Intensitätsverteilung. Dafür wird mit einem Digitalmikroskop die Intensitätsverteilung in der Bearbeitungsebene vergrößert erfasst. Die Vergrößerung ist so gewählt, dass die beugungsbegrenzt erzeugte Intensitätsverteilung mit einem Fokusedurchmesser von 10  $\mu\text{m}$  mit 16,67 Pixeln aufgelöst wird. Dafür wird mit einer Objektivlinse DIN 10 $\times$  0.25 von Edmund Optics die Bearbeitungsebene 10 $\times$  vergrößert auf die Kamera UI-1220SE-M-GL von IDS abgebildet. Für die folgenden Untersuchungen wird darauf geachtet, dass die für eine Auswertung erfassten Aufnahmen an keiner Stelle die Sättigungsgrenze des Sensors aufweisen. Die Linearität der Übertragungskurve des Digitalmikroskops wurde bestätigt, siehe Anhang b. Für die Vermessung der Wellenfront wird an Stelle der F-Theta-Optik und des Digitalmikroskops eine um den Faktor 0,6 verkleinernde 4f-Abbildung (Thorlabs, LB1904-B-ML und LB1901-B-ML) der Fourierebene auf einem Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor (Thorlabs, WFS150-5C) aufgebaut. Die akustischen Signale für den AOD werden mit den Laserpulsen der Strahlquelle über eine Photodiode (Thorlabs, PDA8A) und einen Pulsgenerator (Stanford Research Systems, DG645) nach im Abschnitt 5.4 dargestellten Verfahren synchronisiert. Die im Vorfeld berechneten Signale werden in einem triggerbaren 2-Kanal-Frequenzgenerator für beliebige Signalformen (National Instruments, NI PXIe-5451) mit einer Samplerate von 400 MS/s erzeugt. Der Pegel von  $\pm 1$  V wird dann mit jeweils einem Verstärker (Brimrose, PA-50-30-10-23-B1) um 23 dB verstärkt und zu dem AOD weitergeleitet. In Bild 20 ist der Aufbau skizziert und photographisch dokumentiert.

Die Auflösung des AOS nach dem Rayleigh-Kriterium und damit der Grad der Parallelisierung  $G$  entspricht einem Wert von 596<sup>1</sup> je Achse. Womit sich mit der Umschaltrate von 82,5 kHz eine Datenübertragungsrate  $C$  von 98,3 MS/s für dieses Experimentalsystem ergibt.

---

<sup>1</sup> Die Auflösung berechnet sich nach  $N = 1,64 \frac{d \cdot \alpha_{max}}{\lambda}$  mit  $\alpha_{max} = \frac{\lambda \cdot \omega}{v}$  aus [59].



## 5 Berechnung akustischer Signale für die Strahlformung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Berechnung der für die akustooptische Strahlformung notwendigen Signale. Zuerst wird im Allgemeinen erklärt, wie aus einer Phasenverteilung das akustische Signal berechnet wird. Dann wird bei der Bestimmung der Phasenverteilung in die zwei Arten der Strahlformung unterschieden. Bei Aberrationskorrektur ist die Phasenverteilung in der Fourierebene bekannt, während bei der geometrischen Umformung der Intensitätsverteilung von einer Zielintensitätsverteilung ausgegangen wird und die Phasenverteilung erst bestimmt werden muss.

### 5.1 Berechnung des Signals aus der Phasenverteilung

Die im Folgenden beschriebene Berechnung des akustischen Signals geschieht in drei Rechenschritten an der Achse für die x-Richtung. Die Berechnung des akustischen Signals für die Achse in y-Richtung erfolgt analog dazu. Es wird von einer bekannten Phasenverteilung ausgegangen und daraus zuerst die Frequenz der Schallwelle am jeweiligen Ort bestimmt. Daraus wird dann die Frequenzmodulation berechnet, die das akustische Signal im AOD haben muss. Dieses Vorgehen ist in Bild 21 dargestellt.

Eine elektromagnetische Welle wird um den Winkel  $\alpha_i$  abgelenkt, wenn diese an zwei benachbarten Orten, quer zur Ausbreitungsrichtung die  $\Delta x$  auseinanderliegen, einen optischen Weglängenunterschied von  $\Delta h_i$  erfährt. Da nur kleine Ablenkwinkel in der Akustooptik erreicht werden ist die Kleinwinkelnäherung zulässig.

$$\tan \alpha_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta x} \rightarrow \alpha_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta x} \quad (18)$$

Der optische Weglängenunterschied  $\Delta h_i = \frac{\Delta \varphi_i}{k}$  ist sinnvoller mit der Phasenverschiebung  $\Delta \varphi_i$  und der Wellenzahl  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  auszudrücken: womit sich aus Gleichung (18) der Zusammenhang aus Phasenverschiebung und Ablenkwinkel ergibt:

$$\frac{\Delta \varphi_i}{\Delta x} = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_i \quad (19)$$

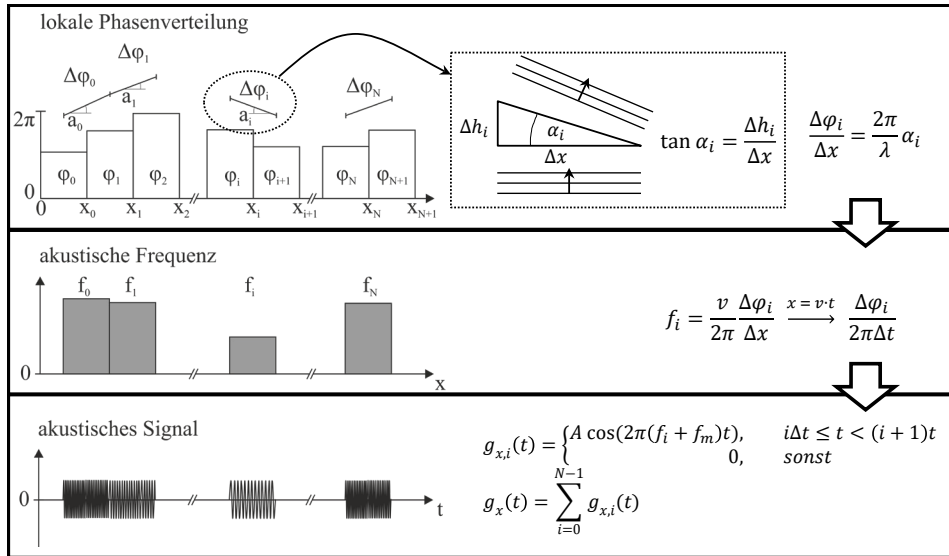


Bild 21: Zusammenhang von optischer Phasenverteilung und akustischer Frequenz

Der lokale Ablenkwinkel  $\alpha_i$  durch eine Schallwelle im AOD errechnet sich nach Gleichung (20) aus der lokalen Frequenz der Schallwelle  $f_i$  und der Wellenlänge des Lasers  $\lambda$  sowie der Schallgeschwindigkeit  $v$ . Für kleine Winkel ergibt sich mit der Kleinwinkelnäherung die Gleichung (20). [42]

$$\alpha_i = \frac{\lambda}{v} f_i \quad (20)$$

Aus (19) und (20) ergibt sich die Abhängigkeit der lokalen Frequenz der Schallwelle und der Phasenverschiebung durch,

$$f_i = \frac{v}{2\pi} \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta x} \quad (21)$$

und die zeitabhängige Frequenzverteilung mit  $x = v \cdot t$

$$f_i = \frac{\Delta\varphi_i}{2\pi \Delta t} \quad (22)$$

Zuletzt wird das akustische Signal  $g_x(t)$  durch eine Frequenzmodulation (23) berechnet. [75]

$$g_{x,i}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi(f_i + f_m)t), & i\Delta t \leq t < (i+1)t \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$g_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} g_{x,i}(t) \quad (23)$$

Die Amplitude  $A$  erhält den konstanten Wert 1 V.  $t_i = 0$  ist der Zeitpunkt an dem das akustische Signal in die Apertur eintritt und die Füllzeit  $t_f$  bestimmt sich aus der Gleichung (8), zu diesem Zeitpunkt ist die Apertur mit dem akustischen Signal gefüllt.  $f_m$  ist die Mittenfrequenz des akustooptischen Deflektors. Das akustische Signal  $g_x(t)$  wird mit dem Frequenzgenerator wiedergegeben, um die entsprechende Phasenverteilung  $\varphi(x)$  am AOD darzustellen. Die Diskretisierung der Phasenverteilung in  $\varphi_i$  bzw. der Apertur in  $x$  wird von der Auflösung des Systems bestimmt mit  $N = 1,64 \cdot \frac{d \cdot \omega}{v}$ . Dabei sind  $d$  der Durchmesser der Apertur,  $\omega$  die Bandbreite des akustischen Frequenzspektrums und  $v$  die Schallgeschwindigkeit.

Da die zweidimensionale akustooptische Strahlformung eine Kombination zweier eindimensionaler orthogonaler Strahlformer darstellt, ist die zweidimensionale Phasenverteilung  $\varphi(x, y) = \varphi(x) + \varphi(y)$  eine unabhängige Überlagerung der Phasenverteilungen der beiden Achsen. Durch die Unabhängigkeit beider Achsen ergibt sich eine Einschränkung der akustooptischen Strahlformung, sodass keine Phasenverteilungen mit Terme aus Produkten, wie zum Beispiel  $\varphi(x, y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y)$ , dargestellt werden können. Dies ist eine Einschränkung die bei der AOS besteht, im Gegensatz zu anderen Strahlformern, wie dem LCoS-SLM. Diese Einschränkung könnte gelöst werden, indem weiter AODs zusätzliche Achsen zur Strahlformung einführen, vgl. [57]. Dadurch entstehen aber auch große Verluste bei der Effizienz, die aus Materialbearbeitungssicht kaum akzeptabel wären. Im Folgenden wird diese Einschränkung bei der Aberrationskorrektur weiter betrachtet.

## 5.2 Strahlformung zur Aberrationskorrektur

Dieses Ziel der Strahlformung verfolgt die Einführung und Kompensation von Aberrationen in optischen Systemen, um das kleinste mögliche Fokusvolumen und damit die höchste mögliche Intensität zu erzeugen. Dabei findet meistens eine Beschreibung der Phasenverteilung über sogenannte Zernike-Polynome statt. Die häufigsten Anwendungsgebiete

dieser Strahlformung sind in der Astronomie und in der Ophthalmologie zu finden. In der Lasermaterialbearbeitung finden sich Anwendungen vor allem bei der Innenstrukturierung transparenter Materialien.

Eine Korrektur der Aberrationen niedriger Zernike-Polynome mit einem zweiachsigen AOD ist, wie bereits von Bechtold et al. [37] vorhergesagt und von Akemann et al. [58] bestätigt und experimentell nachgewiesen, nicht ohne den Verbleib von Resttermen möglich, die aus oben genannter Gegebenheit entstehen und zu einem resultierenden Fehler führen. Die Formung niedriger Zernike-Polynome und die dabei verbleibenden Restterme sind im Anhang e zusammengefasst. Zwar ist bereits bekannt, dass eine vollständige Korrektur mit weiteren akustooptischen Achsen möglich ist, diese Lösung ist aber wegen einer Effizienz von ca. 60-80% je Achse für die Lasermaterialbearbeitung von untergeordnetem Interesse.

Da diese Art der Strahlformung nicht ortsinvariant ist, ist eine Synchronisation der Schallwelle mit den Laserpulsen notwendig. Ein synchrones System zeichnet sich dadurch aus, dass die Phasenverteilung zentral mit dem gaußförmigen Intensitätsprofil des Laserstrahls überlagert ist. Für eine falsch gewählte Verzögerungszeit ergibt sich ein diagonaler Versatz des Zentrums der Phasenverteilung, vgl. Bild 22. Hier wurde der Defokus-Term, der sich aus o. g. Gründen fehlerfrei darstellen lässt, geformt und die Verzögerungszeit um  $3 \mu\text{s}$  verlängert.

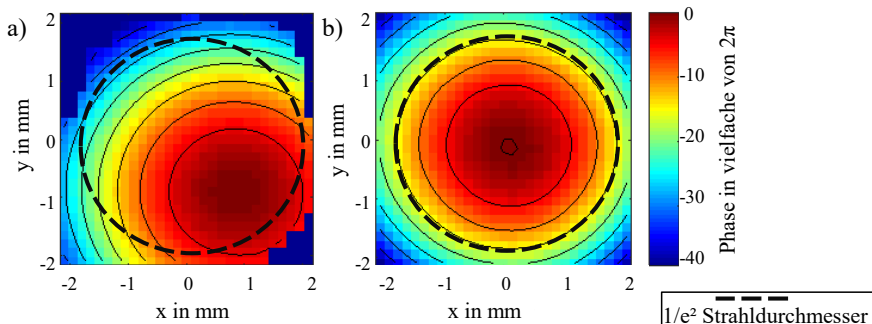


Bild 22: Messung der Phasenverteilung mit a) einer verschobenen und b) einer ideal eingestellten Synchronisation

Dies bedeutet zugleich, dass eine solche Strahlformung nur mit gepulster Strahlung eingesetzt werden kann, da hier die Propagation der Schallwelle während der Pulsdauer vernachlässigt werden kann. Für längere Pulsdauern ergibt sich eine Verschmierung  $V$ , die sich in Abhängigkeit der

Schallgeschwindigkeit  $v$ , der Aperturgröße  $d$  und der Pulsdauer  $\tau_p$  nach Gleichung (24) berechnet.

$$V = \frac{v \cdot \tau_p}{d} \quad (24)$$

Für Pulsdauern kleiner 100 ps resultiert für alle bekannten AODs eine Verschmierung von weniger als 0,1%. Für den Betrieb mit längeren Pulsen oder kontinuierlicher Laserstrahlung bedeutet diese Verschmierung aber auch, dass ein wie in Bild 22 gezeigter Defokus-Term, welcher der Funktion einer sphärischen Linse entspricht, während der Laserwirkdauer diagonal verschoben wird. Dies zeigt sich in einer diagonalen Ablenkung des Fokus. Der Einsatz von akustooptischer Strahlformung zur Aberrationskorrektur ist somit nur mit Ultrakurzpulslasern möglich.

### 5.3 Strahlformung zur flächigen Intensitätsverteilung

Die Modifizierung der räumlichen Intensitätsverteilung in der Bearbeitungsebene ist für die Lasermaterialbearbeitung von größerer Bedeutung. So wird nicht nur in der Mikrostrukturierung mit angepassten Intensitätsverteilungen [76] gearbeitet, sondern auch auf dem Gebiet der Multi-kW Laseranwendungen am Einsatz strahlformender Elemente geforscht [29]. Für die Berechnung der notwendigen akustischen Signale existieren zwei Ansätze, die im Folgenden beschrieben werden: zunächst der Frequenzüberlagerungsalgorithmus (CBA, engl.: composited beam approach), der für den eindimensionalen Fall von Trypogeorgos et al. [39] vorgestellt wurde und hier für die flächige Anwendung erweitert und untersucht wird, und dann der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Iterative-Fourier-Transformations-Algorithmus (IFTA).

#### 5.3.1 Überlagerung harmonischer Wellen (CBA)

Beim CBA wird eine gewünschte Zielverteilung erreicht, indem einzelne Gaußverteilungen nebeneinander gereiht werden. Die Zielverteilung wird hierbei durch die Summe der einzelnen Teilstrahlen, die im Zielbereich die gewünschte Intensitätsverteilung  $I_{xy}$  bilden, nach Gleichung (25) zusammengesetzt.

$$I_{xy} = FFT \left( \sum_x A_x \cdot e^{i \frac{2\pi}{v} \cdot d \cdot f_x} \cdot \sum_y A_y \cdot e^{i \frac{2\pi}{v} \cdot d \cdot f_y} \right) \quad (25)$$

Dies bedeutet für die Berechnung des akustischen Signals, dass eine zweidimensionale Zielverteilung durch eine Projektion auf eine Dimension reduziert wird, um für die x- und y-Richtung jeweils eine eindimensionale Verteilung zu erhalten. Im Anhang d ist der mathematische Beweis zu finden, der zeigt, dass die Projektion der zweidimensionalen Intensitätsverteilung der Faltung in der AOS entspricht. Die Diskretisierung der Verteilung und damit die Anzahl an Amplituden  $A_x$  und der Frequenzen der Schallwelle  $f_x$ , die einen Teilstrahl beschreiben, bestimmt die Auflösung der Zielverteilung. Die Diskretisierung ist so zu wählen, dass aus einzelnen Gaußverteilungen eine homogene Intensitätsverteilung in der Bearbeitungsebene entsteht. Dies entspricht dem Sparrow-Kriterium, welches dann erfüllt ist, wenn der Abstand  $a$  benachbarter Gaußverteilungen dem 0,527 fachen des Fokusdurchmessers  $w$  bei  $1/e^2$  entspricht [39]. Wie schon im Abschnitt 2.4.2 beschrieben, treten bei der Anwendung mit ultrakurzen Laserpulsen Interferenzerscheinungen in Form von Speckle auf, wodurch keine Diskretisierung zu finden ist, mit der homogene Intensitätsverteilungen erreicht werden können. Bei einer Diskretisierung mit  $a > 2w$  ist der Abstand benachbarter Gaußverteilungen zwar hinreichend groß, sodass keine Interferenzen mehr auftreten. Eine homogene Intensitätsverteilung kann so jedoch auch nicht erreicht werden, da sich die einzelnen Gaußverteilungen nicht mehr überlagern. Daher müssen die auftretenden Interferenzerscheinungen akzeptiert werden.

Das akustische Signal  $g_x(t)$  wird durch eine Überlagerung der einzelnen diskreten Frequenzen  $f_x$  und der dazugehörigen Amplitude  $A_x$  nach Gleichung (26) zusammengesetzt.

$$g_x(t) = \sum_x A_x \sin(2\pi \cdot f_x \cdot t) \quad (26)$$

Die Zeitsignale  $g(t)$  besitzen die identische Startphase und sind somit phasengekoppelt wodurch Schwebungen auftreten, die zu einer starken Überhöhung der Amplitude führen. Diese Schwebungen sind zu vermeiden, da die Elektronik so Schäden erleiden könnte oder durch Übersteuern (clipping) der Signale eine Verringerung der akustischen Leistung des Systems folgt. Dies resultiert in einer Reduzierung der Effizienz der Strahlformung. Daher ist für jede Frequenz eine zufällige Startphase ( $random \cdot 2\pi$ ) einzuführen:

$$g_x(t) = \sum_x A_x \sin(2\pi \cdot f_x \cdot t + random \cdot 2\pi) \quad (27)$$

Durch diese zufällige Startphase werden Schwebungen vermieden oder zumindest so gering wie möglich gehalten, und gleichzeitig werden bei jeder neuen Berechnung einzigartige akustische Signale erzeugt, die bei sonst unveränderten Startbedingungen zur selben Strahlform mit unterschiedlicher Ausprägung der Interferenz führen. Im Späteren wird dies als alternative Phasenverteilungen bezeichnet.

Als Beispiel für die Funktionsweise des CBA ist in Bild 23 eine Zielverteilung in acht mal acht Werte diskretisiert. Bei dieser binären Verteilung entspricht die Amplitude  $A$  der mit „x“ markierten Felder jeweils dem Wert 1. Für alle anderen ist die Amplitude auf 0 zu setzen. Diese Zielverteilung wird dann erreicht, wenn das akustische Signal  $g_y(t)$  für die Ablenkung in  $y$ -Richtung aus den Frequenzen  $f_{y4}$ ,  $f_{y5}$  und  $f_{y6}$  zusammengesetzt wird.

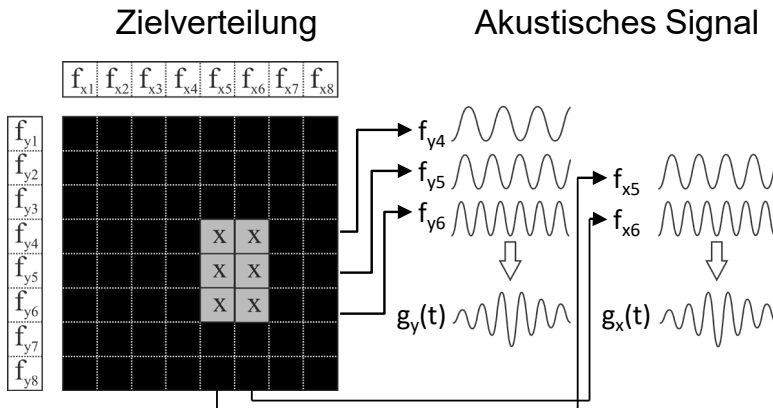


Bild 23: Schematische Darstellung des CBA und Auftreten von Schwebungen bei der Frequenzaddition

### 5.3.2 Berechnung der räumlichen Phasenverteilung (IFTA)

Eine bessere Möglichkeit, die akustischen Signale für die akustooptische Strahlformung aus einer Zielintensitätsverteilung zu berechnen, ist im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und für die Strahlformung mit dieser Technologie in der Lasermaterialbearbeitung untersucht worden [A5]. Die Vorteile dieses Algorithmus liegen in einem effizienteren Signalverlauf, wodurch eine höhere resultierende Leistung des akustischen Signals erreicht wird und damit eine höhere Beugungseffizienz der AOS. Dieser Algorithmus basiert auf der Bestimmung der Phasenverteilung durch

einen Iterativen-Fourier-Transformations-Algorithmus. Ein Blockschaltbild dieses Algorithmus ist in Bild 24 dargestellt.

Für die Berechnung stehen dabei zwei mögliche Routen zur Verfügung. So kann, ausgegangen von einer Zielintensität  $I_{xy}$ , diskretisiert mit der Auflösung des Systems, lediglich die notwendige Phasenverteilung in der Fourierebene iterativ bestimmt und in einem finalen Schritt das akustische Signal daraus berechnet werden. Diese Route ist performanter, kann aber den Einfluss vom Verstärkungsverhalten der Hardware nicht berücksichtigen. Dies ist nur möglich, wenn in jedem Iterationsschritt die lokalen Frequenzen der Schallwelle  $f_i$  berechnet werden. Nur dann können die hardwarebedingten Eigenschaften bei der iterativen Bestimmung berücksichtigt werden.

Die zweite Route sieht daher die Berechnung der Zeitsignale  $g(t)$  in jedem Schritt vor. Hier kann die hardware-spezifische Übertragungsfunktion  $A(f_i)$  berücksichtigt werden. Die mathematischen Zusammenhänge für eine solche Berechnung der akustischen Signale werden im Folgenden erklärt.

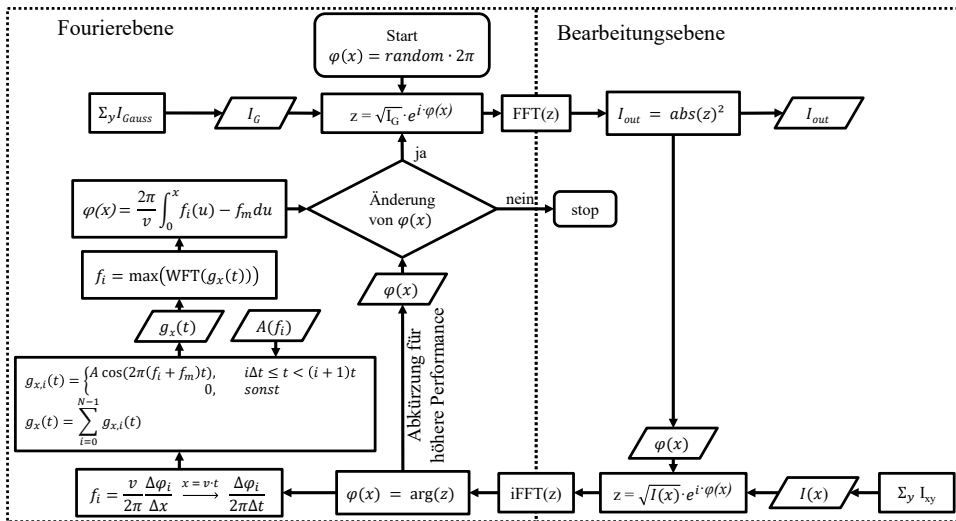


Bild 24: Blockschaltbild des Iterativen-Fourier-Transformations-Algorithmus zur Berechnung der akustischen Signale

Auch hier wird eine zweidimensionale Intensitätsverteilung in die beiden Hauptachsen projiziert  $I(x) = \sum_y I_{xy}$  und für jede Achse separat die lokale Phasenverteilung  $\varphi(x)$  bestimmt. Die Berechnung der Phasenverteilung folgt dann dem Vorbild des gängigen Phasenbestimmungsalgorithmus

nach Gerchberg und Saxton [77], der iterativ zwischen Fourierebene und Bearbeitungsebene durch eine Fourier-Transformation (FFT) wechselt. Bei jedem Übergang von Fourierebene nach Bearbeitungsebene wird die Amplitudenverteilung des Laserstrahls  $\sqrt{I_G}$  ersetzt und beim Übergang von Bearbeitungsebene zu Fourierebene wird die Zielverteilung  $\sqrt{I(x)}$  verwendet. Die Phaseninformation bleibt erhalten und wird so bei jedem Übergang von Bearbeitungsebene zu Fourierebene näher an die optimale Phasenverteilung gebracht, mit der die Intensitätsverteilung  $I_G$  in der Fourierebene in die Zielverteilung  $I(x)$  in der Bearbeitungsebene umgeformt werden kann. Mit der Phasenverteilung in der Fourierebene werden nach Gleichung (21) die lokalen akustischen Frequenzen  $f_i$  bestimmt und daraus wiederum wird nach Gleichung (23) das akustische Zeitsignal  $g_x(t)$  berechnet. In der Rückwärtsrechnung werden die lokalen Frequenzen des akustischen Zeitsignals durch eine Kurzzeit-Fourier-Transformation (WFT) bestimmt. Dafür wird vom Zeitsignal für jeden Punkt der Auflösung des Systems  $i$  ein Bereich, der  $N$  groß ist, gewählt  $g_x(t_{i-N/2}: t_{i+N/2})$  und daraus nach einer WFT die vorherrschende Frequenz bestimmt, siehe Gleichung (28). Die Größe des Bereichs  $N$  wird durch die niedrigste Frequenz bestimmt, sodass mindestens eine Periode im Zeitsignal analysiert wird.

$$f_i = \max(\text{WFT}(g_x(t))) \quad (28)$$

Die Berechnung der Phasenverteilung aus den lokalen Frequenzen folgt der Gleichung (29).

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{v} \int_0^x (f_i(u) - f_m) du \quad (29)$$

Dabei wird die Phase am Ort  $x$  durch die Bestimmung des Integrals über  $(f_i(u) - f_m)$  von Null bis zum Ort  $x$  berechnet.

Der Startpunkt des IFTA befindet sich in der Fourierebene. Als Intensitätsverteilung liegt hier eine Gaußverteilung vor und die initiale Phasenverteilung entspricht einer zufälligen Verteilung mit Werten zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$ . Da es keine eindeutige Lösung für die Phasenverteilung gibt und ein nahezu unendlicher Lösungsraum existiert, kann mit einer Zielverteilung eine beliebige Anzahl an alternativen Phasenverteilungen berechnet werden. Diese Phasenverteilungen unterscheiden sich lediglich in der bei dieser Art der Strahlformung auftretenden Interferenzerscheinung in Form von Speckle, aber nicht in der geometrischen Form der Zielverteilung.

lung. Es wird festgelegt, dass die Iteration abgebrochen wird, wenn über 10 Schritte die Änderung der Phasenverteilung zum jeweils vorangegangenen Schritt kleiner als 1% ist.

Der größte Vorteil dieser Berechnungsmethode akustischer Signale besteht in der Verwendung von kontinuierlichen Frequenzspektren und dem daraus resultierenden Amplitudenverlauf der Zeitsignale. Dadurch, dass eine Frequenzmodulation vorliegt, pendelt die Amplitude solcher Signale immer zwischen dem minimalen und maximalen Wert (von -1 V bis +1 V). Keine Schwebungen sind dabei zu beobachten und ein solches Signal hat ausreichend Leistung, um verstärkt zu werden, ohne dass Übersteuern auftritt. In Bild 25 sind Ausschnitte der Zeitsignale und die spektralen Komponenten aus IFTA und CBA für ein eindimensionales Profil einer Linie gegenübergestellt.

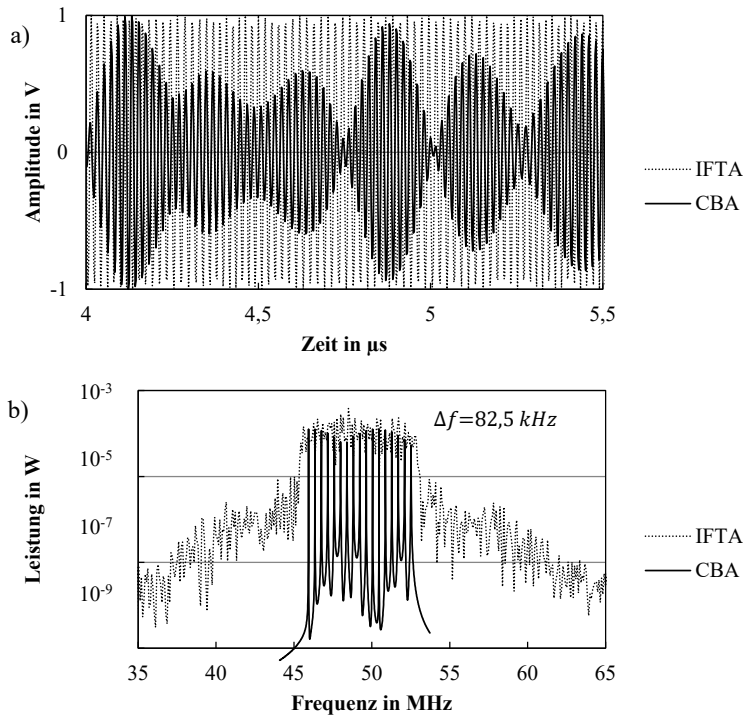


Bild 25: a) 6  $\mu\text{s}$  langer Ausschnitt eines akustischen Signals aus IFTA und CBA (Periodenlänge: 2,5  $\mu\text{s}$ ) und b) spektrale Leistung beider Signale mit einer Abtastung von  $\Delta f = 82,5 \text{ kHz}$

Für beide Signale, die zur identischen Zielverteilung führen, resultiert jeweils ein maximaler Pegel von 1 V. Die dabei auftretende Leistung<sup>2</sup> unterscheidet sich jedoch um den Faktor 5 (IFTA:  $P = U_{eff}^2/Z = 0,01 W$  und CBA:  $P = 0,002 W$ ).

Da an jedem Ort der Apertur alle Frequenzen mit derselben Leistung vorhanden sind, gilt für beide Signale, dass diese eine ortsinvariante Strahlformung ermöglichen, d.h. dass die Position der Phasenverteilung und damit die der Schallwelle relativ zum Laserstrahl keinen Einfluss auf die geometrische Form des zu erwartenden Strahlprofils zeigt. Dies hat im Gegensatz zur Strahlformung bei der Aberrationskorrektur den Vorteil, dass eine Verschiebung des akustischen Signals relativ zum Laserstrahl keinen Einfluss auf die zu erreichende Intensitätsverteilung hat. Das bedeutet wiederum, dass diese Art der Strahlformung mit gepulsten und kontinuierlich betriebenen Lasern eingesetzt werden kann.

## 5.4 Simulation der Intensitätsprofile und des Abtrags

Für die Vorhersage der Ergebnisse und die theoretische Überprüfung können die Intensitätsverteilungen und der Lasermaterialabtrag, mit der im Folgenden erklärt, Simulation beschrieben werden. Da die Simulation von den akustischen Signalen ausgeht, die am AOS wiedergegeben werden können, kann damit zum Beispiel der Einfluss einer schlechten Synchronisation, der Einfluss der Überlagerung alternativer Signale und solcher mit unterschiedlicher Intensitätsverteilung oder der Einfluss von unterschiedlichen Strahldurchmessern am AOS beschrieben werden. Die Berechnung von einer Bestrahlung mit kontinuierlichen Lasern ist dabei nicht vorgesehen. Diese kann aber durch Überlagern vieler Profile aus einem schrittweise propagierten akustischen Signal geschehen. Die Simulation folgt dem in Bild 26 dargestellten Blockschaltbild.

Ausgehend von den akustischen Signalen werden für jede Achsenrichtung die lokalen Frequenzen  $f_i(x), f_i(y)$  nach Gleichung (28) bestimmt und daraus ergeben sich die lokalen Phasenverschiebungen  $\varphi(x), \varphi(y)$  nach Gleichung (29). Die Mittelfrequenz  $f_m$  wird hier nicht abgezogen, damit diese für die Betrachtung der Dispersion berücksichtigt bleibt. Durch eine Fourier-Transformation wird das komplexe elektromagnetische Feld aus der gaußförmigen Intensitätsverteilung und der zweidimensionalen Phasenverteilung  $\varphi(x, y)$ , welche aus der Summe der Phase der x-Achse  $\varphi(x)$

---

<sup>2</sup> Der Betrag der Impedanz  $Z$  ist typischerweise  $50 \Omega$

und der Phase der  $y$ -Achse  $\varphi(y)$  gebildet wird, in die Bearbeitungsebene propagiert. Aus dem Betragsquadrat des in die Bearbeitungsebene transformierten komplexen Feldes ergibt sich dann die Intensitätsverteilung  $I_{out}$ .

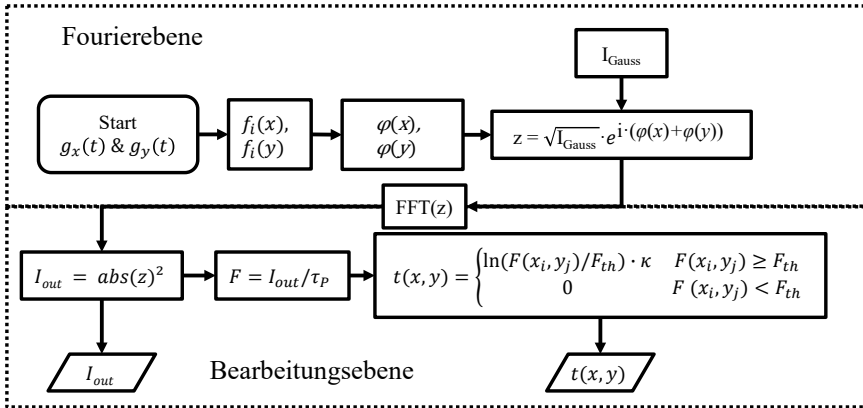


Bild 26: Blockschaltbild für die Simulation der Intensitätsverteilung und des Abtrags

Zur Berücksichtigung der Dispersion, die an der Beugung an einem Gitter auftritt, werden für diskrete Wellenlängen des Spektrums der elektromagnetischen Welle die Intensitätsverteilungen bestimmt. Diese werden dann durch eine gewichtete Überlagerung nach deren spektraler Verteilung zusammengefasst. Zur  $n$ -fachen Erhöhung der Auflösung, damit auch Interferenzen wie Speckle in der Intensitätsverteilung der Bearbeitungsebene dargestellt werden, wird das komplexe Feld in der Fourierebene durch das Anhängen von Nullen symmetrisch um den Faktor  $n$  vergrößert. Im realen System entspricht diese Vergrößerung des Raumes in der Fourierebene der mathematischen Abbildung der optischen Apertur. Eine Apodisation ist daher nicht notwendig. Mit der daraus errechneten Intensitätsverteilung und der Pulsdauer  $\tau_P$  wird die Verteilung der Fluenz  $F$  bestimmt. Die Tiefe des Abtrags  $t(x, y)$  wird dann durch den logarithmischen Abtrag [78] an den Orten, an denen eine kritische Fluenz  $F_{th}$  überschritten wird, bestimmt.  $\kappa$  ist dabei die Energieeindringtiefe. Die akkumulierte Intensität sowie die Tiefe des Abtrags ergeben sich aus der additiven Überlagerung der Einzelverteilungen. Der nun folgende Abschnitt befasst sich detaillierter mit der Synchronisation eines akustooptischen Strahlformers und der Strahlformung mit kontinuierlichen Lasern.

## 5.5 Synchronisierung des Systems und Strahlformung mit cw-Lasern

Da die Ausbreitung des Schalls wesentlich langsamer ist als die des Lichtes und es sich bei ultrakurzgepulsten Lasersystemen um sogenannte Masteroszillatoren handelt, die in einem resonanten Betriebsmodus sind und sich typischerweise nicht leicht synchronisieren lassen, kann der AOS nur über den vorangegangenen Laserpuls synchronisiert werden. Das System wird also von einem Laserpuls aktiviert und beginnt nach einer Wartezeit mit der Wiedergabe des elektrischen Signals, sodass die Schallwelle die Apertur des AOS gerade gefüllt hat, wenn der folgende Laserpuls diese erreicht. Dieser Puls wiederum aktiviert das System für den darauffolgenden Puls. Die Synchronisation auf den vorangegangenen Puls führt dazu, dass der erste Puls einer jeden Pulsfolge nicht zur Lasermaterialbearbeitung beitragen kann und damit immer ein Initialpuls notwendig ist. Des Weiteren darf sich der zeitliche Puls-zu-Puls-Abstand<sup>3</sup> nicht ändern, wenn die jeweilige berechnete Phasenverteilung durch das propagierende Gitter nicht ortsinvariant ist. Das verwendete System weist eine Abweichung vom Puls-zu-Puls-Abstand von 58,4 ns auf<sup>4</sup>, was bei ortsvarianten Signalen zu einer Verschmierung von 0,5% führt. Im Experimentalsystem hat die Unsicherheit des zeitlichen Puls-zu-Puls-Abstands keine Relevanz und kann daher vernachlässigt werden. Durch die Ortsinvarianz bei der Strahlformung zur flächigen Intensitätsverteilung ist die exakte Lage der Schallwelle während des Laserpulsdurchgangs von untergeordneter Rolle; es muss lediglich sichergestellt werden, dass die Schallwelle die Apertur ausfüllt.

Für den Wechsel von Intensitätsverteilungen oder bei der Strahlformung für die Aberrationskorrektur ist die exakte Einstellung der Verzögerungszeit notwendig, da andernfalls eine Vermischung von Intensitätsverteilungen oder eine Verschiebung der zu korrigierenden Aberrationen auftreten, siehe Bild 22 und Bild 28. Die Bestimmung der Verzögerungszeit erfolgt dabei nach einer neu entwickelten Methode: Für jede Achse des AOS wird subsequent eine harmonische Schallwelle mit genau der Länge wiedergegeben, die dem Aperturdurchmesser entspricht, während die Leistung der dadurch abgelenkten Laserstrahlung bestimmt wird. Für jede Messung wird die Verzögerungszeit am Pulsgenerator angepasst. Für die

---

<sup>3</sup> Auch als Timing Jitter bekannt

<sup>4</sup> Messgerät: Lecroy Wavesurfer 454 + Photodiode Thorlabs FDS010, Mittelung über 10.000 Pulse

Leistung in Abhängigkeit der Verzögerungszeit  $Sz$  ergibt sich dabei der in Bild 27b dargestellte Verlauf.

Je mehr Leistung durch die Schallwelle abgelenkt wird, desto größer ist der Anteil der Überlagerung, bis die Leistung wieder sinkt und Schallwelle und Laserstrahl sich immer weniger überlagern. Das Plateau im Bereich von  $2,8 \mu\text{s}$  bis  $4,0 \mu\text{s}$  zeigt an, dass der Laserstrahl einen kleineren Durchmesser als die Apertur besitzt, da in diesem Bereich die abgelenkte Leistung konstant bleibt, obwohl das Beugungsgitter verschoben wird.

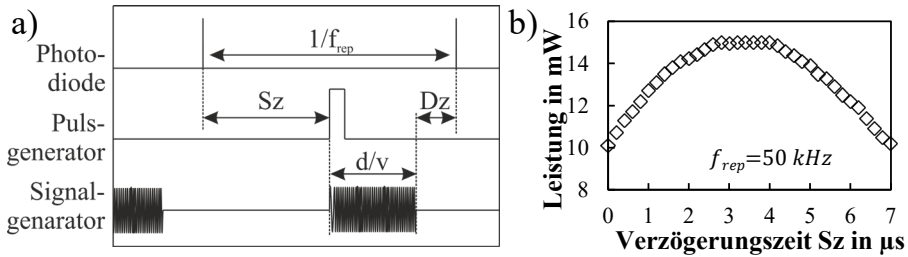


Bild 27: a) Zeitliche Beziehungen der Systemzeiten im AOS und b) Bestimmung der Verzögerungszeit

Unter der Annahme eines gaußförmigen und damit symmetrischen Laserstrahls überlagert die Schallwelle mit dem Laserstrahl mittig bei  $3,4 \mu\text{s}$ . Der so ermittelte Wert entspricht einer idealen Verzögerungszeit. Da der Signalgenerator nach jeder Signalwiedergabe für ein erneutes Auslösen vorbereitet wird, ergibt sich eine systemspezifische Reaktionszeit<sup>5</sup>  $Dz$  die zu einer Reduzierung der theoretisch möglichen Pulswiederholrate führt. Aus dem Zusammenhang (30) ergibt sich dann für das im Abschnitt 4.3 beschriebene Experimentalsystem die systemspezifische Reaktionszeit  $Dz$  mit einem Wert von  $4,5 \mu\text{s}$ . Mit dieser Zeit kann die Verzögerungszeit dieses Systems für andere Pulswiederholraten bestimmt werden. Für das Experimentalsystem verringert sich somit die maximal anwendbare Pulswiederholrate  $f_{rep}$  für einen synchronisierten Betrieb von  $82,5 \text{ kHz}$  auf  $60,1 \text{ kHz}$ .

$$\frac{1}{f_{rep}} = \frac{d}{v} + Sz + Dz \quad (30)$$

Mit der Sicherstellung, dass die Schallwelle und ein Laserpuls in der Apertur des AOS überlagern, kann eine pulswise Wellenfrontkorrektur

<sup>5</sup> Häufig auch als Totzeit bezeichnet

oder eine Strahlformung zur flächigen Intensitätsverteilung mit einer gepulsten Strahlquelle erreicht werden. Beim Betrieb mit einem kontinuierlichen Laser, der nur mit den ortsinvarianten Signalen aus IFTA oder CBA möglich ist, ist Folgendes zu beachten: Zum Erreichen einer gewünschten Intensitätsverteilung können eine oder mehrere alternative Phasenverteilungen mit derselben Geometrie der Intensitätsverteilung kontinuierlich und ununterbrochen im AOS wiedergegeben werden. Dies ist durch die bereits genannte Ortsinvarianz möglich. Soll aber ein Wechsel von einer zu einer anderen Intensitätsverteilung durchgeführt werden, so muss das akustische Signal für die vorangegangene Intensitätsverteilung die Apertur des AOS erst verlassen haben bevor die neue Intensitätsverteilung aktiviert werden kann. Ohne Einhaltung einer solchen Pause kommt es zu der in Bild 28b dargestellten Vermischung beider Intensitätsverteilung durch die Überlagerung der neuen und der vorangegangenen Schallwelle.

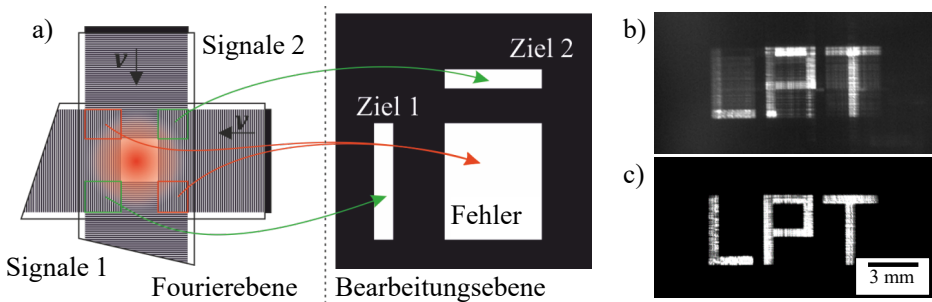


Bild 28: a) Überlagerung der Zielverteilungen bei der cw-Strahlformung und b) Formung der Buchstaben „LPT“ mit einem Laserpointer aus 7 akustischen Signalen ohne und c) mit Pausen

Daher wird bei kontinuierlichen Lasern, die keine binäre Leistungsmodulation im kHz-Takt zulassen, die Einführung von Pausen in Form von Leersignalen mit einer Dauer von  $t = d/v$  zur Vermeidung der Überlagerungen vorgeschlagen. Dabei wird beim Wechsel von einer Intensitätsverteilung auf die nächste die Leistung in den Intensitätsverteilungen jeweils gedimmt. D. h. während die Schallwelle die Apertur verlässt bzw. die leere Apertur mit einer neuen Schallwelle gefüllt wird, nimmt die Leistung  $P(t)$  in der Intensitätsverteilung mit der quadratischen Fehlerfunktion nach Gleichung (31) ab bzw. zu. Dieser Zusammenhang ist von der Knife-Edge-Methode [79] abgeleitet. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  tritt eine neue Schallwelle bzw. das Ende einer Schallwelle in die Apertur ein, die vom Laserstrahl gefüllt ist.

$$\begin{aligned}
 P_{ab}(t) &= P_{max}(1 - \operatorname{erf}(\sqrt{2}t \cdot f_u))^2 \text{ bzw.} \\
 P_{zu}(t) &= P_{max}(\operatorname{erf}(\sqrt{2}t \cdot f_u))^2
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Die Einführung von Pausen durch eine binäre Leistungsmodulation der Laserstrahlquelle ist jedoch stets zu bevorzugen, da dadurch das Dimmen und die Vermischung vermieden werden können und so auch die Dauer für das Umschalten, da keine Leersignale notwendig sind, halbiert ist. Analog zu diesem Ansatz ist mit dem AOS auch ein Betrieb mit gepulsten Laserstrahlquellen möglich, die eine höhere Pulswiederholrate  $f_{rep}$  als die Umschaltrate  $f_U$  des AOS aufweisen. Ein pulsweiser Wechsel der Intensitätsverteilung ist dann aber nicht mehr möglich.

Wie hier im 5. Kapitel dieser Arbeit gezeigt wurde, ist *eine Strahlformung von gepulsten und kontinuierlich emittierenden Lasern möglich, trotz der mit Schallgeschwindigkeit propagierenden Wellenfrontmanipulation*. Die Strahlformung für die Aberrationskorrektur ist zwar nur mit gepulsten Lasern möglich. Trotzdem gilt die 3. Hypothese als vollständig belegt, da bei der Strahlformung zur flächigen Intensitätsverteilung, die für die Lasermaterialbearbeitung die bedeutendere von beiden ist, sowohl gepulste als auch kontinuierliche Strahlquellen eingesetzt werden können.

## 6 Effizienz der akustooptischen Strahlformung

Es werden hier zwei Arten der Effizienz unterschieden. Zuerst wird die winkelabhängige Beugungseffizienz besprochen und drei Methoden, diese zu bestimmen, aufgezeigt. Aus dieser Beugungseffizienzverteilung und den für die Strahlformung zu erreichenden Ablenkwinkeln kann die Lichteffizienz des AOS bestimmt werden. Diese drückt aus, welcher Anteil, der auf den AOS eingestrahlt Leistung in die Zielverteilung gelenkt wird. Zum Abschluss dieses Kapitels wird der zeitliche Anteil der für eine Strukturierung genutzten Leistung berücksichtigt und damit eine Gesamteffizienz für die Lasermaterialbearbeitung formuliert und diese mit anderen Systemen verglichen.

### 6.1 Bestimmung der winkelabhängigen Beugungseffizienz

Die Kenntnis der Effizienz in Abhängigkeit des Ablenkwinkels ist essenziell für eine homogene Bestrahlung einer Fläche. Diese Abhängigkeit ergibt sich aus der für akustooptische Deflektoren typischen Bragg-Bedingung, die nur in einem Punkt bzw. in einem gewissen Bereich erfüllt ist. Die Grundlagen hierfür sind im Abschnitt 2.3 vorgestellt worden. Für die Beschreibung der winkelabhängigen Beugungseffizienz wird in der Regel eine diagonale Ablenkung betrachtet, bei der beide Achsen mit identischen Frequenzen der Schallwelle betrieben werden, siehe [63]. Eine homogene Verteilung der Energie kann damit jedoch nicht erreicht werden, da die tatsächliche zweidimensionale Verteilung nicht symmetrisch ist. Daher ist die Kenntnis der Effizienz des kompletten zweidimensionalen Feldes notwendig.

#### 1. Sequenzielle Messung aller 2D-Frequenzkombinationen

Die Effizienz des kompletten zweidimensionalen Feldes wird bisher nur mit einer sequenziellen Messung aller Frequenzkombinationen aus beiden Achsrichtungen bestimmt. Für eine derartige Beschreibung gilt, dass für jede Frequenzkombination die Leistung in der 1.iten Ordnung gemessen und mit der eingestrahlt in Relation gesetzt wird. Für eine Aufteilung des Arbeitsbereichs, der durch die Bandbreite<sup>6</sup>  $\omega$  begrenzt wird, in  $N$

---

<sup>6</sup> Die Bandbreite ist der Frequenzbereich, für den die Effizienz der Ablenkung nicht unter 3 dB sinkt, bezogen auf die maximal erreichbare Effizienz.

Frequenzen in die erste Achsrichtung und  $M$  Frequenzen in die zweite Achsrichtung ergeben sich  $N \cdot M$  Messpunkte. Eine große Anzahl an Messpunkten macht die Messung zeitaufwändig und, da das Ergebnis stark von der Ausrichtung des Laserstrahls abhängt, ist diese Methode für den Einsatz beim Justieren nicht praktikabel. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten für die Erfassung der winkelabhängigen Beugungseffizienz vorgestellt, die ein Echtzeit-Feedback liefern.

### 2. Parallele Erfassung der Beugungseffizienz

Die hohe Datenübertragungsrate der Akustooptik erlaubt es alle  $N \cdot M$  Messpunkte in einer Zeit von  $(N \cdot M)/f_{rep}$  zu erfassen. So können in einer Zeit von 100 ms bei einer Umschaltrate des gegebenen Systems von 60,1 kHz insgesamt 6.010 Messpunkte erfasst werden. Diese können mit einem Kamerasensor simultan aufgenommen werden und damit kann die relative Verteilung bestimmt werden. Die Übertragungsfunktion der Kamera ist linear (vgl. Anhang b) und die Dynamik ausreichend, um die Verteilung der Beugungseffizienz bis über die 3 dB<sup>7</sup>-Grenzen hinaus aufzuzeichnen. Die Belichtungszeit der Kamera ist dabei so zu wählen, dass kein Messpunkt mehrfach belichtet wird. Für eine Kalibrierung der relativen Verteilung muss für mindestens einen Messpunkt die Effizienz bestimmt werden.

### 3. Simultane Messung der Beugungseffizienz

Die zweite Möglichkeit, ein Echtzeit-Feedback über die Verteilung der Beugungseffizienz zu erlangen, ist erst durch die Idee der Strahlformung ermöglicht worden. Dafür werden akustische Signale verwendet, die zu einem Beugungsmuster mit  $N \cdot M$  diskreten Punkten führen. Diese können mit dem IFTA durch eine dementsprechende Zielverteilung oder auch mit dem CBA erzeugt werden. Dadurch, dass dabei alle  $N$  und  $M$  Frequenzen gleichzeitig in der Apertur vorhanden sind, wird ein eintreffender Laserpuls in  $N \cdot M$  Messpunkte gemäß der winkelabhängigen Beugungseffizienz aufgeteilt. Eine umfangreichere Beschreibung dieser Methode ist in Anhang i zu finden. Der Vorteil dieser Methode neben dem Echtzeit-Feedback, das sich aus der schnellen Datenerfassung ergibt, liegt in der gleichzeitigen Erzeugung der Messpunkte. Dadurch ergibt sich durch die Belichtungszeit der Kamera und der Anzahl der Messpunkte keine Abhängigkeit, wodurch diese Methode Fehlern gegenüber robuster wird. Bild 29 zeigt die nach allen drei Methoden bestimmte Verteilung der Beugungseffizienz.

---

<sup>7</sup> Entspricht einen Faktor von 2

Mit dem Wissen über die Verteilung der Beugungseffizienz kann für jede Zielintensitätsverteilung die Lichteffizienz (mittlere Beugungseffizienz) berechnet werden. Typische Werte für die Lichteffizienz konnten mit  $26\% \pm 3\%$  ( $n=5$ ) gemessen werden.

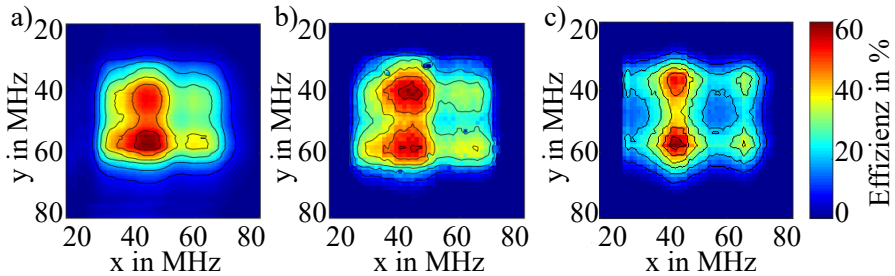


Bild 29: Beugungseffizienz aus a) punktwise Messung von  $100 \times 100$  Messpunkten mit Powermeter (3 Stunden) und b)  $80 \times 80$  Messpunkten simultan mit Kamera erfasst (128 ms) und c) strahlgeformt (3 ms)

Die nach diesen Methoden bestimmte Verteilung der Beugungseffizienz kann mit Hilfe einer Spline-Interpolation übertragen werden, da kein bekannter analytischer Zusammenhang mit der Steuerfrequenz besteht (vgl. Abschnitt 2.3). Nach den folgenden drei Möglichkeiten kann diese Beziehung genutzt werden, um eine homogene Verteilung bzw. Strukturierung zu erreichen. Für alle drei Möglichkeiten gilt dabei, dass durch die Symmetriebedingung aus der subsequenten Strahlformung keine homogene Ausleuchtung des gesamten Arbeitsfelds möglich ist.

Zuerst kann die Zielverteilung dementsprechend angepasst werden, so dass in die Bereiche höherer Effizienz weniger Energie gebeugt wird. Zwar kann damit eine homogene Zielverteilung in kleinen Bereichen erreicht werden, doch führt die lokale Dämpfung zur Reduzierung der Lichteffizienz. Diese Möglichkeit zur Erzeugung homogener Verteilungen ist nur für kleine Zielstrukturen im Vergleich zum Arbeitsbereich praktikabel.

Die zweite Möglichkeit, eine homogene Struktur zu erzeugen, besteht in der Eingrenzung des Arbeitsbereichs. Hierbei wird das optische System dementsprechend ausgelegt, dass die Strahlformung nur in einem Bereich eingesetzt wird, in dem die Beugungseffizienz annähernd konstant ist. Mit diesem Ansatz können unter Ausnutzung der maximalen Beugungseffizienz homogene Strukturen, wie sie im Späteren vorgestellt werden, erzeugt werden. Dabei entstehen lediglich Einbußen in der Datenübertragungsrate nach Abschnitt 2.5, da die Anzahl an auflösbaren Spots redu-

ziert wird. Denn die Randbereiche des Arbeitsbereiches können nicht mehr genutzt werden. Angesichts der zur Verfügung stehenden Strahlquellen stellt dies aktuell keinen bedeutenden Nachteil dar.

Die dritte Möglichkeit kann sowohl ohne Einbußen in der Lichteffizienz als auch ohne Reduzierung der Dynamik umgesetzt werden. Hierbei wird vorgeschlagen, die Prozessführung anzupassen, sodass ineffizientere Bereiche häufiger belichtet werden und damit ein gleichmäßiger Abtrag im gesamten Arbeitsbereich erreicht wird. Durch das für jeden Werkstoff nicht-lineare Verhalten des Abtrags ist hierfür dann eine aufwändige Kalibrierung notwendig.

## 6.2 Einfluss der winkelabhängigen Beugungseffizienz bei der Aberrationskorrektur

Die winkelabhängige Beugungseffizienz beeinflusst auch die Strahlformung für die Korrektur von Aberrationen. So kann nicht nur bei der Ablenkung des Fokus durch den Tip oder Tilt<sup>8</sup> eine winkelabhängige Leistung festgestellt werden, auch beim axialen Verschieben mit dem Defokus, der einer Fokussierung bzw. Defokussierung der Laserstrahlung entspricht, kann der Einfluss der winkelabhängigen Beugungseffizienz deutlich gemessen werden. Da ein Defokus einer linearen Änderung der lokalen Frequenzen der Schallwelle  $f(x)$  entspricht, trägt eine Bandbreite zum akustischen Signal bei und die Effizienz ergibt sich aus dem Mittel der dazugehörigen winkelabhängigen Beugungseffizienzen. Dabei berechnet sich die Brechkraft  $B$  für einen maximal anwendbaren Defokus, bei dem die zur Verfügung stehende Bandbreite  $\omega$  voll ausgenutzt wird, nach Gleichung (32).  $\lambda$  steht für die Wellenlänge des Lasers und  $v \cdot d$  ist das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit und der Apertur des AODs. Die Herleitung dieses Zusammenhangs ist im Anhang f zu finden.

$$B = \frac{\lambda \cdot \omega}{v \cdot d} \quad (32)$$

Für das Experimentalsystem ergibt sich daraus eine maximale Brechkraft von 5,85 dpt, was einer Linse mit einer Brennweite von 170,9 mm entspricht. Die in Bild 30 dargestellten Daten zeigen das Ergebnis aus einer Messung der Leistung im Fokus in Abhängigkeit des Frequenzgradienten. Da die neutrale Ablenkung mit  $B = 0$ , bei der lediglich die Mittenfre-

---

<sup>8</sup> Zweite und dritte Aberration, eine Auflistung der ersten 15 Aberrationen ist im Anhang e zu finden

quenz zum akustischen Signal beiträgt, nicht der effizienteste Arbeitspunkt ist, wird ein Anstieg der Leistung verzeichnet, wenn Frequenzen mit einer höheren Beugungseffizienz zum akustischen Signal beitragen bei  $B \neq 0$ . Sobald das zum Darstellen des Defokus notwendige Spektrum über die Bereiche höchster Effizienz hinausgeht ( $B < -4$  und  $B > 4$ ), nimmt die in den Fokus gebeugte Leistung wieder ab. Dies ist bis über die systemgegebene Bandbreite hinaus zu beobachten.

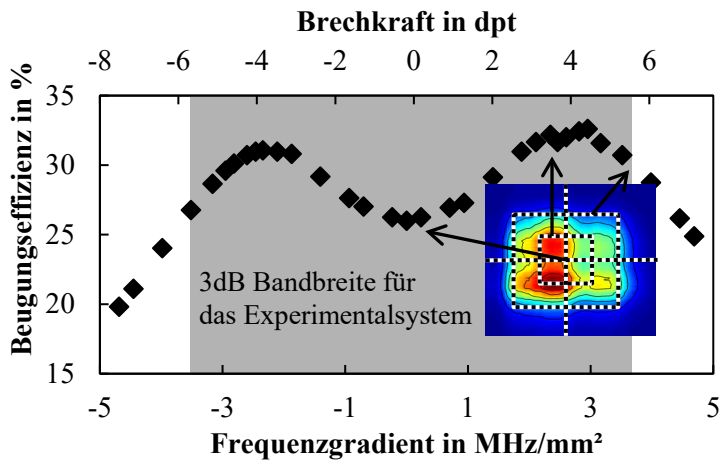


Bild 30: In Abhängigkeit der eingesetzten Bandbreite und der dazugehörigen winkelabhängigen Beugungseffizienz (rechts dargestellt aus Bild 29) ändert sich die Leistung und damit die Effizienz bei der Korrektur von Aberrationen am Beispiel des Defokus.

Theoretisch ist dieses Verhalten symmetrisch, da das Vorzeichen des Defokus lediglich den Verlauf der linearen Frequenzänderung umkehrt. Die Messung der Beugungseffizienz in Bild 30 zeigt jedoch eine Abweichung von der Symmetrie. Diese Abweichung entsteht durch ortsvariante Anteile im Laserstrahl des Experimentalsystems aus verbleibenden Fehlern bei der Justage technischer Systeme. Für diese Art der Strahlformung zeigt sich, dass in Abhängigkeit der Aberration und deren Stärke bzw. der genutzten Bandbreite eine Leistungsmodulation zu beobachten ist. Diese kann verhindert werden, wenn in Abhängigkeit des genutzten Spektrums die Leistung des akustischen Signals und damit die mittlere Beugungseffizienz über die Amplitude  $A$  des akustischen Signals reduziert wird oder die emittierte Leistung des Lasers gesteuert wird.

### 6.3 Gesamteffizienz der akustooptischen Strahlformung im Vergleich mit LCoS-Technologie

Für den produktiven Einsatz der AOS-Technologie ist nicht allein die Beugungseffizienz zu betrachten, sondern auch der Anteil der zeitlich genutzten Energie, die von der Laserstrahlquelle bereitgestellt wird. Daher wird die Gesamteffizienz  $\eta_G$  eingeführt [A7]. Diese ermittelt sich aus der Beugungseffizienz  $\eta_B$  und der Anzahl an genutzten Laserpulsen  $N_g$  über der Anzahl an Laserpulsen, die im selben Zeitraum erzeugt wurden  $N_e$  nach der folgenden Gleichung (33).

$$\eta_G = \eta_B \cdot \frac{N_g}{N_e} \quad (33)$$

Die Bedeutung dieser Gesamteffizienz soll an einem konkreten Beispiel für eine Materialbearbeitung mit Strahlformung erklärt werden. Dafür wird die Gesamteffizienz und auch die Bearbeitungsdauer zur Erzeugung von quadratischen Näpfen für eine AOS und eine LCoS-SLM basierte Lasermaterialbearbeitung in Abhängigkeit der Anzahl an Phasenverteilungen bestimmt. In diesem Fall sind die Parameter wie Repetitionsrate des Lasers  $f_{rep} = 50 \text{ kHz}$  und die Anzahl an Pulsen  $N_g = 1000$  für die Erzeugung der Struktur konstant.

Da bei der AOS-Technologie für jeden Puls das akustische Signal erneuert wird, kann jeder erzeugte Puls für die Materialbearbeitung beitragen. Durch die Synchronisierung des Systems auf den jeweils vorangegangenen Puls gilt für  $N_e = N_g + 1$ . Damit entspricht die Gesamteffizienz bei einer Bearbeitung mit AOS nach Gleichung (34) immer konstant der Beugungseffizienz des Systems.

$$\eta_{G,AOS} = \eta_{B,AOS} \cdot \frac{N_g}{N_g + 1} \approx \eta_{B,AOS} \quad (34)$$

Für die Erzeugung dieser Näpfe mit LCoS-SLM-Technologien wird ein ideales System angenommen, das sich durch eine hohe Beugungseffizienz von  $\eta_{B,LS} = 95\%$  und der schnellsten demonstrierten Umschaltrate  $f_U = 250 \text{ Hz}$  auszeichnet [31]. Für die Gesamteffizienz in Abhängigkeit der Umschaltungen  $N_H$  gilt Gleichung (35). Hier errechnet sich die Anzahl der im selben Zeitraum erzeugten Pulse  $N_e$  aus  $N_H \cdot f_{rep}/f_U$ . Damit kann  $N_H$  Werte im Bereich 1 bis  $N_g$  annehmen.

$$\eta_{G,LS} = \eta_{B,LS} \cdot \frac{N_g \cdot f_U}{f_{rep} \cdot N_H} \quad \text{mit} \quad \eta_{G,LS} \leq \eta_{B,LS} \quad (35)$$

Damit bleibt die einzige Unbekannte die Anzahl an Umschaltungen oder Phasenverteilungen, die bei der flächigen Mikrostrukturierung appliziert werden. Durch die vergleichsweise geringe Umschaltrate von LCoS-SLMs ist ein deutlicher Einbruch ab 4 Umschaltungen in der Gesamteffizienz zu verzeichnen. Sobald mehr als 18 Umschaltungen notwendig sind, zeigt sich die AOS mit der geringeren Beugungseffizienz als die zu bevorzugende Technologie, siehe Bild 31.

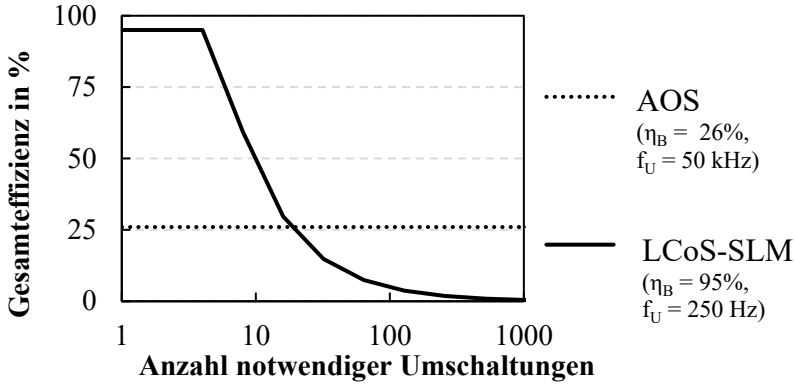


Bild 31: Gesamteffizienz von AOS im Vergleich zu einem idealen LCoS-SLM in Abhängigkeit der notwendigen Umschaltvorgänge

Dasselbe Verhalten zeigt sich auch bei der Betrachtung der Bearbeitungsdauer mit beiden Technologien. Während sich bei der AOS eine konstante Bearbeitungsdauer  $t_{B,AOS}$  nach Gleichung (36) einstellt, wird auch hier wieder die Abhängigkeit von  $N_H$  beim Einsatz der LCoS-SLM-Technologie deutlich. So gilt für die Bearbeitungsdauer  $t_{B,LS}$  mit diesem System der in Gleichung (37) dargestellte Zusammenhang. Die höhere Beugungseffizienz des LCoS-SLM, wodurch eine größere Fläche bearbeitet oder bei gleicher Fläche eine größere Tiefe erzeugt werden kann, ist mit dem Faktor  $\eta_{B,LS}/\eta_{B,AOS}$  berücksichtigt worden.

$$t_{B,AOS} = N_g / f_{rep} \quad (36)$$

$$t_{B,LS} = \frac{\eta_{B,LS}}{\eta_{B,AOS}} \cdot \max\left(\frac{N_H}{f_U}, \frac{N_g}{f_{rep}}\right) \quad (37)$$

Auch hier zeigt sich aus dem Verlauf der Bearbeitungsdauer in Bild 32, dass bis zu einer Anzahl von 18 Umschaltungen eine kürzere Bearbeitungsdauer mit LCoS-SLMs erreicht werden kann. Sobald aber eine größere Anzahl an Wechsel der Phasenverteilungen notwendig ist, ist eine

Bearbeitung mit AOS-Technologie weniger zeitintensiv. Generell gilt festzuhalten, dass die AOS-Technologie dann zu bevorzugen ist, wenn eine Vielzahl an unterschiedlichen Phasenverteilungen mit einer hohen Repetitionsrate und einer geringen Anzahl an Laserpulsen verwendet werden soll.

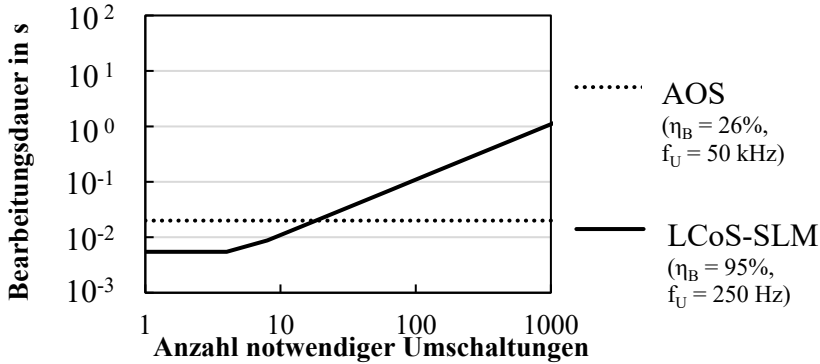


Bild 32: Bearbeitungsdauer mit AOS im Vergleich zu einem idealen LCoS-SLM in Abhängigkeit der notwendigen Umschaltvorgänge

Durch die Wahl der AOS werden vergleichsweise höhere Effizienzen und kürzere Bearbeitungszeiten bei Prozessen, die einen schnellen und häufigen Wechsel an Intensitätsverteilungen verlangen erreicht. Damit wäre die 4. Hypothese dieser Arbeit teilweise belegt: *Durch die Anwendung dieser Strahlformungstechnologie kann die Bearbeitungszeit verkürzt und die Effizienz gesteigert werden.*

## 7 Qualität der erzeugbaren Strahlprofile und Strukturen

Bei der Erzeugung flächiger Intensitätsverteilungen wird von allen Orten der Apertur des Strahlformers Licht gebeugt, sodass dies in der Bearbeitungsebene überlagert und die gewünschte Geometrie des Strahlprofils bildet. Bei dieser kohärenten Überlagerung bilden sich Interferenzen in Form von Speckle aus, die zu einer ungleichmäßigen Intensitätsverteilung und Strukturierung führen. Zwar gibt es die Möglichkeit, diese ungewünschte Interferenz zu verhindern, indem zusätzliche Bedingungen an die Phasenverteilung in der Bearbeitungsebene gestellt werden, aber dabei muss dem System zugleich die Freiheit gegeben werden, Intensität in ungewollte Bereiche der Bearbeitungsebene zu verteilen. Man spricht dann von einem „double-constraint Gerchberg-Saxton-Algorithmus“ [80]. Untersuchungen dazu zeigen, dass dies zu erheblichen Einbußen in der Beugungseffizienz führt. So konnte bei der Strahlformung mit LCoS-SLM in [A4] eine Verringerung der Beugungseffizienz von 68,7% auf 10,7% festgestellt werden. Für die AOS in der Mikrostrukturierung ist diese Methode durch die ohnehin relativ geringe Beugungseffizienz von 20-30% nicht zu empfehlen. Hierbei ist, gerade durch die schnelle Umschaltrate, eine Homogenisierung des Strahlprofils und damit der Struktur durch eine Mittelung alternativer Phasenverteilungen mit jeweils einzigartiger Verteilung der Speckle zu bevorzugen. Im Anhang h ist das Kriterium für die quantitative Bestimmung der Homogenität anhand der Strahlgleichförmigkeit  $S$  dargestellt. Der Ursprung der Daten der dargestellten Werte und Verläufe ist im Folgenden immer mit  $sS$  für Daten aus der Simulation oder  $eS$  für Daten aus den Experimenten gekennzeichnet. Anhand dieser Daten wird die Anzahl notwendiger alternativer Phasenverteilungen bestimmt. Es hat sich darüber hinaus gezeigt, dass bei der Erzeugung von Strukturen mit AOS eine Erhöhung der Homogenität auch durch die Ausnutzung der Dispersion erreicht werden kann.

### 7.1 Darstellung und Diskussion der Strahlqualität

Zuerst werden einzelne Profile mit alternativen Phasenverteilungen aus CBA und IFTA untersucht. Danach wird auf den Einfluss der Synchronisation eingegangen. Die Untersuchungen von überlagerten alternativen Phasenverteilungen zeigen die erreichbare Qualität der AOS. Hier wird dann auch der Einfluss der Dispersion (vgl. Abschnitt 4.2.4) untersucht.

Für 100 Intensitätsprofile, die mit dem CBA berechnet werden, resultiert eine mittlere Strahlgleichförmigkeit  $eS$  von  $0,43 \pm 0,14$ . Im Vergleich dazu können mit dem IFTA bessere Werte erzielt werden. Es ergibt sich hier  $eS = 0,38 \pm 0,10$ . In Bild 33 sind jeweils drei beispielhafte Intensitätsverteilungen aus CBA und IFTA und die Ergebnisse dargestellt. Für eine bessere Darstellung sind diese und die folgenden Aufnahmen der Intensitätsverteilung in der Helligkeit und in ihrem Kontrast optimiert worden. Für die akustischen Signale, die mit dem IFTA berechnet werden, ergibt sich demnach im Mittel eine geringfügige höhere Qualität. Gerade aber durch die höhere Beugungseffizienz – gemessen ohne Prisma – mit 32,3% wegen der konstant hohen Amplitude beim IFTA im Vergleich zu 17,8% beim CBA ist der IFTA zu bevorzugen.

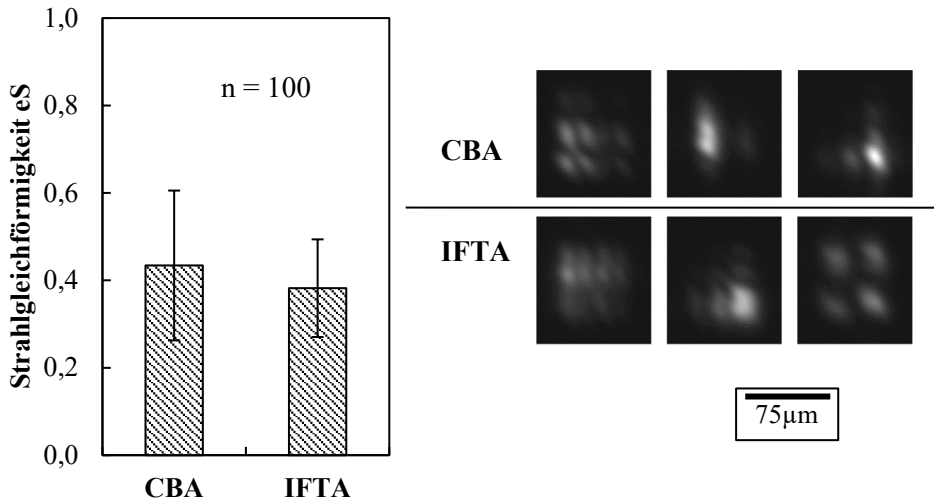


Bild 33: Strahlgleichförmigkeit und Intensitätsverteilungen von einzelnen alternativen Phasenverteilungen mit CBA und IFTA

Wie bereits im Vorangegangenen erklärt, ist das Strahlprofil stark von Speckle dominiert, die ausgeglichen werden müssen um homogene Intensitätsverteilungen zu erreichen. Hierfür wird die Ortsinvarianz bei der Strahlformung flächiger Intensitätsverteilungen genutzt, indem die Phasenverteilung am AOS quer zum Laserstrahl verschoben wird. Dabei bleibt die Geometrie des Strahlprofils vorhanden, jedoch die Verteilung der Speckle ändert sich. Dies ist nur bei einer, wie hier gegebenen, ge-

wichteten Beleuchtung<sup>9</sup> der Phasenverteilung möglich. Durch einen nicht synchronisierten Betrieb des Systems ist dies umgesetzt worden, woraus eine pulswise unterschiedliche Beleuchtung einer Phasenverteilung resultiert und sich damit unterschiedliche Interferenzmuster ausbilden, die überlagert werden. In Bild 34 ist die Auswirkung dieser Methode der Homogenisierung dargestellt. Dafür wird die Intensitätsverteilung aus der Überlagerung von einer Phasenverteilung, die schrittweise relativ zum Rohstrahl verschoben wird, bestimmt. Insgesamt wird die Phasenverteilung in 100 äquidistanten Schritten in x- und y-Richtung, also diagonal, verschoben. Der Anteil, der dabei die optische Apertur des Strahlformers verlässt, wird angehängt, um die Apertur immer komplett mit der einen Phasenverteilung gefüllt zu haben. Für eine statistische Signifikanz dieser Untersuchung werden der Mittelwert und die Standardabweichung der Strahlgleichförmigkeit der simulierten Intensitätsverteilung aus zehn alternativen Phasenverteilungen betrachtet. Es zeigt sich, dass allein durch den nicht synchronisierten Betrieb eine mittlere Steigerung der Homogenität von 21% zu erwarten ist. Diese Art der Homogenisierung ist inhärent beim Betrieb der AOS mit kontinuierlichen Lasersystemen oder wenn gepulste Lasersysteme mit einer höheren Repetitionsrate als der AOS-Umschaltrate emittieren.

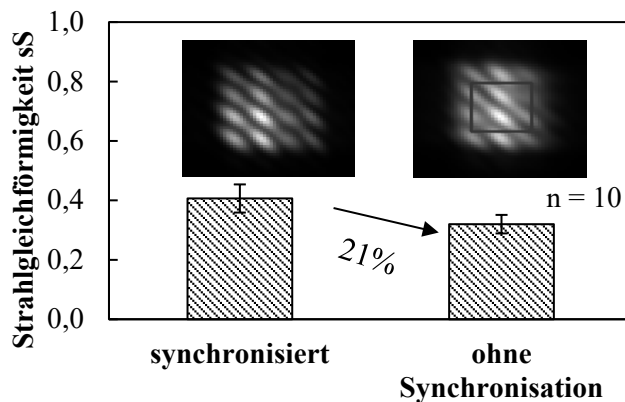


Bild 34: Homogenisierung durch einen nicht synchronisierten Betrieb der AOS

Zum anderen kann eine Überlagerung von Intensitätsverteilungen aus alternativen Phasenverteilungen die Homogenität erhöhen. In Bild 35 ist das Ergebnis einer solchen Überlagerung von einzelnen Intensitätsvertei-

<sup>9</sup> gaußförmige Intensitätsverteilung des Rohstrahls

lungen für den CBA und den IFTA dargestellt. Durch die Überlagerung wird in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen eine Erhöhung der Homogenität erreicht. Es zeigt sich dabei eine Tendenz zur Sättigung der Homogenität, wenn die Anzahl von Phasenverteilungen im zweistelligen Bereich ist. Insgesamt ist eine Überlagerung mit bis zu 500 alternativen Phasenverteilungen betrachtet worden. Der Sättigungswert für  $eS$  ist bei  $0,11 \pm 0,03$  zu finden. Mit dieser Methode der Homogenisierung durch Überlagerung mehrerer Intensitätsverteilungen von alternativen Phasenverteilungen ist eine Steigerung der Homogenität von 70% möglich. Diese Methode ist daher zu bevorzugen.

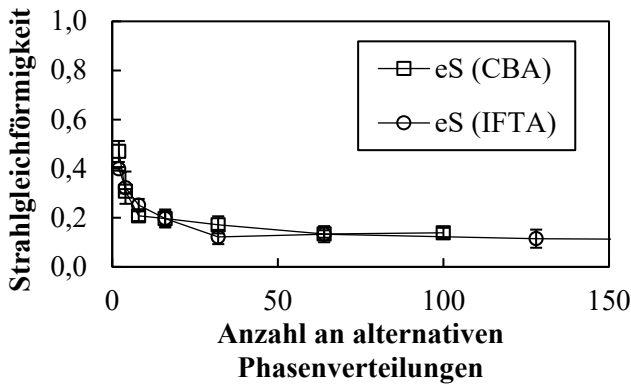
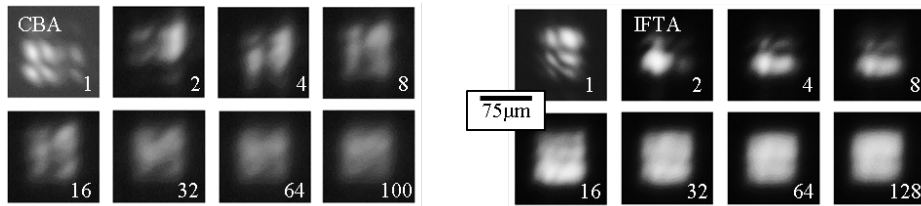


Bild 35: Überlagerte Intensitätsverteilung aus CBA und aus IFTA und Qualität des Strahlprofils in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen

Beide Algorithmen zeigen dabei jeweils dieselbe Qualität der zu erreichenden Strahlform. D.h. dass die Nutzung eines Frequenzbandes im IFTA im Vergleich zu den diskreten Frequenzen im CBA, vgl. Bild 25, hier zu keinem Vorteil führt. Dies ist dadurch begründet, dass die Homogenität maßgeblich von Interferenzen und damit von auftretenden Speckle beeinflusst wird. Da der IFTA aber durch die Frequenzmodulation zu Signalen mit höherer Leistung führt und daraus eine höhere Effizienz resultiert, wird im Folgenden nur noch dieser betrachtet. Die damit gewonne-

nen Ergebnisse behalten ihre Gültigkeit auch für eine Strahlformung basierend auf den CBA. Im Späteren wird ein Vorgehen zur Bestimmung der minimalen notwendigen Anzahl an alternativen Phasenverteilungen vorgestellt.

Die AOS-Technologie bietet eine weitere Möglichkeit, die Homogenität der Intensitätsverteilungen zu erhöhen. Dies wird durch Reduktion der Kohärenz erreicht, indem Dispersion im System zugelassen wird. Hierfür muss auf das Prisma für die Kompensation der Dispersion verzichtet werden. Die Dispersion bei der Beugung am akustischen Gitter führt dann zu einer Aufspaltung der spektralen Komponenten des Laserpulses in der Bearbeitungsebene. Daraus resultiert eine Strahlformung, bei der die einzelnen spektralen Komponenten des Lasers räumlich getrennt sind, und dadurch eine geringere Interferenz im Strahlprofil zu beobachten ist. Dadurch verringert sich die minimale Anzahl an zu überlagernden Phasenverteilungen. Durch die Vergrößerung des beugungsbegrenzten Fokus, vgl. Bild 19, ist aber auch zugleich eine Reduktion der Formtreue und damit der Präzision einhergehend.

Die experimentell gewonnenen Daten und die Simulation der überlagerten Intensitätsprofile sind in Bild 36 zusammen mit beispielhaften Profilen dargestellt. Es zeigt sich hierbei, dass mit dem Experimentalsystem keine vollständige Kompensation der Dispersion des AODs  $\sigma_{AOD}$  nach Gleichung (15) erreicht worden ist und damit kein ideales System darstellbar ist. Daher wird das ideale System, welches dispersionsfrei ist, durch die Simulation beschrieben. Mit der Variation der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen lässt sich die minimal notwendige Anzahl für die Erzeugung einer homogenen Intensitätsverteilung bestimmen. Da die Auswahl und die Reihenfolge der Phasenverteilungen den Verlauf und den Sättigungswert stark beeinflussen, siehe Anhang g, und damit eine große Anzahl an Varianten notwendig wäre, erfolgt die Bestimmung durch die Simulation. Dafür werden aus 1000 alternativen Phasenverteilungen 150 zufällig gewählt und subsequent die Intensitätsprofile überlagert. Aus 50 Variationen werden der mittlere Verlauf und die Standardabweichung von der Strahlgleichförmigkeit bestimmt. Da die mittlere Strahlgleichförmigkeit mit zunehmender Anzahl an überlagerten Phasenverteilungen  $N$  mit einer geometrischen Folge der Form  $S \sim 1/\sqrt{N}$  beschrieben werden kann, wird der Verlauf der mittleren Strahlgleichförmigkeit mit der Funktion (38) angenähert.

$$S(N) = (S(1) - S(150)) \cdot N^a + S(150) \quad (38)$$

Mit dieser Funktion wird die Anzahl  $N$  bestimmt, ab der die Verbesserung durch jede weitere Phasenverteilung geringer als 0,5% ausfällt. Für alle mit dieser Funktion (38) angenäherten Verläufe der Strahlgleichförmigkeit resultiert ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 \geq 0,9959$ , wodurch eine gute Eignung dieser Funktion bestätigt wird.

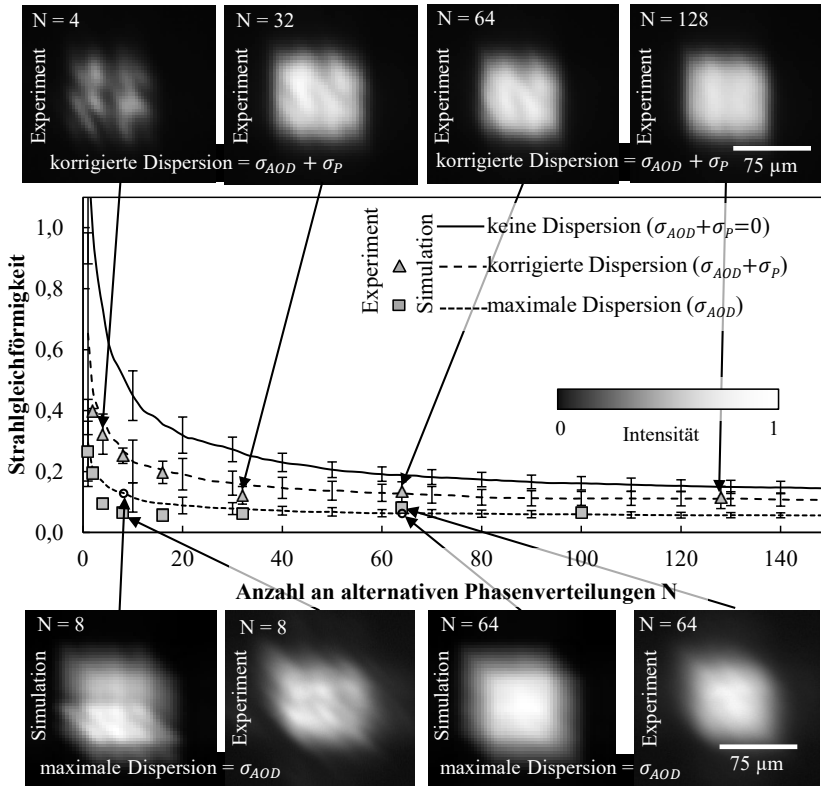


Bild 36: Einfluss der Dispersion auf die Homogenität in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen  $N$

Es zeigt sich hieraus, dass bei einem idealen System, bei dem keine Dispersion auftritt, ab einer Anzahl von 86 Phasenverteilung für die oben festgelegten Kriterien keine nennenswerte Erhöhung der Homogenität mehr erfolgt. Das für diese Untersuchungen genutzte Experimentalsystem weist eine verbleibende Dispersion auf, wodurch eine geringere Anzahl von 58 Phasenverteilungen ausreichend ist ein homogenes Strahlprofil zu erzeugen. Wird das kompensierende Prisma entfernt und die maximal mögliche Dispersion akzeptiert, so reduziert sich die notwendige Anzahl an alternativen Phasenverteilungen weiter auf den Wert 30. Generell wird

empfohlen mehr als 86 alternative Phasenverteilungen zu verwenden, denn ab dieser Anzahl wird keine signifikante Steigerung der Homogenität erreicht, unabhängig von der Dispersion im System.

Neben dem Sättigungswert für die Anzahl ist auch der resultierende Wert für  $S$  von der Dispersion im System abhängig. So resultiert für das System mit maximaler Dispersion ein  $sS$  von  $0,09 \pm 0,03$  bei 30 Phasenverteilungen. In einem idealen System ohne Dispersion wird eine geringe Qualität erreicht, die mit  $0,17 \pm 0,02$  bei insgesamt 86 Phasenverteilungen beziffert werden kann. Die Gültigkeit dieses Vorgehens und damit die Vorhersage der minimalen Anzahl an alternativen Phasenverteilungen werden im folgenden Abschnitt für den Mikromaterialabtrag überprüft.

Zusammenfassend gilt für die Erzeugung homogener Strahlprofile mit AOS: Die Untersuchungen zu den Strahlprofilen zeigen, dass mit der AOS-Technologie trotz der inhomogenen Verteilung einzelner Strahlprofile, die jeweils eine geringe Qualität gemessen an der Strahlgleichförmigkeit aufweisen, die Erzeugung von homogenen Strahlprofilen durch Mittelung mehrerer alternativer Phasenverteilungen möglich ist. Für ein System mit korrigierter Dispersion empfiehlt es sich dabei mehr als 86 Phasenverteilungen zu verwenden. Wird auf die Dispersionskorrektur verzichtet, ist eine geringere Anzahl notwendig. Dadurch wird die Genauigkeit des Strahlprofils durch die Vergrößerung des beugungsbegrenzten Fokus reduziert. Es hat sich aber auch gezeigt, dass einzelne Phasenverteilungen zu einer Reduzierung der Qualität der bisherigen Überlagerung führen. Dies ist in der stochastischen und unabhängigen Berechnung der Phasenverteilungen begründet und eröffnet noch weiteren Forschungsbedarf für die Technologie der Strahlformung im Allgemeinen.

## 7.2 Materialbearbeitung mit akustooptischer Strahlformung

Die vorletzten beiden Abschnitte dieser Arbeit befassen sich mit dem Einsatz der akustooptischen Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung. Dabei wird zuerst, wie auch schon im Vorangegangenen, auf die Strahlformung mit dem Ziel der Aberrationskorrektur und dann auf die flächige Verteilung der Intensität eingegangen. Erstere findet ihren Einsatz vor allem in der Volumeninnenstrukturierung transparenter Materialien, wobei hier die Notwendigkeit besteht, Aberrationen auszugleichen und damit eine höchstmögliche Intensität zu erzeugen. Da sich Aberrationen bei der Volumeninnenstrukturierung nicht dynamisch ändern und die AOS hier nur für den Einsatz mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung geeignet

ist, ist das weitaus größere Einsatzpotential die Formung flächiger Intensitätsverteilungen. Diese kann unabhängig vom Betriebsmodus des Lasers verwirklicht werden und die Belastungsgrenzen der Gerätschaften dieser Technologie werden mit aktuellen industriellen Hochleistungslasern jeglicher Art nicht überschritten (Stand 2018). So werden im Folgenden mögliche und bereits bestehende Einsatzgebiete der AOS in der Materialbearbeitung vorgestellt und Ergebnisse daraus diskutiert. Womit die 1. Hypothese dieser Arbeit vollständig belegt wird.

### 7.2.1 Volumenmodifikation transparenter Materialien

Bei der Volumeninnenstrukturierung auftretende Aberrationen vergrößern das Volumen des Fokus und verringern damit die theoretisch mögliche Leistungsdichte – dreidimensionale Intensität – wodurch Prozesse verhindert werden können oder erst durch zusätzliche Leistung starten. Zugleich resultiert dies in einer Vergrößerung der Interaktionszone [81] und damit sinkt die Präzision der Bearbeitung. Diese Aberrationen sind statisch und von der Bearbeitungstiefe abhängig, eine dynamische Anpassung ist daher nur selten notwendig. Zudem ist die Kompensation von Aberrationen mit AOS-Technologie nur im eingeschränkten Maße möglich, da selbst bei Aberrationen niedriger Ordnung Restterme resultieren wodurch keine vollständige Kompensierung möglich ist, wie in [58] veröffentlicht oder im Anhang e aufgelistet. Diese Restterme, wie sie bei der sphärischen Aberration auftreten, können durch das Einbringen anderer Aberrationen und deren Restterme verringert werden, sodass eine höhere Leistungsdichte resultiert. Vgl. hierzu Bild 37: Der Restterm bei der Kompensation der sphärischen Aberration ist vom Typ  $\varphi(x, y) = Z_4^0 \cdot 12\sqrt{5} \cdot x^2 \cdot y^2$ . Dieser kann mit einem Quadrafoil und dessen Restterms vom identischen Typ  $\varphi(x, y) = Z_4^4 \cdot -6\sqrt{10} \cdot x^2 \cdot y^2$  ausgeglichen werden.

Für die erreichbare Spitzenintensität im Fokus eines sphärisch aberrierten Laserstrahls ( $Z_4^0 = 0,1 \cdot \lambda$ ) bedeutet das, dass sich diese auf 11% der Spitzenintensität eines aberrationsfreien Laserstrahls reduziert. Wird mit der AOS-Technologie eine Kompensation der sphärischen Aberration durchgeführt, resultiert eine Erhöhung der Spitzenintensität auf 30%. Eine vollständige Kompensation ist wegen des o.g. Restterms nicht möglich. Wenn aber der Restterm mit dem aus dem Quadrafoil korrigiert wird, kann eine Spitzenintensität von 70% der theoretisch maximalen Intensität erreicht werden. Durch das zusätzliche Quadrafoil entsteht zwar ein größerer Gesamtfehler der Wellenfront, dieser ist aber im Randbereich des Laserstrahls. In diesem Bereich wird weniger Energie trans-

portiert. Der Fehler im Zentrum reduziert sich durch die zusätzliche Kompensation mit dem Quadrafoil und durch die gaußförmige Intensitätsverteilung des Laserstrahls resultiert damit dann eine höhere Spitzenintensität.

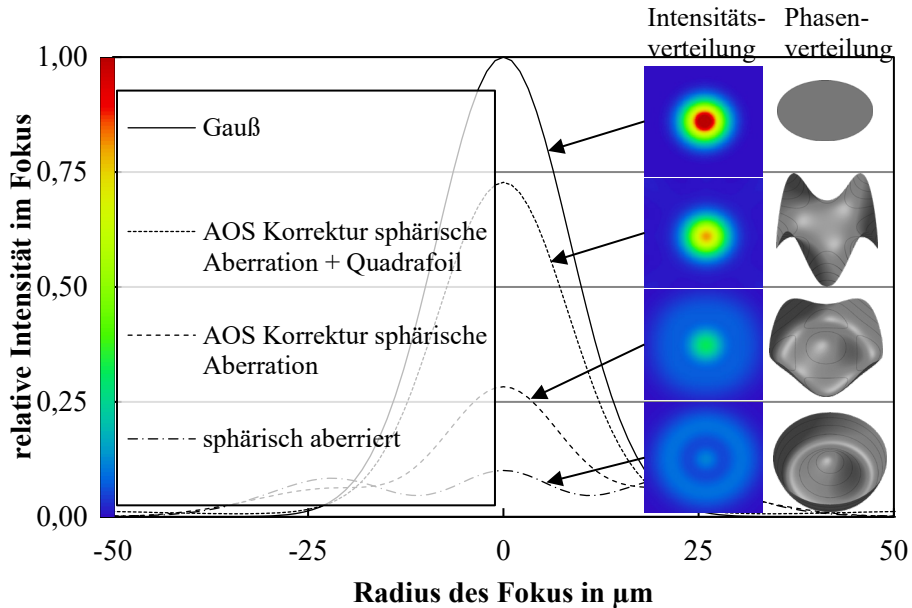


Bild 37: Korrektur einer sphärisch aberrierten Wellenfront und Einbringung zusätzlicher Fehler erhöhen die maximale Intensität

Ein Einsatz in der Materialbearbeitung mit einer hochdynamischen Korrektur von Aberrationen ist bisher nicht absehbar. Mit der AOS-Technologie ist jedoch, wie bereits im Abschnitt 6.2 gezeigt, eine fehlerfreie Einstellung des Defokus möglich. Dieser wird selten zu den Aberrationen gezählt, da dieser der Funktion einer Fokussierung entspricht. So kann über Applizierung des Defokus mit AOS die Brechkraft eines optischen Systems dynamisch geändert werden und damit eine axiale Verschiebung der Bearbeitungsebene erreicht werden. Diese ist nicht nur bei der Volumeninnenstrukturierung, sondern auch bei der Oberflächenstrukturierung von Bedeutung, wie zum Beispiel im Abschnitt 2.4.3 gezeigt.

Bei Erstgenannter kann der Einsatz der AOS in der kornealen Chirurgie, insbesondere beim Lentikelextraktionsverfahren, dem letzten Fortschritt in diesem Bereich, erfolgen [82]. Hier erfolgt ein dreidimensionaler Schnitt mit einem Femtosekundenlaser im Stroma des zu operierenden

Auges. Der Erfolg einer solchen Behandlung ist von der Präzision der Schnittführung und auch von deren Geschwindigkeit abhängig. Untersuchungen dazu mit einer Fokussachführung in Form eines adaptiven Membranspiegels haben gezeigt, dass andere Systemtechniken eine zu niedrige Resonanzfrequenz ( $\sim 500$  Hz) aufweisen und so zum unkontrollierten Schwingen neigen, vgl. Bild 38.

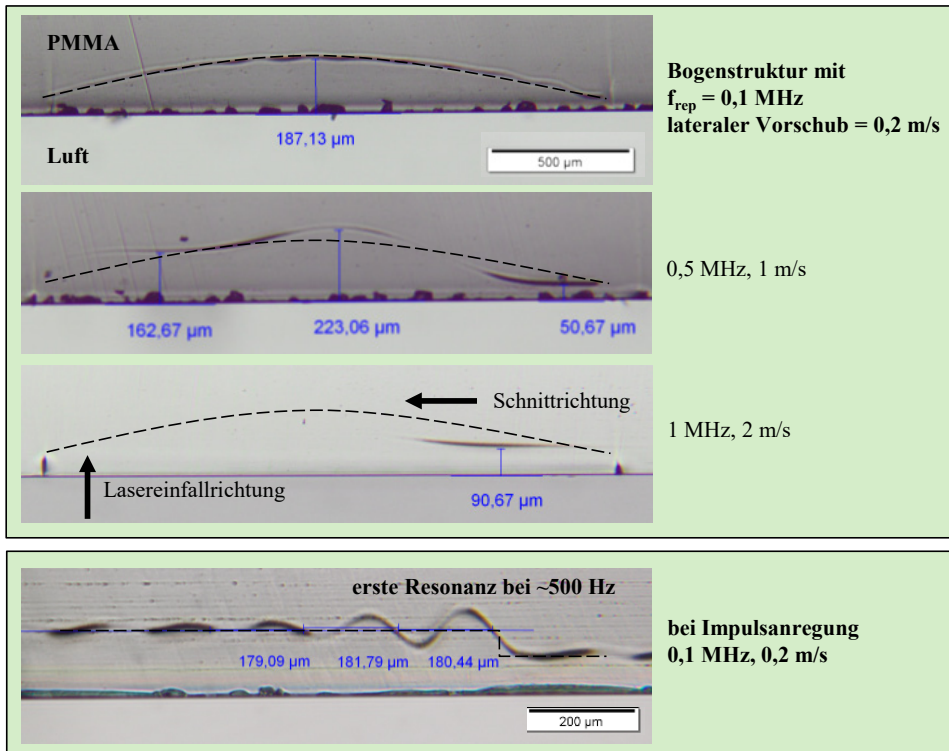


Bild 38: Versuche zu Lentikelschnitten mit einem ultravioletten Femtosekundenlaser und einem adaptiven Spiegel

Mit AOS ist eine fehlerfreie Fokussachführung, s. Abschnitt 6.2, mit weit höheren Frequenzen möglich, s. Abschnitt 4.2.1. Dadurch ergeben sich im Vergleich zu möglichen Systemen mit Membranspiegeln wesentlich kürzere Behandlungsdauern. Zusätzlich kann durch die resonanzfreie Fokussachführung ein Puls-zu-Puls-weises Strukturieren in verschiedenen Bearbeitungsebenen stattfinden und somit neu Prozessführungen realisiert und untersucht werden. Gerade aber auch wegen des geplanten Einsatzes ultravioletter Strahlung sind die anderen im Abschnitt 2.2 genannten Strahlformungstechnologien dazu schlecht geeignet. So stellt die AOS

eine weiter zu untersuchende Möglichkeit dar, die Fokuspachführung, die aktuell über eine verschiebbare Linse bewerkstelligt wird, zu ersetzen. Dadurch kann die Behandlungsdauer verkürzt und damit eine höhere Erfolgsquote erreicht werden.

### **7.2.2 Oberflächenbearbeitung nicht transparenter Materialien**

Der zweite Einsatzbereich von Laserstrahlformung ist in der Oberflächenbearbeitung zu finden. Hier wird das Ziel der flächigen Verteilung der Laserleistung auf der Werkstückoberfläche verfolgt. Mit gepulster Laserstrahlung wird eine bessere Nutzung der zur Verfügung stehenden Laserleistung erreicht und damit die Effizienz solcher Prozesse [83] gesteigert. Zusätzlich kann mit Laserstrahlformung die Qualität der Strukturen [16] erhöht werden. Eine Laserstrahlformung mit kontinuierlich emittierender Laserstrahlung verbessert bzw. ermöglicht Prozesse überhaupt erst. So wird zum Beispiel beim Fügen von Kunststoffen ein sogenanntes M-förmiges Strahlprofil bevorzugt, da dieses zu einem gleichmäßigen Aufheizen der Fügezone ohne Überhitzen und damit zum Zersetzen der Fügepartner führt [84]. Ein weiterer Einsatz dynamischer Strahlformung ist notwendig, wenn die Ausbildung des metallischen Gefüges bei Laserstrahlschmelzprozessen [29] oder -fügeprozessen [85] untersucht und beeinflusst werden soll. Gerade wegen der hohen mittleren Leistungen bei solchen Prozessen ist die AOS ein geeignetes Werkzeug für diese beispielhaft genannten Untersuchungen. Die prinzipielle Einsatzmöglichkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit mit den Untersuchungen zur Leistungsgrenze bei kontinuierlich emittierenden Laserstrahlquellen gezeigt werden. Der Einsatz der AOS bei der Laserstrahlmarkierung mit gepulsten Strahlquellen soll im Folgenden demonstriert werden.

Bild 39 zeigt einen QR-Code, der aus strahlgeformten Quadraten aufgebaut wurde. Jedes Quadrat ist mit 25 alternativen Phasenverteilungen und insgesamt 1000 Laserpulsen belichtet worden. Die geringere Anzahl an alternativen Phasenverteilungen ist hier dem begrenzten Speicherplatz des Signalgenerators geschuldet. In dieser Demonstration ist der relative Versatz der Quadrate ebenfalls mit der AOS eingestellt worden. Um den Einfluss der winkelabhängigen Beugungseffizienz zu reduzieren, ist auf die zweite Möglichkeit zurückgegriffen worden, bei der ein eingeschränkter Arbeitsbereich mit annähernd konstanter Beugungseffizienz gewählt wird, wie im Abschnitt 6.1 geschildert ist. Die Bearbeitungsdauer für die

228 Quadrate betrug 4,56 s. Würde eine Strahlquelle mit höherer Pulsenergie eingesetzt werden, könnten mehrere Quadrate gleichzeitig belichtet werden. Könnte eine komplette Zeile auf einmal belichtet werden, so würde sich die Bearbeitungsdauer auf 0,42 s verkürzen. Im Vergleich dazu ist die Erstellung dieses QR-Codes durch sequenzielle Bearbeitung mit einem Galvanometerscanner um ein Vielfaches länger: Da der beugungsbegrenzte Fokussdurchmesser für dieses optische System  $10\ \mu\text{m}$  entspricht, muss ein Quadrat aus jeweils  $7 \times 7$  Fokuspunkten generiert werden. Für eine einfache Überfahrt wären somit  $49 \times 228$  Pulse notwendig. Da negative Effekte wie Wärmeakkumulation vermieden werden sollen, kann keine höhere Intensität oder Pulswiederholrate genutzt werden. Es folgt eine Bearbeitungsdauer von  $49 \times 228 \times 1000 / 50\ \text{kHz} = 3,7$  Minuten. Etwaige Sprungzeiten von einem zum nächsten Quadrat sind bei dieser Rechnung nicht berücksichtigt.

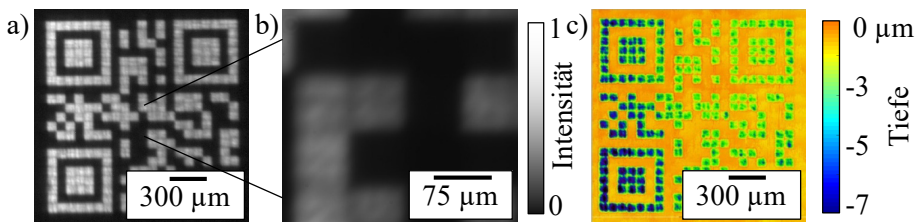


Bild 39: a) akustooptisch verteilte Intensität b) vergrößerter Ausschnitt und c) Laserstrahlmarkierung eines QR-Codes mit AOS und gepulster Laserstrahlung

Der Einfluss der Anzahl an notwendigen Phasenverteilungen bei der Mikromaterialbearbeitung wird im Nachfolgenden dargestellt und damit die Gültigkeit der kamerabasierten Erfassung von Strahlprofilen überprüft. Zur Charakterisierung eines homogenen Abtrags mit AOS-Technologie wird anhand eines einzelnen Quadrates zuerst die Gültigkeit der minimalen Anzahl an alternativen Phasenverteilungen überprüft. Dann wird der Abtrag, der mit der AOS-Technologie erreicht wird, mit demjenigen aus der sequenziellen Bearbeitung mit einem Galvanometerscanner verglichen. Abschließend wird ein bisher unbekannter Effekt bei der Mikromaterialbearbeitung, der erst durch die hohe Dynamik der AOS bemerkbar ist, vorgestellt und die mögliche Ursache dafür diskutiert. Für diese Untersuchungen wurden mit dem oben beschriebenen Experimentalsystem und dem charakterisierten Strahlprofil Napfstrukturen auf einem Chromnickelstahl (1.4301) erzeugt. Dabei waren jeweils 1000 Pulse bei einer Repetitionsrate von 50 kHz notwendig, um eine mittlere Tiefe von  $6\ \mu\text{m}$  zu erreichen. Für die Ermittlung der minimal notwendigen An-

zahl an alternativen Phasenverteilungen wird aus den Daten der Tiefe am Strukturgrund nach den Gleichungen (51) die Gleichförmigkeit der Tiefe bestimmt. Auch hier wird wieder die Anzahl der verwendeten Phasenverteilungen variiert. Die experimentell gemessenen und durch die Simulation gewonnenen Daten werden mit der Funktion (38) angenähert und die Grenze bestimmt, ab der die Verbesserung durch jede weitere Phasenverteilung geringer als 0,5% ausfällt.

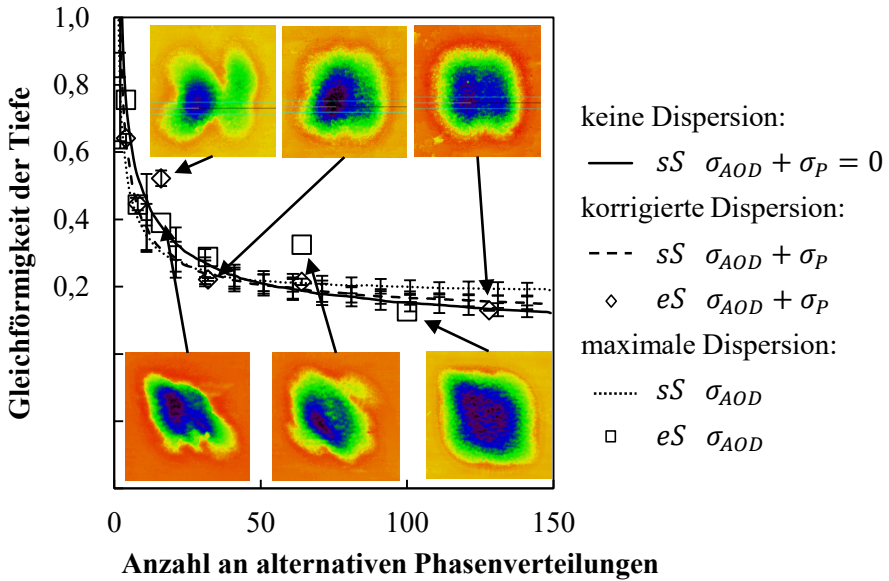


Bild 40: Gleichförmigkeit der Tiefe der Struktur in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen

Bild 40 zeigt exemplarische Strukturen, die mit und ohne kompensierendes Prisma generiert wurden. Des Weiteren sind die gemessenen und die simulierten Verläufe der Gleichförmigkeit der Tiefe für diese beiden Fälle und einem theoretisch idealen ohne das Auftreten von Dispersion abgebildet. Für die minimale Anzahl an alternativen Phasenverteilungen ergibt sich für ein System ohne Dispersion ein Wert von 89 Phasenverteilungen. Dieser reduziert sich, wenn Dispersion im System wirkt, auf minimal 44 und beim Einsatz eines kompensatorischen Prismas konnte hier ebenfalls, wie bei der Bestimmung durch die Aufzeichnung der Intensitätsverläufe, ein minimaler Wert von 59 bestimmt werden. Die Erkenntnis, dass sowohl die Analyse der Intensitätsprofile wie auch die Generierung und Vermessung von Strukturen zu derselben Anzahl an

alternativen Phasenverteilungen für ein homogenes Profil und damit zu einer homogenen Struktur führen, erspart in zukünftigen Untersuchungen die vergleichsweise aufwändige Charakterisierung über die Strukturen. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung ist ersichtlich, dass unabhängig von der Stärke der wirkenden Dispersion der absolute Wert der Gleichförmigkeit der Tiefe konstant bleibt. Die Rauheit wird davon folglich nicht beeinflusst. Dies ist gegensätzlich zu den Ergebnissen der kameraermittelten Homogenität. Hier hat die Dispersion einen deutlichen Einfluss auf den Sättigungswert der Gleichförmigkeit.

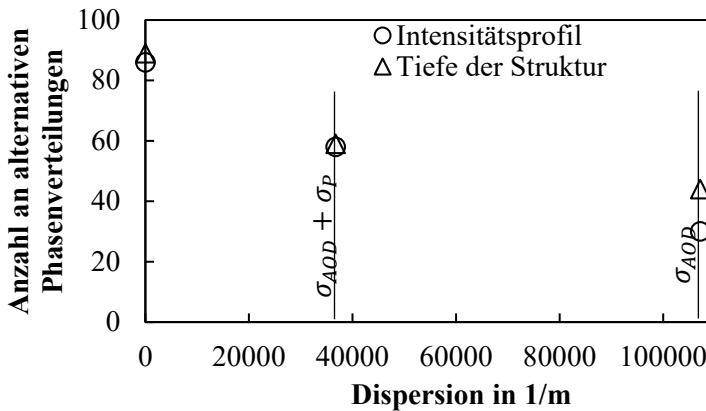


Bild 41: Einfluss der Dispersion auf die minimale Anzahl an alternativen Phasenverteilungen zum Erreichen einer homogenen Intensitätsverteilung oder Struktur

Zusammenfassend gilt, dass sich die Anzahl an alternativen Phasenverteilungen mit zunehmender Dispersion reduziert, aber keinen Einfluss auf den absoluten Wert der Gleichförmigkeit der Tiefe und damit auf die Rauheit einer Struktur hat. Die minimale Anzahl an alternativen Phasenverteilungen zum Erreichen einer homogenen Intensitätsverteilung und damit einer homogenen Struktur ist von der Stärke der Dispersion abhängig, s. Bild 41.

Bis auf die Abweichung bei einer starken Dispersion im System zeigt die Übereinstimmung der notwendigen Anzahl an alternativen Phasenverteilungen, dass *die Bewertung der Qualität der Strahlprofile aus kameratechnischer Erfassung und der Vermessung der damit erzeugten Strukturen zum selben Ergebnis führen*, und belegt damit die 5. Hypothese dieser Arbeit.

Zum direkten Vergleich der Strukturierungsqualität der AOS-Technologie mit konventioneller Mikromaterialbearbeitung werden mittels eines Galvanometerscanners und einem sonst unveränderten optischen System<sup>10</sup> Vergleichsstrukturen erzeugt. Für diesen Vergleich ist das Galvanometersystem nicht auf minimale Bearbeitungszeit, sondern auf eine hohe Qualität des Abtragsresultates optimiert worden. Dafür ist die Repetitionsrate des Lasersystems von 50 kHz mit einem Pulsteiler auf 5 kHz herabgesetzt worden. Nur so konnte, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,01 m/s die geometrische Form des Quadrates mit dem Galvanometerscanner eingehalten werden. Die Fluenz im  $1/e^2$  Fokus ist mit 0,11 J/cm<sup>2</sup> eingestellt worden und damit der mittleren Fluenz beim Abtrag mit der AOS-Technologie identisch.

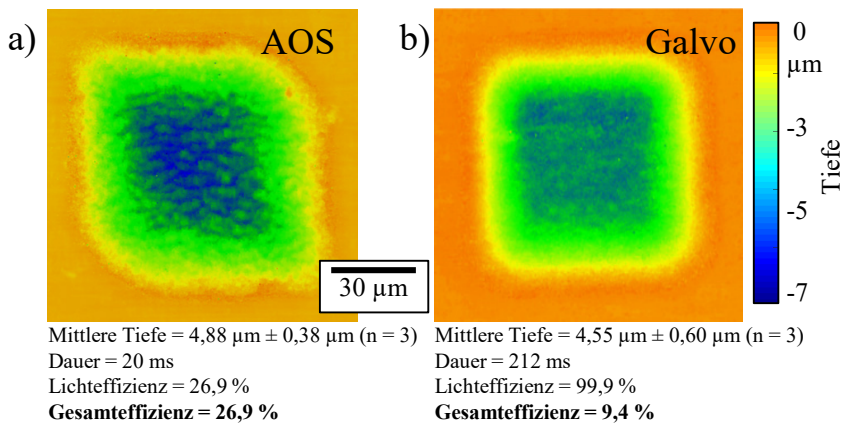


Bild 42: Napfstruktur mittels a) AOS und b) Galvanometerscanner erzeugt bei sonst unverändertem optischen System

Der Verlauf der Tiefe, resultierend aus einem derartigen Abtrag, ist in Bild 42 demjenigen mit der AOS-Technologie erzeugten gegenübergestellt. Für die konventionelle Technologie ergibt sich eine mittlere Rauheit am Strukturgrund  $S_a$  von 0,203  $\mu\text{m}$  ( $eS = 0,09$ ) bei einer Standardabweichung von 0,022  $\mu\text{m}$  (n = 3). Für Strukturen, die mit Strahlformung durch AOS generiert werden, ist die Rauheit am Strukturgrund  $S_a$  durchschnittlich 0,273  $\mu\text{m}$  ( $eS = 0,13$ ) mit einer Standardabweichung von 0,017  $\mu\text{m}$ .

Die Rauheit des Strukturgrundes bei konventioneller Mikromaterialbearbeitung ist um 30% geringer als beim Einsatz der AOS. Zusammenfassend

<sup>10</sup> D.h. dieselbe telezentrische F-Theta-Optik und identischer Strahldurchmesser des kollimierten Strahls an der Eingangsapertur.

betrachtet ist die Qualität beim Strukturieren mittels AOS unter den Möglichkeiten etablierter Methoden und widerlegt die 6. Hypothese: *Die erreichbare Qualität der Strukturierung mit AOS entspricht der von konventionell hergestellten Strukturen mittels Galvanometerscannern.* Die 4. Hypothese wird hiermit weiter bestätigt.

Mit der AOS steht zum ersten Mal eine Technologie bereit, mit der ein schneller Wechsel von Phasenverteilungen möglich gemacht wird. Dies ermöglicht neue Untersuchungen in der Licht-Materie-Wechselwirkung. So ist im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss von einem pulsweisen Wechsel der alternativen Phasenverteilung bemerkt worden: Es zeigt sich, dass ein Wechsel der Phasenverteilungen bei jedem Laserpuls zu einer Steigerung des abgetragenen Volumens führt. Andere Strukturmerkmale wie zum Beispiel die Rauheit ( $S_a$ ) des Strukturgrundes bleiben davon allerdings unbeeinflusst.

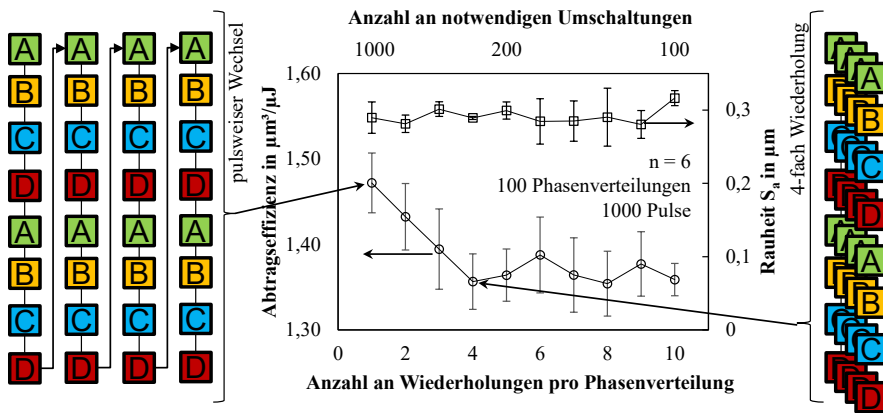


Bild 43: Einfluss der Applikationsreihenfolge alternativer Phasenverteilungen [ABCD] auf die Abtragsleistung und nicht vorhandener Einfluss auf die Rauheit  $S_a$

Die in Bild 43 dargestellten Ergebnisse zeigen das abgetragene Volumen von Napfstrukturen in Abhängigkeit der Wiederholungen pro Phasenverteilung. Dabei sind 100 Phasenverteilungen mit insgesamt 1000 Pulsen verwendet worden. Wenn für jeden Puls die Phasenverteilungen getauscht werden, sodass sich diese erst nach 100 Pulsen wiederholen, ergibt sich ein um 7,5% größeres abgetragenes Volumen im Vergleich zu einem Wechsel der Phasenverteilung nach 10 Pulsen und damit einer einfachen Darstellung der Sequenz der 100 Phasenverteilungen. Womit sich eine weitere, nicht vorhergesehene, Bestätigung der 4. Hypothese ergibt.

Dieses Verhalten zeigt aber auch, dass eine Voraussage der Abtragstiefe aus der unabhängigen Kombination der Einzelabträge fehlerhaft sein kann, da eine Veränderung der Reihenfolge der Phasenverteilungen einen Einfluss zeigt. Da die Ursache für dieses Verhalten noch unklar ist, besteht weiterer Forschungsbedarf auf dem Themengebiet der Lasermaterialbearbeitung mit Strahlprofilformung, um die Gründe dieses Verhaltens zu verstehen und erklären zu können.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit wurden Systeme für die Strahlführung und -formung von Laserstrahlen hinsichtlich ihrer Dynamik anhand der Datenübertragungsrate bewertet und verglichen. Die Datenübertragungsrate ist die Anzahl an Strukturpunkten pro Zeiteinheit, die mit einem System erzeugt werden kann. Es zeigt sich dabei, dass eine Strahlformung mit akustooptischen Effekt die höchsten Datenübertragungsraten ermöglicht und somit ein enormes Potential birgt. Dieser Idee wurde in vorliegender Arbeit nachgegangen und so eine neue Technologie für die Laserstrahlformung bei der Materialbearbeitung erforscht. Die Innovation besteht hier in der Berechnung der Signale, die für die akustooptische Laserstrahlformung (AOS) notwendig sind. Im Rahmen dieser Arbeit ist hierfür ein Iterativer-Fourier-Transformations-Algorithmus entwickelt worden, mit dem eine effiziente Strahlformung erreicht wird. Diese Arbeit befasst sich mit der AOS-Technologie zuerst im Allgemeinen: So werden die Umschaltrate, die Leistungsgrenzen für den Einsatz dieser Technologie und die Einschränkungen für die erreichbaren Intensitätsverteilungen in der Bearbeitungsebene aufgezeigt. Gerätschaften, die für diese Technologie kommerziell erhältlich sind, können theoretisch mit mehreren tausend Watt Laserleistung betrieben werden. Experimentelle Belege bestätigen diese Vorhersage. Damit ist die AOS nahezu unbegrenzt mit Strahlquellen im kontinuierlichen Betrieb und auch im Pulsbetrieb einsetzbar.

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Akustooptische Laserstrahlformung stellt eine neue Technologie für die Verteilung von Laserlicht dar und ist für die Mikrostrukturierung geeignet.
2. Eine Strahlformung von ultrakurzgepulster Laserstrahlung ist mit AOS möglich. Es können dabei zwei Ziele erreicht werden: Zum einen können mit AOS Aberrationen ausgeglichen werden, zum anderen ist eine flächige Verteilung der Laserleistung damit möglich.
3. Die AOS eignet sich auch für den Einsatz mit kontinuierlich emittierenden Lasern, obwohl die Manipulation des Laserstrahls kontinuierlich und mit Schallgeschwindigkeit durch das akustische System propagiert. Dies ist aber nur bei der ortsinvarianten Strahl-

formung mit dem Ziel der flächigen Verteilung der Intensität möglich.

4. Die Zukunftsfähigkeit dieser Strahlformungstechnologie sichern die Datenübertragungsrate von ca. 27 GS/s und die Einsatzfähigkeit mit Lasersystemen hoher mittlerer Leistung bis in den Megawatt-Bereich. Die AOS ist in dieser Hinsicht konkurrierenden Technologien überlegen.
5. Ein neuer Berechnungsalgorithmus wird hier vorgestellt mit dem eine effizientere Laserstrahlformung möglich ist und somit eine mittlere Beugungseffizienz von 20-30% erreicht wird.
6. Im Vergleich zu bekannten Technologien für die Laserstrahlformung erscheint die Beugungseffizienz niedrig. Durch die hohe Datenübertragungsrate und damit niedrigen Totzeiten ist mit der AOS eine höhere Gesamteffizienz der Produktionsanlage möglich.
7. Die Quantifizierung der Qualität und die damit verbundene Bestimmung der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen, die zu einer identischen Geometrie mit einzigartiger Speckleverteilung im Fokus führen, sind anhand von kameratechnischen Aufnahmen und topographischen Vermessung von Strukturen erfolgt. Es zeigt sich, dass jeweils eine ähnliche Anzahl von ca. 90 Phasenverteilungen benötigt wird, um eine homogene Struktur zu erzeugen.
8. Die inhärente Dispersion durch die Beugung am Gitter der akustischen Welle konnte genutzt werden, um die Anzahl an alternativen Phasenverteilungen zu verringern.
9. Mit der hier vorgestellten Simulation können die Strahlformung und die Strukturierung mit AOS berechnet werden und somit Vorhersagen ohne weitere Experimente zum Strahlprofil und der damit erzeugbaren Struktur getroffen werden.
10. Ein Einfluss der Sortierreihenfolge dieser alternativen Phasenverteilungen, der zu einer Steigerung der Effizienz von 7,5% führt, konnte hier festgestellt werden und eine erste Vermutung zu den Ursachen hierfür wurde formuliert. Für die Klärung dieses Verhaltens müssen jedoch weiterführende Untersuchungen in der Licht-Materie-Wechselwirkung durchgeführt werden.

Durch die zuerst allgemeine Beschreibung und Charakterisierung dieser neuen Technologie und im Verlaufe dieser Arbeit zunehmende Konkretisierung bis hin zur Demonstration einer flächigen Strukturerezeugen mit einem beispielhaften Aufbau zur AOS, kann jetzt für jede mögliche Anwendung eine Abschätzung zum sinnvollen Einsatz der AOS-Technologie erfolgen.

## 9 Summary and future work

Prior to this work all systems for laser beam steering and shaping are evaluated in the dynamic by their data transfer rate. This rate is the number of resolvable spots per unit time the system can generate. The idea of beam shaping using the acousto-optic effect shows the highest data transfer rate. This idea was caught up in this thesis and a new technology for laser beam shaping is presented. The innovation of this new technology is the calculation of the signals necessary for the acousto-optic laser beam shaping (AOS). An Iterative-Fourier-Transformation-Algorithm for producing efficient laser beam shaping has been developed within this work. First, the thesis deals with the general features of the AOS-technology: switching rate, maximum applicable laser power and restrictions for the achievable intensity distributions. Moreover, hardware to apply this technology with multi-kW-lasers is commercially available. Experimental results prove the theoretical predictions of the maximum applicable laser power for AOS. These characteristics make AOS nearly universally applicable with all laser sources in pulsed and continuous wave (cw) operations.

The major findings of this thesis are summarized in the following:

1. Acousto-optic laser beam shaping is a new technology to distribute laser light in micro structuring.
2. Beam shaping of ultra-short pulsed lasers is demonstrated following two aims: first AOS is used to correct for aberrations and second areal distribution of laser light is achieved.
3. AOS can also be used with continuous wave lasers, although the manipulation of the wavefront is propagation by the speed of sound through the system. This is possible for the areal distribution of laser light, because the acoustic signals are invariant in space.
4. The future viability of this technology is assured due to its high data transmission rate of  $> 27$  GS/s and due to the deployability with lasers of high average power up to the megawatt regime, which is superior to alternative beam shaping technologies.
5. A new algorithm is introduced enabling a more efficient laser beam shaping with a mean diffraction efficiency of 20-30%.
6. Compared to other technologies this diffraction efficiency seems to be low, but due the high data transmission rate, with short dead

- times, AOS can achieve a higher overall efficiency in a production system.
7. The quantification of the quality and the associated determination of the number of alternative phase masks, which result in an identical geometry but with different speckle distribution in the focal plane, was carried out by image acquisition of the beam profile and topological measurements of the resulting structures. It shows that both methods come to the same amount of phase masks for a homogeneous structure at around 90.
  8. The inherent chromatic dispersion when diffracting the spectrally wide band of an ultrashort pulsed laser beam at a grating was used to reduce the number of alternative phase masks.
  9. The presented simulation can calculate the beam shapes and the structuring with AOS. This allows for predictions of the beam profile and the structures without carrying out experiments.
  10. An influence of the sequence of the alternative phase masks, which leads to an increase of the efficiency of 7.5%, was determined. Theories of the reason are formulated, but an explanation must be found in future investigations in the field of light-matter-interaction.

The introductory general description and characterization of this new technology and its precise depiction throughout this thesis including a demonstration of areal structuring with an exemplary setup for AOS, helps to gauge the applicability of AOS-technology for laser material processing.

## 10 Anhang

### a Auflistung aller Systeme für die Marktanalyse

Die in folgender Auflistung genannten Systeme sind für die Bestimmung und Auswertung der Datenübertragungsrate betrachtet worden.

#### Galvanometerscanner

|                |   |
|----------------|---|
| Cambridge Tech | PS1-07; PS1-10; PS1-14; PS2-7; PS2-10; PS2-14; LXP-7; LXP-10; LXP-14  |
| Scanlab        | hurrySCAN; hurrySCAN II; SCANcube; intellcube; intelliSCAN; intelliDRILL  |
| Raylase        | RL10; RL14; SC15; SC30; SC7; SC9; SC10; SC12; SC14; SC15; SC20; TS10; TS12; TS15; TS30; RLA1004; RLA1504; RLA2004 |
| Miniscan       | SSII; SSIIHS  |
| Arges          | Wasp; Squirrel; Rhino S; Rhino; Raccoon S; Raccoon  |

#### MOEMS-Scanner

|                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| FFG                          | Linscan                            |
| OPUS Microsystems (resonant) | OP-6200; OP-7200; OP-6111          |
| Lemoptix                     | DC2; DC3; F3; F4; F5; F6; F7; F8   |
| Adriatic Research Institute  | M; B; L                            |
| Hamamatsu                    | S12237-02P; S12237-03P; S12238-01P |

#### Polygon-Scanner

|                   |  |
|-------------------|--|
| Lincoln Laser     | SOS-BB10; SOS-AB30; SOS.SA24C              |
| Copal Electronics | PT22ERG; PTC30ERG; PT60SRG; PD60EA; PD60LA |

#### Piezo-Scanner

|                  |  |
|------------------|--|
| PI               | S334-1; S334-2; S330-2; S330-4; S330-8; S340; S325-3 |
| Piezosystem Jena | PSH1; PSH2; PSH3; PSH4; PSH8; PSH 5/2; PSH 10/2      |

#### EOD

|           |                             |
|-----------|-----------------------------|
| NTT AT    | KTN; KTN2                   |
| Conoptics | 412; 312; 312-2; 312-5; 317 |

#### DLP

|    |                  |
|----|------------------|
| TI | DLP7000; DLP9500 |
|----|------------------|

**AOD**

|                    |  |
|--------------------|--|
| AA optoelectronics | DTSX; MT110; MT80; MT200                 |
| Gooch & Housego    | 46080; MD035; MD035                      |
| Brimrose           | TEDXX; 2DS                               |
| Isomet             | LS110-1064; LS110HF-1064; D1135; 1250-BS |
| IntraAction        | DTD-274                                  |

**MEMS-SLM**

|                      |  |
|----------------------|--|
| Iris AO              | PTT489 DM  |
| Fraunhofer           | MMA  |
| Bosten Micromachines | Hex-111; Hex-111-X; Hex-255; Hex-507; Hex-507-LL;<br>Hex-507-S; Hex-1011; Hex-1011-S; Hex-3063 |

**LCoS-SLM**

|                 |                                 |
|-----------------|---------------------------------|
| Hamamatsu       | X10468; X13267; X13138          |
| BNS(Meadowlark) | 512; 1920; 512L                 |
| Holoeye         | GAEA 4k; LETO 2k; PLUTO; LC2012 |
| 4DD             | QXGA-3DM; SXGA-3DM              |
| santec          | SLM-100                         |

## b Linearität des verwendeten Digitalmikroskops

Zur Bestimmung des Antwortverhaltens der Kamera im Digitalmikroskop wird die darauf wirkende Leistung mit einem Leistungsmessgerät (Coherent, PS19Q) gemessen und mit dem mittleren Grauwert verglichen. Der mittlere Grauwert wird im Zentrum des Kamerachips in einem Bereich von  $28 \times 32$  Pixeln, auf dem eine homogene Intensität einwirkt, bestimmt. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Laserleistung und dem Grauwert, den die Kamera liefert, siehe Bild 44.

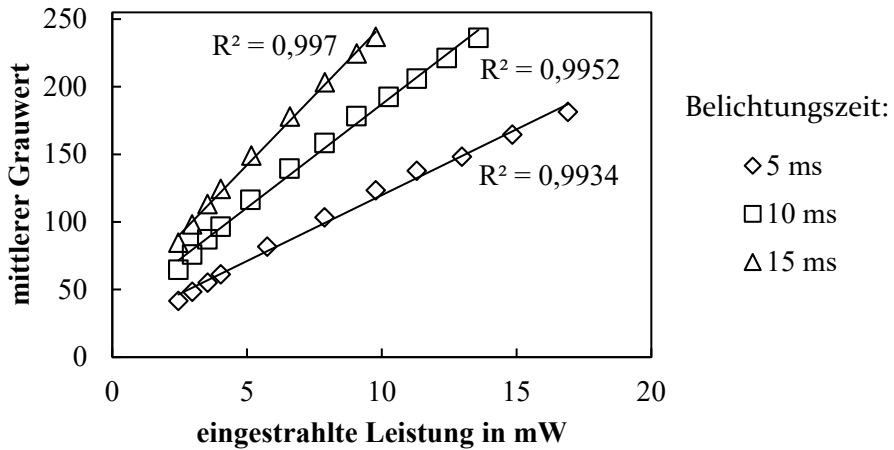


Bild 44: Antwortverhalten der verwendeten Kamera

### c Bestimmung der nichtlinearen Zerstörschwelle von $\text{TeO}_2$

Anhand eines  $\text{TeO}_2$ -Kristalls des Herstellers der AODs ist die nichtlineare Zerstörschwelle des Systems bestimmt worden. In insgesamt drei Versuchsreihen ist mit dem im Abschnitt 4.3 beschriebenen Lasersystem die Zerstörschwelle in Abhängigkeit der Pulsanzahl und der Pulsenergie nach der  $D^2$ -Methode [66] bestimmt worden. Es ist jeweils die antirefektivbeschichtete (AR) und die unbeschichtete Oberfläche ( $z = 0$ ) sowie die Zerstörschwelle 1 mm unterhalb der Oberfläche ( $z = -1$ ) bestimmt worden, siehe Bild 45. Es zeigt sich auch hier, wie aus der Literatur bekannt, dass eine Interaktion der Laserstrahlung zuerst an der Oberfläche auftritt, noch bevor ein Schaden im Material erreicht wird. Die antirefektive Beschichtung reduziert die Zerstörschwelle des AODs. Die Zerstörschwelle wurde daher beim niedrigsten gemessenen Wert, der  $0,18 \text{ J/cm}^2$  beträgt, bestimmt.

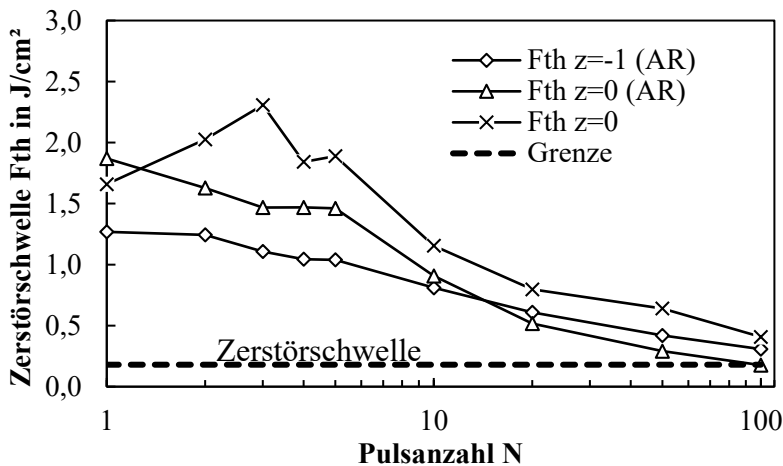


Bild 45: Bestimmung der nichtlinearen Zerstörschwelle von  $\text{TeO}_2$

## d Beweis für die Gültigkeit der Projektion

In der Optik gilt der Zusammenhang zwischen Bearbeitungsebene und Rückseitige Brennebene einer Linse über eine Fourier Transformation. Dabei ist die Fourier Transformation des komplexen Feldes in der Bearbeitungsebene das komplexe Feld in der Fourierebene.

$$\sqrt{I_{xy}} e^{i\varphi(x_B)} e^{i\varphi(y_B)} = \text{FFT}(\sqrt{I_{Gauss}} e^{i\varphi(x)} e^{i\varphi(y)}) \quad (39)$$

Da die Phasenverteilungen in der Bearbeitungsebene  $e^{i\varphi(x_B)} e^{i\varphi(y_B)}$  nicht relevant wird die Gleichung (39) vereinfacht und nach dem Faltungstheorem umgestellt. Damit wird die Strahlformung mit AOS beschrieben: die Zielverteilung  $I_{xy}$  wird aus der ursprünglichen Verteilung  $I_{Gauss}$  und aus den Phasenverteilung beider Achsen  $\varphi(x)$  und  $\varphi(y)$  in der Fourierebene bestimmt:

$$I_{xy} = |\text{FFT}(\sqrt{I_{Gauss}}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(x)}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(y)})|^2 \quad (40)$$

Annahme: Der erste AOD verteilt die Intensität in die eine Achsenrichtung (hier x) und der zweite in die orthogonale Richtung (y). Somit ist die Berechnung der 1D-Intensitätsverteilungen zuerst eine Projektion in x, dann eine Entfaltung der Projizierten (x) mit der Zielverteilung  $I_{xy}$ . Durch die Kommutativität und die Assoziativität der Faltung hat die Reihenfolge der Faltung keinen Einfluss und damit führen die Gleichungen (40) und (41) zum selben Ergebnis.

$$I_{xy} = |\text{FFT}(\sqrt{I_{Gauss}}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(y)}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(x)})|^2 \quad (41)$$

Die Gleichungen können somit in einer Dimension aufgelöst werden ohne Rücksicht auf die Reihenfolge der Projektion und Entfaltung. Für die Verteilung jeder Achsenrichtung gilt somit:

$$I_x = |\text{FFT}(\sqrt{I_{Gauss}}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(x)})|^2 \quad \text{und} \quad (42)$$

$$I_y = |\text{FFT}(\sqrt{I_{Gauss}}) * \text{FFT}(e^{i\varphi(y)})|^2 \quad (43)$$

Die Gleichungen (42) und (43) beschreiben jeweils die Projektion der zweidimensionalen Verteilung  $I_{xy}$  in eine Achse:

$$(x, y) \rightarrow (x): I_x = \sum_y I_{xy} \text{ und} \quad (44)$$

$$(x, y) \rightarrow (y): I_y = \sum_x I_{xy} \quad (45)$$

Damit können die Phasenverteilungen beider Achsen  $\varphi(x)$  und  $\varphi(y)$  getrennt aus der jeweiligen Projektion der Zielverteilung bestimmt werden.

## e Mit AOS einstellbare Zernike-Polynome und resultierende Restterme

Die in dieser Arbeit verwendete Nomenklatur ist in folgender Tabelle aufgelistet. In der zweiten Spalte stehen die dazugehörigen Polynome und ganz rechts der Restterm, der sich bei der akustooptischen Strahlformung ergibt.

| Aberration                | Zernike Koeffizient und Polynom                                  | Restterm  |
|---------------------------|--|---|
| Piston                    | $Z_0^0$  | 0   |
| Tilt                      | $Z_1^{-1} \cdot 2x$  | 0   |
| Tip                       | $Z_1^1 \cdot 2y$   | 0   |
| Astigmatismus 45°         | $Z_2^{-2} \cdot 2\sqrt{6}xy$                                     | $Z_2^{-2} \cdot 2\sqrt{6}xy$                    |
| Defokus                   | $Z_2^0 \cdot \sqrt{3}(2x^2 + 2y^2 - 1)$                          | 0   |
| Astigmatismus 0°          | $Z_2^2 \cdot \sqrt{6}(x^2 - y^2)$                                | 0   |
| Trefoil 0°                | $Z_3^{-3} \cdot \sqrt{8}(3x^2y - y^3)$                           | $Z_3^{-3} \cdot 3\sqrt{8}x^2y$                  |
| Koma 0°                   | $Z_3^{-1} \cdot \sqrt{8}(3x^2y + 3y^3 - 2y)$                     | $Z_3^{-1} \cdot 3\sqrt{8}x^2y$                  |
| Koma 90°                  | $Z_3^1 \cdot \sqrt{8}(3xy^2 + 3x^3 - 2x)$                        | $Z_3^1 \cdot 3\sqrt{8}xy^2$                     |
| Trefoil 30°               | $Z_3^3 \cdot \sqrt{8}(x^3 - 3xy^2)$                              | $Z_3^3 \cdot 3\sqrt{8}xy^2$                     |
| Quadrafoil 0°             | $Z_4^{-4} \cdot \sqrt{10}(4x^3y - 4xy^3)$                        | $Z_4^{-4} \cdot \sqrt{10}(4x^3y - 4xy^3)$       |
| Zweiter Astigmatismus 45° | $Z_4^{-2} \cdot \sqrt{10}(8x^3y + 8xy^3 - 6xy)$                  | $Z_4^{-2} \cdot \sqrt{10}(8x^3y + 8xy^3 - 6xy)$ |
| Sphärische Aberration     | $Z_4^0 \cdot \sqrt{5}(12x^2y^2 + 6x^4 + 6y^4 - 6x^2 - 6y^2 + 1)$ | $Z_4^0 \cdot 12\sqrt{5}x^2y^2$                  |
| Zweiter Astigmatismus 0°  | $Z_4^2 \cdot \sqrt{10}(4x^4 - 4y^4 - 3x^2 + 3y^2)$               | 0   |
| Quadrafoil 22,5°          | $Z_4^4 \cdot \sqrt{10}(x^4 + y^4 - 6x^2y^2)$                     | $Z_4^4 \cdot (-6\sqrt{10}x^2y^2)$               |

## f Brechkraft eines AOS

Für die Phasenverteilung  $\varphi(x, y)$  einer idealen dünnen und sphärischen Linse gilt:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2F} \quad (46)$$

Hierbei steht  $F$  für die Brennweite des Systems. Die lineare Unabhängigkeit der Phasenverteilung erlaubt eine Separierung in die beiden Variablen  $x$  und  $y$ :

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{2F} \text{ und } \varphi(y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{y^2}{2F} \quad (47)$$

Die Verknüpfung beider Phasen über eine Summe erlaubt eine fehlerfreie Darstellung mit den linearunabhängigen Achsen des AOS. Mit Hilfe der Gleichung (19) lässt sich der Frequenzverlauf nach Gleichung (48) bestimmen.

$$f(x) = \frac{v}{\lambda} \cdot \frac{x}{F} \text{ und } f(y) = \frac{v}{\lambda} \cdot \frac{y}{F} \quad (48)$$

Wenn die volle Bandbreite des AOS mit  $\omega = f_{max}(d) - f_{min}(0)$  genutzt wird, sodass an den Rändern der Apertur jeweils die minimale bzw. maximale Frequenz ist, ergibt sich:

$$\omega = \frac{v}{\lambda} \cdot \frac{d}{F} \quad (49)$$

Für die Brechkraft  $B$  bzw. die Brennweite  $F$  gilt damit:

$$B = \frac{1}{F} = \frac{\lambda}{v} \cdot \frac{\omega}{d} \quad (50)$$

## g Simulation und Experiment einer Reihenfolge an Phasenverteilungen

Das nachfolgende Bild 46 zeigt die Strahlgleichförmigkeit für simulierte und experimentell gemessene Strahlprofile in Abhängigkeit der Anzahl an alternativen Phasenverteilungen. Hier findet keine statistische Betrachtung statt, sondern eine festgesetzte Reihenfolge der alternativen Phasenverteilungen. Das System ist ohne Kompensation der Dispersion betrachtet und es zeigt sich, dass für eine festgesetzte Reihenfolge eine Erhöhung der Anzahl nicht unbedingt zu einer Steigerung der Qualität eines Strahlprofils führt. Bestimmte Einzelprofile führen zu einem Anstieg der Strahlgleichförmigkeit und damit zu einer Verschlechterung. Ein Algorithmus zur intelligenten Auswahl der Einzelprofile ist nicht bekannt, kann aber bei der Überlagerung alternativer Phasenverteilungen nutzen und so die statistisch ermittelte Anzahl an notwendigen Phasenverteilungen reduzieren.

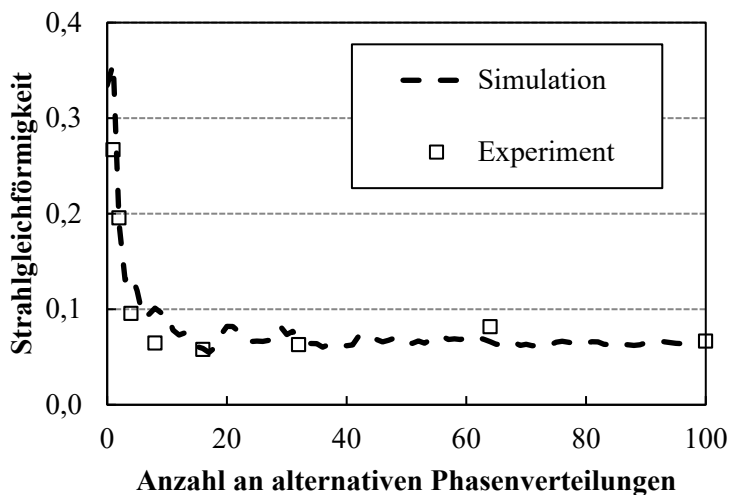


Bild 46: Simulation und Experiment einer einzigen Reihenfolge an Phasenverteilungen

## h Quantitative Beschreibung der Homogenität der Strahlprofile und Messmittelfähigkeit

Als Zielverteilung für die Überprüfung der Qualität der Strahlformen ist eine rechteckige Geometrie gewählt worden, weil dies die Basisstruktur der AOS ist. Andere Formen lassen sich durch die AOS nur eingeschränkt erzeugen, bzw. nur durch Basisstrukturen zusammensetzen. Die Ursache dafür ist im Abschnitt 4.1 beschrieben. Für die Untersuchungen sind daher quadratische Rechtecke der Größe  $75\ \mu\text{m} \times 75\ \mu\text{m}$  gewählt worden. Größere Zielverteilungen sind zwar durchaus möglich, wie in Bild 28 gezeigt wird, für die Strukturierung im Rahmen dieser Untersuchungen resultieren damit jedoch zu geringe Intensitäten mit der zur Verfügung stehenden Laserstrahlquelle. Die Topologie der Strukturen sind mit dem 3D-Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) mit der Bezeichnung LEXT OLS 4000 von Olympus vermessen und verglichen worden.

Mit den gewonnenen Daten der Intensitätsverteilung bzw. der Tiefenverteilung wird die Homogenität als Merkmal für die Qualität bestimmt. Die Homogenität von Strahlprofilen wird über die Strahlgleichförmigkeit  $S$  beschrieben und gibt über die Abweichung zum ideal homogenen Profil bzw. der Tiefe Auskunft. Die Strahlgleichförmigkeit ist laut der Norm DIN EN ISO 13694 für die Beschreibung von konstanten Verteilungen, wie sie auch in diesem Fall vorliegen, geeignet [86]. Sie ist die normierte Standardabweichung der Intensitätsverteilung und berechnet sich nach der Gleichung (51).

$$S = \frac{\sigma_I}{I_m} \quad (51)$$

$S$  berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der Intensität  $I_m$  und der Standardabweichung der Intensitätsverteilung  $\sigma_I$  nach den Gleichungen (52) und (53).  $N_x$  und  $N_y$  sind jeweils die Anzahl der Datenpunkte für die Auswertung in  $x$ - und  $y$ -Richtung der Intensitätsverteilung  $I(x, y)$ . Die Datenpunkte sind mit einem 1/16tel der Größe des beugungsbegrenzten Fokusedurchmessers aufgelöst, damit auftretende Speckle erfasst werden. Damit ist sichergestellt, dass die Ergebnisse für  $S$  nicht von der Auflösung der Datenpunkte vom Digitalmikroskop (vgl. Abschnitt 4.3) abhängig sind.

$$I_m = \frac{1}{N_x N_y} \sum_x^{N_x} \sum_y^{N_y} I(x, y) \quad (52)$$

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_x \sum_y (I(x, y) - I_m)^2} \quad (53)$$

Für die Strahlgleichförmigkeit  $S$  gilt, dass dieser Wert 0 annimmt, wenn eine ideale homogene Intensitätsverteilung und damit ein Strahlprofil hoher Qualität vorliegen. Für die Erhebung dieses Wertes werden die Daten aus der Mitte des Intensitätsprofils gewertet, da sonst ein systematischer Fehler durch die Steigung der Kanten des Profils entsteht. Diese sind durch die Beugungsbegrenzung bestimmt und können daher nicht ideal steil sein. Ein Auswertebereich, der die Kanten des Profils einschließt, würde selbst bei einer homogenen Verteilung zu einem systematischen Fehler mit  $S \approx 0,2$  führen. Der Auswertebereich hat daher eine Größe von  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ , was  $66 \times 66$  Pixeln auf der Kamera des Digitalmikroskops entspricht, vgl. Bild 47. Für alle Untersuchungen bleibt dieser Auswertebereich unverändert, damit die erfassten Daten und die daraus gewonnenen Ergebnisse vergleichbar bleiben.

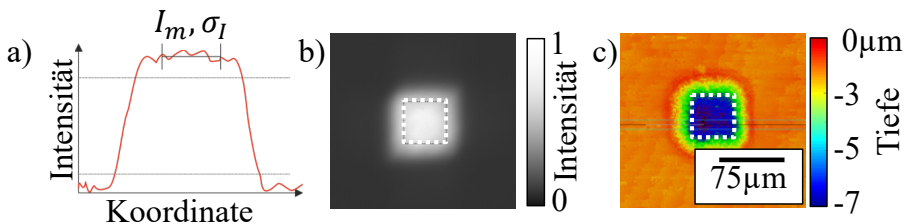


Bild 47: a) Auswertebereich im Querschnitt eines Profils dargestellt zeigt den Ausschluss der Kanten b) Auswertebereich für die Erhebung der Daten für die Homogenität aus dem Strahlprofil und c) der topografischen Vermessung

## i Simultane Messung der Beugungseffizienz

Zur simultanen Bestimmung der Beugungseffizienz wird eine Zielverteilung mit räumlich separierten Spots gewählt. Die Separierung entspricht dem dreifachen Spotdurchmesser und ist notwendig, da homogene Verteilungen zu Interferenzen in Form von Speckle führen, wodurch mit dieser Methode die winkelabhängige Beugungseffizienz nicht bestimmt werden könnte. Durch die Separierung können auch die einzelnen Intensitäten definierten Beugungswinkeln zugeordnet werden. Das Bild 49a) und die Vergrößerung d) zeigen die vorgegebene Zielverteilung mit einer ausgelassenen Spalte und Zeile in der Mitte als Referenzmarke, die die Mittenfrequenz 50 MHz markiert. Die in Bild 49b) dargestellte Gitterstruktur dient der Verdeutlichung: die weißen Bildpunkten (Datenwert 255) führen zu Spots, es wird keine Strahlformung der einzelnen Spots vorgenommen. Basierend darauf sind in den Bildern 49b,e) die erwartete Verteilung der Spots dargestellt, so wie sie mit dem IFTA bestimmt worden ist. Da die erwartete Verteilung mittels iterativer Optimierung berechnet wird, stellt sich eine Abweichung der erwarteten Verteilung zur Zielverteilung ein. Die erwartete Verteilung befindet sich im Wertebereich 209 – 255 des 8bit Graustufenspektrums, statt wie die Zielverteilung bei 255.

Zur Bestimmung der relativen Leistung in Bild 49g) bzw. der winkelabhängigen Beugungseffizienz in Bild 49h) werden für die Verteilungen aus den Bildern 49b,c) der Schwerpunkt jedes Maximums detektiert, dessen relative Leistung durch Integration der Intensität in einem Feld mit der zweifachen Größe des Fokaldurchmessers bestimmt und in Abhängigkeit der Frequenz, die für dessen Ablenkung notwendig ist, angetragen. Mit einer Kalibrierung durch Messung der Beugungseffizienz bei einer einzelnen akustischen Frequenz (vgl. Kapitel 6.1 Methode 1) ergibt sich daraus die in Bild 49h) dargestellte Effizienzverteilungen für das Realsystem.

Für die Zielverteilung ist die Effizienz über den gesamten Messbereich 30–70 MHz gleichverteilt. Durch die iterative Näherung des IFTA ergibt sich eine erwartete Verteilung mit einer Abweichung von der Zielverteilung (Bild 49g) die im Mittel homogen ist. Der Mittelwert dieser erwarteten Verteilung hat den Graustufenwert 226,5 mit einer Standardabweichung bei 5,2. Die Messung der winkelabhängigen Beugungseffizienz mit dem Realsystem (Bild 49h) zeigt einen deutlichen Abfall der Effizienz bei hohen bzw. niedrigen akustischen Frequenzen, da in diese Bereiche keine Leistung gebeugt wird. So kann die winkelabhängige Beugungseffizienz

für jedes akustooptische Strahlformungssystem simultan gemessen werden.

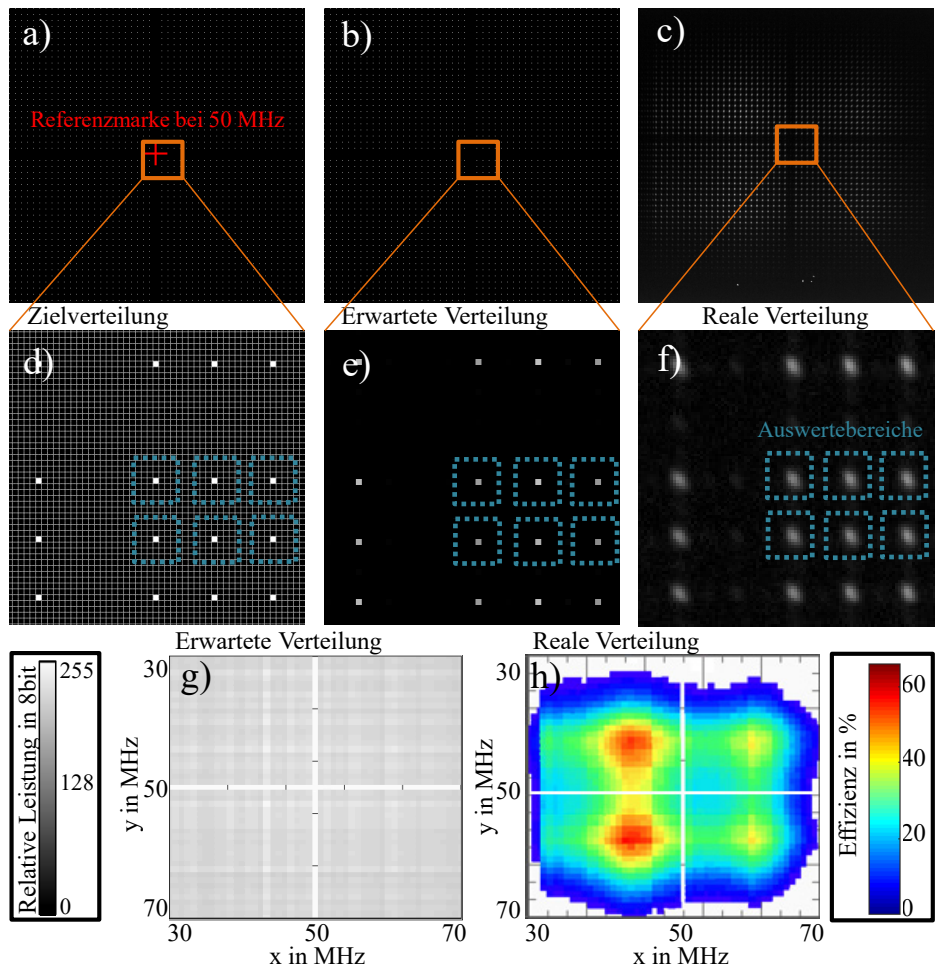


Bild 48: Bestimmung der winkelabhängigen Beugungseffizienz mit Strahlformung. Die Zielverteilung a) und die Vergrößerung daraus d) hat eine homogene Verteilung. Hier hat jeder Pixel den Helligkeitswert 255. Durch die iterative Optimierung der Signalberechnung kommt es zu der erwarteten Verteilung b)+e) mit einer in g) dargestellten relativen Leistungsverteilung. Das technische System führt zu der gemessenen Verteilung c)+f) mit der im Experiment ermittelten Effizienzverteilung h). Für die Messungen ist sichergestellt worden, dass die Kamera nicht in Sättigung aufzeichnet. Kontrast und Helligkeit sind für die Darstellung hier optimiert worden.



# Literaturverzeichnis

- [1] Jenaer Lasertagung: Lasermaterialbearbeitung. Innovationen und Trends. DVS-Berichte, Band 288. Düsseldorf: DVS Media 2012.
- [2] Negel, J.-P., Loescher, A., Voss, A., Bauer, D., Sutter, D., Killi, A., Ahmed, M. A. u. Graf, T.: Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ), 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm. *Optics Express* 23 (2015) 16, S. 21064–21077.
- [3] IPG Photonics: Datenblatt YLPP-R Series Ytterbium Picosecond Fiber Lasers, 2017.  
<https://www.ipgphotonics.com/de/products/lasers/pico-femtosecond-fiber-lasers/1-03-1-06-micron/ylpp-r-series>, abgerufen am: 06.04.2018.
- [4] Bruening, S., Hennig, G., Eifel, S. u. Gillner, A.: Ultrafast Scan Techniques for 3D- $\mu\text{m}$  Structuring of Metal Surfaces with high repetitive ps-laser pulses. *Lasers in Manufacturing - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing* 12 (2011), S. 105–115.
- [5] Häfner, T., Reg, Y., Hetzner, H. u. Schmidt, M.: Microstructuring Tools for Sheet Metal Bulk Forming - a designated application for picosecond laser. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 8 (2013) 1, S. 39–44.
- [6] Ancona, A., Döring, S., Jauregui, C., Röser, F., Limpert, J., Nolte, S. u. Tünnermann, A.: Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers. *Optics letters* 34 (2009) 21, S. 3304–3306.
- [7] König, J., Nolte, S. u. Tünnermann, A.: Plasma evolution during metal ablation with ultrashort laser pulses. *Optics Express* 13 (2005) 26, S. 10597–10607.
- [8] Neuenschwander, B., Jaeggi, B., Schmid, M. u. Hennig, G.: Surface Structuring with Ultra-short Laser Pulses: Basics, Limitations and Needs for High Throughput. *Physics Procedia* 56 (2014), S. 1047–1058.
- [9] Cheng, J., Perrie, W., Edwardson, S. P., Fearon, E., Dearden, G. u. Watkins, K. G.: Effects of laser operating parameters on metals

- micromachining with ultrafast lasers. *Applied Surface Science* 256 (2009) 5, S. 1514–1520.
- [10] Lee, S., Yang, D. u. Nikumb, S.: Femtosecond laser micromilling of Si wafers. *Applied Surface Science* 254 (2008), S. 2996–3005.
- [11] Heberle, J., Klämpfl, F., Alexeev, I. u. Schmidt, M.: Ultrafast Laser Surface Structuring of Intraocular Lens Polymers. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 8 (2013) 1, S. 51–55.
- [12] Laskin, A. u. Laskin, V.:  $\pi$ Shaper – Refractive Beam Shaping Optics for Advanced Laser Technologies. *Refractive Beam Shaping Optics for Advanced Laser Technologies. Journal of Physics: Conference Series* 276 (2011) 1.
- [13] Veldkamp, W. B.: Technique for generating focal-plane flattop laser-beam profiles. *Review of Scientific Instruments* 53 (1982), S. 294–297.
- [14] Paivasaari, K., Kaakkunen, J., Kuittinen, M. u. Jaaskelainen, T.: Enhanced optical absorptance of metals using interferometric femtosecond ablation. *Optics Express* 15 (2007) 21, S. 13838.
- [15] Mercier, B., Rousseau, J. P., Jullien, A. u. Antonucci, L.: Nonlinear beam shaper for femtosecond laser pulses, from Gaussian to flat-top profile. *Optics Communications* 283 (2010) 14, S. 2900–2907.
- [16] Erwin Steiger, Scharnagl, M., Kemnitzer, M. u. Laskin, A.: Optimization of the Structuring Processes of CI(G)S Thin-Film Solar Cells with an Ultrafast Picosecond Laser and a Special Beam Shaping Optics. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)* (2016), S. 1292–1297.
- [17] Klein-Wiele, J.-H., Bekesi, J. u. Simon, P.: Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses. *Applied Physics A* 79 (2004), S. 775–778.
- [18] Installation und Inbetriebnahme: RTC5 PC-Interfacekarte Rev. 1.3 d, SCANLAB AG, Puchheim 2011.
- [19] Jaeggi, B., Neuenschwander, B., Zimmermann, M., Penning, L., deLoor, R., Weingarten, K. u. Oehler, A.: High-throughput and high-precision laser micromachining with ps-pulses in synchronized mode with a fast polygon line scanner. *Proc. of SPIE* 8967 (2014) 89670Q.
- [20] Ferreira, L.O.S. u. Moehlecke, S.: A silicon micromechanical galvanometric scanner. *Sensors and Actuators A: Physical* 73 (1999) 3, S. 252–260.

- [21] Gahagan, K. T., Gopalan, V., Robinson, J. M., Jia, Q. X., Mitchell, T. E., Kawas, M. J., Schlesinger, T. E. u. Stancil, D. D.: Integrated electro-optic lens/scanner in a LiTaO<sub>3</sub> single crystal. *Applied Optics* 38 (1999) 7, S. 1186–1190.
- [22] Bechtold, P., Bauer, D. u. Schmidt, M.: Beam Profile Deformation of Fs-laser Pulses During Electro-Optic Scanning with KTN Crystals. *Lasers in Manufacturing - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing* 39 (2012), S. 683–692.
- [23] Scrymgeour, D. A., Barad, Y., Gopalan, V., Gahagan, K. T., Jia, Q., Mitchell, T. E. u. Robinson, J. M.: Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO<sub>3</sub> fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning. *Applied Optics* 40 (2001) 34, S. 6236–6241.
- [24] Römer, G.R.B.E. u. Bechtold, P.: Electro-optic and Acousto-optic Laser Beam Scanners. *Physics Procedia* 56 (2014), S. 29–39.
- [25] Beck, R. J.: Adaptive Optics for Laser Processing. Dissertation. Edinburgh: Heriot-Watt Universität 2011.
- [26] Becker, T., Bifano, T. G., Lee, H., Miller, M., Bierden, P. A. u. Cornelissen, S.: MEMS spatial light modulators with integrated electronics. *Proc. of SPIE* 4983 (2003), S. 248–258.
- [27] Krulevitch, P. A., Bierden, P. A., Bifano, T., Carr, E., Dimas, C. E., Dyson, H., Helmbrecht, M. A., Kurczynski, P., Muller, R. S., Olivier, S. S., Peter, Y.-A., Sadoulet, B., Solgaard, O. u. Yang, E.-H.: MOEMS spatial light modulator development at the Center for Adaptive Optics. *Proc. of SPIE* 4983 (2003), S. 227–234.
- [28] Petra Welp: Festkörperlaser mit resonatorinterner Kompensation von Aberrationen durch adaptive Spiegel. Dissertation. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität 2008.
- [29] Matthews, M. J., Guss, G., Drachenberg, D. R., Demuth, J. A., Heebner, J. E., Duoss, E. B., Kuntz, J. D. u. Spadaccini, C. M.: Diode-based additive manufacturing of metals using an optically-addressable light valve. *Optics Express* 25 (2017) 10, S. 11788–11800.
- [30] Bañas, A. u. Glückstad, J.: Potential for GPC-based laser direct writing. *SPIE Proceedings*. SPIE 2016, S. 973809.
- [31] Thalhammer, G., Bowman, R. W., Love, G. D., Padgett, M. J. u. Ritsch-Marte, M.: Speeding up liquid crystal SLMs using overdrive with phase change reduction. *Optics Express* 21 (2013) 2, S. 1779–1797.

- [32] Heath, D. J., Mills, B., Feinaeugle, M. u. Eason, R. W.: Rapid bespoke laser ablation of variable period grating structures using a digital micromirror device for multi-colored surface images. *Applied Optics* 54 (2015) 16, S. 4984.
- [33] Mills, B., Feinaeugle, M., Sones, C. L., Rizvi, N. u. Eason, R. W.: Sub-micron-scale femtosecond laser ablation using a digital micromirror device. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23 (2013) 035005.
- [34] L. Brillouin: Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène. *Ann. Phys.* 1922 (1922) 17, S. 88–122.
- [35] P. Debye u. F.W. Sears: On the scattering of light by supersonic waves. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1932 (1932) 18, S. 409–414.
- [36] R. Lucas u. P. Biquard: Propriétés optiques des milieux solides et liquides soumis aux vibration élastiques ultra sonores. *J. Phys. Rad.* 1932 (1932) 3, S. 464–477.
- [37] Bechtold, P., Hohenstein, R. u. Schmidt, M.: Beam shaping and high-speed, cylinder-lens-free beam guiding using acousto-optical deflectors without additional compensation optics. *Optics Express* 21 (2013) 12, S. 14627–14635.
- [38] Bechtold, P., Schmidt, M. u. Cvecek, K.: Vorrichtung zur akustooptischen Umformung periodisch gepulster, elektromagnetischer Strahlung. BLZ Bayerisches Laserzentrum Gemeinnützige Forschungsgesellschaft mbH; Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2013) DE 10 2013 201 968 A1.
- [39] Trypogeorgos, D., Harte, T., Bonnin, A. u. Foot, C.: Precise shaping of laser light by an acousto-optic deflector. *Optics Express* 21 (2013) 21, S. 24837–24846.
- [40] Bechtold, P. u. Schmidt, M.: Ultraschnelle Strahlführung und -formung ultrakurzer Laserpulse mittels akustooptischer Deflektion. *Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik* (2014), S. 1–10.
- [41] Molecular Technology (MolTech) GmbH: Acousto-optic effect, 2016. [http://www.mt-berlin.com/frames\\_ao/descriptions/ao\\_effect.htm](http://www.mt-berlin.com/frames_ao/descriptions/ao_effect.htm), abgerufen am: 15.06.2018.
- [42] Bass, M. (Hrsg.): *Handbook of optics. Volume II Devices, Measurements, and Properties. Acousto-Optic Devices and Applications*, Bd. 5. New York: McGraw Hill 1995–2001.

- [43] Klein, W. R. u. Cook, B. D.: Unified Approach to Ultrasonic Light Diffraction. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* 14 (1967) 3, S. 123–134.
- [44] All About Bragg Angle Errors in AO Modulators & Deflectors. Application Note AN1022, ISOMET, Springfield, VA 2007.
- [45] Acousto-optic Modulation Application Note. AN0510, ISOMET, Springfield, VA 2005.
- [46] Saleh, Bahaa E. A. u. Teich, M. C.: *Fundamentals of photonics*. Wiley series in pure and applied optics. Hoboken, NJ, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience 2001.
- [47] Saleh, Bahaa E. A. u. Teich, M. C.: *Fundamentals of photonics*. acousto-optic. Wiley series in pure and applied optics. New York: Wiley 1991.
- [48] Tsai, T., McLeod, E. u. Arnold, C. B.: Generating Bessel beams with a tunable acoustic gradient index of refraction lens 2006, 63261F.
- [49] Duocastella, M. u. Arnold, C. B.: Enhanced depth of field laser processing using an ultra-high-speed axial scanner. *Applied Physics Letters* 102 (2013) 6.
- [50] Ting-Hsuan Chen, Romain Fardel u. Craig B. Arnold: Ultrafast z-scanning for high-efficiency laser micromachining. *Light: Science & Applications* (2018) 7.
- [51] McLeod, E., Hopkins, A. B. u. Arnold, C. B.: Multiscale Bessel beams generated by a tunable acoustic gradient index of refraction lens. *Optics Letters* 31 (2006) 21, S. 3155–3157.
- [52] Craig B. Arnold, Euan McLeod u. Alexandre Mermillod-Blondin: Tunable Acoustic Gradient Index of Refraction Lens and System (2012) US008194307B2.
- [53] Olivier, N., Mermillod-Blondin, A., Arnold, C. B. u. Beaulieu, E.: Two-photon microscopy with simultaneous standard and extended depth of field using a tunable acoustic gradient-index lens. *Optics Letters* 34 (2009) 11, S. 1684–1686.
- [54] Arnold, C. B., Theriault, C., Amrhein, D., Kang, S. u. Dotsenko, E.: Ultra-high-speed variable focus optics for novel applications in advanced imaging. *Proc. of SPIE* 10539 (2018).

- [55] Kaplan, A., Friedman, N. u. Davidson, N.: Acousto-optic lens with very fast focus scanning. *Optics Letters* 26 (2001) 14, S. 1078–1080.
- [56] Kirkby, P. A., Naga Srinivas, N.K.M. u. Silver, R. A.: A compact acousto-optic lens for 2D and 3D femtosecond based 2-photon microscopy. *Optics Express* 18 (2010) 13, S. 13721–13745.
- [57] Konstantinou, G., Kirkby, P. A., Evans, G. J., Naga Srinivas Nadella, K M, Griffiths, V. A., Mitchell, J. E. u. Angus Silver, R.: Dynamic wavefront shaping with an acousto-optic lens for laser scanning microscopy. *Optics Express* 24 (2016) 6, S. 6283–6299.
- [58] Akemann, W., Léger, J.-F., Ventalon, C., Mathieu, B., Dieudonné, S. u. Bourdieu, L.: Fast spatial beam shaping by acousto-optic diffraction for 3D non-linear microscopy. *Optics Express* 23 (2015) 22, S. 28191–28205.
- [59] Bechtold, P., Hohenstein, R. u. Schmidt, M.: Evaluation of disparate laser beam deflection technologies by means of number and rate of resolvable spots. *Optics letters* 38 (2013) 16, S. 2934–2937.
- [60] Weber, R., Graf, T., Berger, P., Onuseit, V., Wiedenmann, M., Freitag, C. u. Feuer, A.: Heat accumulation during pulsed laser materials processing. *Optics Express* 22 (2014) 9, S. 11312–11324.
- [61] Laumer, T.: Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen. Dissertation. Bericht aus dem Lehrstuhl für Photonische Technologien, LPT, Bd. 301. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag 2017.
- [62] Datenblatt DTSX-xx – DTSXY-xx, Spezifikation und technische Dokumentationen des Herstellers, AA optoelectronics, 2014.
- [63] Datenblatt, Spezifikation und technische Dokumentationen des Herstellers vom 2D akustischen Deflektor, Brimrose, 2016.
- [64] Pegasus Optik GmbH / Dr. Pape: lineare und nichtlineare Zerstörschwelle TeO<sub>2</sub> AOD. Email. Erlangen 2016.
- [65] Gallais, L. u. Commandré, M.: Laser-induced damage thresholds of bulk and coating optical materials at 1030 nm, 500 fs. *Applied optics* 53 (2014) 4, 186–196.
- [66] Beke, S., Sugioka, K., Midorikawa, K., Péter, Á., Nánai, L. u. Bonse, J.: Characterization of the ablation of TeO<sub>2</sub> crystals in air with

- femtosecond laser pulses. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (2010).
- [67] Anokin, E., Muhr, A., Bennett, A., Twitchen, D. u. Wit, H. de: Diamond optical components for high-power and high-energy laser applications. *SPIE Proceedings*. SPIE 2015, 93460T.
- [68] Zhu, G., Whitehead, D., Perrie, W., Allegre, O. J., Olle, V., Li, Q., Tang, Y., Dawson, K., Jin, Y., Edwardson, S. P., Li, L. u. Dearden, G.: Investigation of the thermal and optical performance of a spatial light modulator with high average power picosecond laser exposure for materials processing applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (2018) 9.
- [69] Kremer, Y., Léger, J.-F., Lapole, R., Honnorat, N., Candela, Y., Dieudonné, S. u. Bourdieu, L.: A spatio-temporally compensated acousto-optic scanner for two-photon microscopy providing large field of view. *Optics Express* 16 14, S. 10066–10076.
- [70] Uchida, N.: Optical Properties of Single-Crystal Paratellurite (TeO<sub>2</sub>). *Phys. Rev. B* (1971) 4(10), S. 3736–3745.
- [71] Iyer, V., Losavio, B. E. u. Saggau, P.: Compensation of spatial and temporal dispersion for acousto-optic multiphoton laser-scanning microscopy. In: Allgower, E. L. u. Georg, K. (Hrsg.): *Introduction to Numerical Continuation Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics 2003, S. 1–6.
- [72] Ngoi, B. A., Venkatakrisnan, K., Lim, L.E.N. u. Tan, B.: Angular dispersion compensation for acousto-optic devices used for ultrashort-pulsed laser micromachining. *Optics Express* 9 (2001) 4, S. 200.
- [73] Zeng, S., Lv, X., Zhan, C., Chen, W. R., Xiong, W., Jacques, S. L. u. Luo, Q.: Simultaneous compensation for spatial and temporal dispersion of acousto-optical deflectors for two-dimensional scanning with a single prism. *Optics Letters* 31 (2006) 8, S. 1091.
- [74] Smith, W. J.: *Modern optical engineering. The design of optical systems*. New York: McGraw-Hill 2000.
- [75] *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer 1992.

- [76] Beck, R. J., Parry, J. P., MacPherson, W. N., Waddie, A. J., Weston, N. J., Shephard, J. D. u. Hand, D. P.: Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining. *Optics Express* (2010) Vol. 18, No. 16, S. 17059–17065.
- [77] Gerchberg, R. W. u. Saxton, W. O.: A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures. *Optik* 1972 (1972) 35, S. 237–246.
- [78] Nolte, S., Momma, C., Jacobs, H., Tünnermann, A., Chichkov, B. N., Welleghausen, B. u. Welling, H.: Ablation of metals by ultrashort laser pulses. *Journal of the Optical Society of America B* 14 (1997) 10, S. 2716.
- [79] Arnaud, J. A., Hubbard, W. M., Mandeville, G. D., La Clavière, B. de, Franke, E. A. u. Franke, J. M.: Technique for fast measurement of gaussian laser beam parameters. *Applied optics* 10 (1971) 12, S. 2775–2776.
- [80] Chang, C., Xia, J., Yang, L., Lei, W., Yang, Z. u. Chen, J.: Speckle-suppressed phase-only holographic three-dimensional display based on double-constraint Gerchberg-Saxton algorithm. *Applied optics* 54 (2015) 23, S. 6994–7001.
- [81] Cvecek, K., Miyamoto, I., Adam, M. u. Schmidt, M.: Effects of Spherical Aberrations on Micro Welding of Glass using Ultra Short Laser Pulses. *Physics Procedia* 39 (2012), S. 563–568.
- [82] Deutschsprachige Gesellschaft für Intraokularlinsen-Implantation, I. u. R. C. (Hrsg.): Kongress der Deutschsprachigen Gesellschaft für Intraokularlinsen-Implantation, Interventionelle und Refraktive Chirurgie. Gießen: DGII 2015.
- [83] Bischoff, C., Jäger, E. u. Umhofer, U.: Beam Shaping Optics for Process Acceleration. *Laser Technik Journal* 12 (2015) 3, S. 53–57.
- [84] Vogler, D.: Beam Shaping and Simultaneous Exposure by Diffractive Optical Element in Laser Plastic Welding. AKL'12 - International Laser Technology Congress. Aachen 2012.
- [85] Pütsch, O., Stollenwerk, J., Kogel-Hollacher, M. u. Traub, M.: Annular beam shaping system for advanced 3D laser brazing. *Advanced Optical Technologies* 1 (2012) 5.

- [86] DIN EN ISO 13694:2016-08. *Optik und Photonik - Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für die Leistungs-(Energie-)dichteverteilung von Laserstrahlen* (2012).
- [87] Scholes, S., Kara, R., Pinnell, J., Rodríguez-Fajardo, V., Forbes, A.: Structured light with digital micromirror devices: a guide to best practice. *Optical Engineering* 59 (2019) 4, 041202.
- [88] Brown, B., Lohmann, A.: Complex Spatial Filtering with Binary Masks. *Applied Optics* 5 (1966) 6, 967.
- [89] Datenblatt Q1062-FSxxS-H, Spezifikation und technische Dokumentationen des Herstellers 0509, ISOMET.

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

Teilergebnisse und -inhalte der vorliegenden Arbeit wurden vom Autor schon in Einzelveröffentlichungen publiziert. Diese Publikationen sind im Folgenden aufgeführt.

- [A1] Strauß, J., Häfner, T., Dobler, M., Heberle, J., Schmidt, M.: *Evaluation and Calibration of LCoS SLM for Direct Laser Structuring with Tailored Intensity Distributions*. In: Physics Procedia 83, S. 1160–1169 (2016).
- [A2] Heberle, J., Bechtold, P., Strauß, J., Schmidt, M.: *Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners*, In: Proc. SPIE 9736, Laser-based Micro- and Nanoprocessing X, 97360L (2016).
- [A3] Baum, M., Bechtold, P., Strauß, J., Schmidt, M.: *Towards Dynamic Holographic Laser Beam Shaping*. In: JLMN-Journal of laser micro/nanoengineering 10 (2), S. 216–221 (2015).
- [A4] Häfner, T., Strauß, J., Roider, C., Heberle, J., Schmidt, M.: *Tailored laser beam shaping for efficient and accurate microstructuring*. In: Appl. Phys. A 124 (2), S. 385 (2018).
- [A5] Strauß, J., Vorndran, M., Heberle, J., Schmidt, M.: *IFTA Calculation of Frequency Patterns for Acousto Optical Laser Beam Shaping*. In: Proceedings of International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics #M1002 (2016).
- [A6] Strauß, J., Baum, M., Alexeev, I., Schmidt, M.: *Optical Trap Assisted Nanopatterning: Process Parallelization and Dynamic Structure Generation*. In: Journal of Laser Micro-/Nanoengineering 12(2), 86–90 (2017).
- [A7] Strauß, J., Heberle, J., Schmidt, M.: *Laserstrahlformung mit Akustooptik*, In: Mikroproduktion 18 (05), S. 48–52 (2018).

## Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [B1] Vorndran, Martin: *Precise shaping of laser light by an acousto-optic deflector*. Projektarbeit, Erlangen 2016.
- [B2] Bauer, Carolin: *Fast 3D Laser Beam Shaping by acousto-optic deflectors*. Bachelorarbeit, Erlangen 2016.
- [B3] Biaciu, Cosmin-Rudolf: *Lasermaterialbearbeitung mit akustooptischer Strahlformung*. Projektarbeit, Erlangen 2017.



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

|              |  |
|--------------|--|
| <b>FAPS</b>  | Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik    |
| <b>FMT</b>   | Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik                                  |
| <b>KTmfk</b> | Lehrstuhl für Konstruktionstechnik                                   |
| <b>LFT</b>   | Lehrstuhl für Fertigungstechnologie                                  |
| <b>LPT</b>   | Lehrstuhl für Photonische Technologien                               |
| <b>REP</b>   | Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen |

Band 1: Andreas Hemberger  
Innovationspotentiale in der  
rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme  
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe  
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität  
automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte  
Steuerungskonzepte  
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter  
Nutzungsgradsteigerung von  
Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik  
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
Aufbau von Modellen zur Lageregelung  
von Industrierobotern  
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss  
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-  
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-  
schneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz  
Modell zur datenbankgestützten Planung  
automatisierter Montageanlagen  
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-  
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele  
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von  
Planungssystemen in der Produktion  
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
Technologisch orientierte  
Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik  
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer  
Verteilte Planungssysteme zur  
Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung  
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam  
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-  
feinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen  
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines  
übereutektoiden verschleißfesten Stahls  
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.  
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann  
Untersuchungen zur Anlagen- und  
Prozeßdiagnostik für das Schneiden  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler  
Material- und Datenfluß in einer flexiblen  
Blechbearbeitungszelle  
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake  
Entwicklung eines rechnergestützten  
Diagnosesystems für automatisierte  
Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel  
Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte  
Arbeitsfolgenbestimmung  
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller  
Modellierung und Einsatz von  
Softwaresystemen für rechnergeführte  
Montagezellen  
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende  
Untersuchungen zum Biegeumforme mit  
elastischer Matrize  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid  
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern  
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer  
Multiprozessorsteuerung für  
kooperierende Industrieroboter in  
Montagezellen  
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer  
Entwicklung problemspezifischer  
Verfahrensketten in der Montage  
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr  
Beitrag zur optimalen  
Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief  
Untersuchungen zur Verfahrensfolge  
Laserstrahlschneiden und -schweißen  
in der Rohkarosseriefertigung  
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim  
Rechnerunterstützte Optimierung  
von Materialflußstrukturen in der  
Elektronikmontage durch Simulation  
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von  
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer  
Integrierte Informationsverarbeitung  
bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann  
Entwicklung einer  
CAD/CAM-Prozeßkette für die  
Herstellung von Blechbiegeteilen  
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann  
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen: Prozeßführung und  
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-  
beitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel  
Flexible Werkstattsteuerung mit  
objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch  
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur  
impliziten Geräteprogrammierung  
in Roboterzellen  
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther  
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-  
kationsverhaltens von Automatisierungs-  
geräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless  
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel  
Entwicklung und Einsatz eines Simula-  
tionsverfahrens für operative und  
strategische Probleme der  
Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann  
Operatives Fertigungscontrolling durch  
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-  
tungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra  
Entwicklung eines benutzerorientierten  
Werkstattprogrammiersystems für das  
Laserstrahlschneiden  
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels  
Modellierung und Optimierung von  
Montageanlagen in einem integrierten  
Simulationssystem  
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-  
der Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz  
Oberflächenfeinbearbeitung  
keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung  
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.  
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp  
Rechnerunterstützung bei Test und  
Schulung an Steuerungssoftware von  
SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch  
Wissensbasierte Unterstützung der  
Angebotsbearbeitung in der  
Investitionsgüterindustrie  
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp  
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim  
Schneiden mit einem gepulsten  
Nd:YAG-Laser  
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel  
Optische 3D-Konturerfassung und  
on-line Biegewinkelmessung mit  
dem Lichtschnittverfahren  
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt  
Modulares Planungssystem zur  
Optimierung der Elektronikfertigung  
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner  
Adaptive Diagnose in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann  
Beitrag zur automatisierten  
Handhabungsplanung komplexer  
Blechbiegeteile  
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf  
Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
Konzept zur rechnerintegrierten  
Materialversorgung in flexiblen  
Fertigungssystemen  
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska  
Wissensbasierte Analyse und  
Klassifizierung von Blechteilen  
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke  
Integrierte Entwicklung neuer  
Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
Sensorplanung und schnelle  
Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie  
Zeitbehandlung und  
Multimedia-Unterstützung in  
Feldkommunikationssystemen  
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.  
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
Reengineering in der Elektro- und  
Elektronikindustrie  
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn  
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung  
mit Excimerlasern - Systemkomponenten  
und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth  
Laserstrahlhartlöten mit  
Zweistrahltechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr  
Steuerung und Sensordatenintegration  
für flexible Fertigungszellen mit  
kooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer  
Berührungslose Formgebung mit  
Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz  
Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen von  
Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs  
Integration elektromechanischer  
CA-Anwendungen über einem  
STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm  
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand  
Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf  
Regelung der Laserstrahlleistung und  
der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser  
Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und  
Prozeßplanung  
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl  
Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto  
Transiente Prozesse beim  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl  
Erweiterte Informationsbereitstellung  
an offenen CNC-Steuerungen zur  
Prozeß- und Programmoptimierung  
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
Verbesserte Prozeßführung und  
Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim  
Spulenwickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes  
Technologieorientierte Bahnplanung  
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung  
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus  
Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer  
Adaptive Strahlführungen für  
CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber  
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler  
Schraubstationen in der  
automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf  
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen  
in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke  
Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller  
Automatisierte Demontagesysteme  
und recyclinggerechte Produktgestaltung  
elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner  
Kaltmassivumformung metallischer  
Kleinstteile – Werkstoffverhalten,  
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher  
Prozeß- und Systemtechnik zum  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind  
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-  
scher Eigenschaften von Feinblechen mit  
dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard  
Qualitätssteigerung in der  
Elektronikproduktion durch  
Optimierung der Prozeßführung  
beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh  
Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und  
Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn  
Meßeinrichtung zur Untersuchung  
der Wirkflächenreibung bei umformtech-  
nischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth  
Regelung der Fokusslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter  
Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo  
Development and Implementation of  
Hierarchical Control Structures of  
Flexible Production Systems Using High  
Level Petri Nets  
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt  
Effizienzsteigerung bei Demontage  
und Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte  
Produktgestaltung  
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz  
Modelle und effiziente Modellbildung  
zur Qualitätssicherung in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs  
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT  
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau  
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals  
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes  
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn  
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion  
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger  
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen  
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher  
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten  
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet  
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung  
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart  
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper  
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler  
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung  
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker  
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken  
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein  
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung  
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger  
Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach  
Beitrag zur rechnerunterstützten  
verursachungsgerechten  
Angebotskalkulation von Blechteilen  
mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach  
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung  
der Anschlußgeometrie elektronischer  
SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk  
Simulationsbasierte  
Lebensdauerprognose für Werkzeuge  
der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl  
Integriertes Simulationsdaten-Management  
für Maschinenentwicklung und  
Anlagenplanung  
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel  
Ermüdungsbruchversagen  
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle  
in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert  
Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen  
von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer  
Modulares Planungswerkzeug zum  
Produktionsmanagement in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige  
Flexible Formgebung von Blechen  
durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel  
Wissenschaftliche Methoden für die  
rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer  
Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel  
Kommunikationstechnische Integration  
der Prozeßebene in Produktionssysteme  
durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter  
Verfügbarkeitssteigerung von  
Werkzeugmaschinen durch Einsatz  
mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli  
Integration lokaler CAP-Systeme in  
einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -  
Prozeßparameter und Modelle zur  
Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-  
tion neuer Bauelementetechnologien in  
die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger  
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten  
alternativer Elektroniklote in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber  
Justieren vormontierter Systeme mit dem  
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi  
Analyse und Optimierung von Montage-  
systemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein  
Laserstrahlumformen von  
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung  
der Mikrostruktur und der mechanischen  
Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi  
Ein informationslogistisches  
Architekturkonzept zur Akquisition  
simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch  
Rationalisierung und ergonomische  
Optimierung im Innenausbau durch  
den Einsatz moderner  
Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt  
Prozeßregelung für das Laserstrahl-  
Punktschweißen in der Elektronikpro-  
duktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche  
Methoden zur technologieorientierten  
Programmierung für die  
3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel  
Prozeßkontrolle und -steuerung beim  
Laserstrahlschweißen mit den Methoden  
der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer  
Laserstrahlunterstützte Erzeugung  
metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die  
MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein  
Qualität laserstrahl-gefügter  
Mikroverbindungen elektronischer  
Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium  
für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich  
Simultanes Löten von Anschlußkontak-  
ten elektronischer Bauelemente mit  
Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann  
Erweiterung der Formgebungsgrenzen  
beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-  
satz prozessangepasster Platinen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch  
3 - D MID Technologie in der  
Automobilelektronik  
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl  
Fertigungsqualität und Umformbarkeit  
laserstrahlgeschweißter Formplatinen  
aus Aluminiumlegierungen  
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk  
Entwicklung eines konfigurierbaren  
Steuerungssystems für die flexible  
Sensorführung von Industrierobotern  
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendandk  
Neue Sensorik und Aktorik für  
Bearbeitungsköpfe zum  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis  
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-  
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-  
men, Trennen und Laserstrahlschweißen  
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und  
multimediale Präsentation  
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner  
Technische Umsetzung produktbezoge-  
ner Instrumente der Umweltpolitik bei  
Elektro- und Elektronikgeräten  
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier  
Strategien für einen produktorientierten  
Einsatz räumlicher spritzgegossener  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich  
Kostensimulation - Simulationsbasierte  
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer  
Produktionssysteme  
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny  
Innenhochdruck-Umformen von Blechen  
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-  
rungen bei erhöhter Temperatur  
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha  
Flexible Montageautomatisierung zur  
Komplettmontage flächenhafter Produkt-  
strukturen durch kooperierende  
Industrieroboter  
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth  
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und  
Verbindungstechnik für mechatronische  
Baugruppen  
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph  
Durchgängige simulationsgestützte  
Planung von Fertigungseinrichtungen der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah  
Simulationsbasierte Bestimmung der  
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das  
Blechbiegen  
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein  
Scherschneiden und Biegen metallischer  
Kleinstteile - Materialeinfluss und  
Materialverhalten  
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff  
Excimerlaserstrahlbiegen dünner  
metallischer Folien mit homogener  
Lichtlinie  
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach  
Rechnergestützte Anpassung von  
Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen  
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl  
System- und Prozeßtechnik für das  
simultane Lötten mit Diodenlaserstrah-  
lung von elektronischen Bauelementen  
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker  
Tribologische Eigenschaften keramischer  
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer  
Oberflächenendbearbeitung mittels  
Excimerlaserstrahlung  
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger  
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik  
durch innovative maschinenbauliche und  
regelungstechnische Ansätze  
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama  
Effizienzsteigerung in der Montage durch  
marktorientierte Montagestrukturen und  
erweiterte Mitarbeiterkompetenz  
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm  
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-  
wicklung von Konzepten und Methoden  
für die rechnerunterstützte Modellierung  
und Optimierung von komplexen  
Aktorsystemen in der Mikrotechnik  
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini  
Wirkmedienbasierte Blechumformung:  
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss  
von Werkstoff und Bauteilgeometrie  
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein  
Entwurf hochdynamischer Sensor- und  
Regelsysteme für die adaptive  
Laserbearbeitung  
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer  
Entwicklung prozessüberwachender  
Regelkreise für flexible  
Formgebungsprozesse  
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer  
Massivumformen metallischer Kleinst-  
teile bei erhöhter Prozesstemperatur  
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann  
Strategien zur nachhaltigen Optimierung  
von Qualität und Zuverlässigkeit in  
der Fertigung hochintegrierter  
Flachbaugruppen  
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock  
Biegeumformen mit  
Elastomerwerkzeugen Modellierung,  
Prozessauslegung und Abgrenzung des  
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling  
Qualifizierung einer Prozesskette zum  
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile  
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler  
Großserientauglichkeit trockenschmier-  
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im  
Presswerk Grundlegende Untersuchun-  
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-  
ten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto  
Solution Approaches for Planning of  
Assembly Systems in Three-Dimensional  
Virtual Environments  
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger  
Hochleistungssysteme für die Fertigung  
elektronischer Baugruppen auf der Basis  
flexibler Schaltungsträger  
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz  
Laserunterstütztes Biegen höchstfester  
Mehrphasenstähle  
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl  
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des  
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-  
Umformen von Blechen  
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus  
Plattformstrategien - Realisierung  
einer varianz- und kostenoptimierten  
Wertschöpfung  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser  
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-  
lyse und -modellierung  
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-  
turen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos  
Mechatronische Ansätze zur Optimie-  
rung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark  
Auslegung und Fertigung hochpräziser  
Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou  
Kollaboratives Engineering Management  
in der integrierten virtuellen Entwicklung  
der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann  
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick  
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi  
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods  
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp  
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel  
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl  
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo  
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang  
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß  
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker  
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten  
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer  
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse  
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht  
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge  
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß  
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen  
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch  
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten  
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber  
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick  
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht  
Werkstoffcharakterisierung und  
Prozessauslegung für die wirkmedienba-  
sierte Doppelblech-Umformung von  
Magnesiumlegierungen  
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl  
Stochastische Simulation zur Werkzeug-  
lebensdaueroptimierung und Präzisions-  
fertigung in der Kaltmassivumformung  
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi  
Innenhochdruck-Umformen verstärkter  
Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff  
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen  
beim Presshärten des höchstfesten  
Vergütungsstahls 22MnB5  
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez  
Simulationsgestützte Methoden zur  
effizienten Gestaltung von Lötprozessen  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze  
Automatisierte Montage von makrome-  
chatronischen Modulen zur flexiblen  
Integration in hybride  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
Grundlegende Untersuchungen zur  
experimentellen Ermittlung und zur  
Modellierung von Fließortkurven bei  
erhöhten Temperaturen  
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl  
Entwicklung, angepasste Herstellungs-  
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-  
rung von einsetzgerechten elektroni-  
schen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter  
Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera  
Prozesstechnische Untersuchungen  
zum Rührreibschweißen metallischer  
Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler  
Beschreibung und Modellierung  
des Werkstoffverhaltens von  
presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl  
Untersuchungen zur Erhöhung der  
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-  
druck-Umformung von flächigen Halb-  
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten  
Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller  
Modellierung eines nachfrageorientierten  
Produktionskonzeptes für mobile  
Telekommunikationsgeräte  
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf  
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-  
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-  
beitsprozessen in der Elektronikproduk-  
tion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich  
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-  
mung der optischen Prozessemissionen  
beim Laserstrahliefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf  
Entwicklung eines agentenbasierten  
Steuerungssystems zur  
Materialflussorganisation im  
wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster  
Laserdurchstrahlenschweißen  
transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
Rührreibschweißen von walzplattiertem  
Halbzeug und Aluminiumblech zur  
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-  
Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt  
Seriennahe Auslegung von Aluminium  
Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann  
Qualitative und quantitative Bewertung  
der Crashtauglichkeit von höchstfesten  
Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl  
Größeneffekte bei Biegeprozessen-  
Entwicklung einer Methodik zur  
Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud  
Effiziente Prozesskettenauslegung für das  
Umformen lokal wärmebehandelter und  
geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann  
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-  
schweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Kontaktzustand zwischen Werkstück  
und Werkzeug bei umformtechnischen  
Prozessen unter tribologischen  
Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer  
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner  
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler  
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti  
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke  
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke  
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte  
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam  
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery  
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch  
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion  
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald  
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan  
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner  
Beanspruchungsangepasste  
Kaltmassivumformwerkzeuge durch  
lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber  
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-  
sagens von Punktschweißverbindungen  
bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
Ein Ansatz zur Herstellung von  
pressgehärteten Karosseriekomponenten  
mit maßgeschneiderten mechanischen  
Eigenschaften: Temperierte Umform-  
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-  
simulation und funktionale Untersuchung  
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak  
Material Adapted Design of Cold Forging  
Tools Exemplified by Powder  
Metallurgical Tool Steels and Ceramics  
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz  
Beschleunigte Simulation des  
Laserstrahlumformens von  
Aluminiumblechen  
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm  
Prozessanalyse und -überwachung des  
Laserstrahlhartlötens mittels optischer  
Sensorik  
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper  
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-  
stoffen - Umformverhalten und Grenzen  
der Biegebarkeit  
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß  
Modellbasierte Prozessauslegung für  
die Kaltmassivumformung unter  
Brücksichtigung der Werkzeug- und  
Pressenauffederung  
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth  
Analyse und Optimierung der Entwick-  
lung und Zuverlässigkeit räumlicher  
Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler  
Ganzheitliche Automatisierung  
mechatronischer Systeme in der Medizin  
am Beispiel Strahlentherapie  
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert  
Automatisiertes Laserstrahllöten  
und -reparaturlöten elektronischer  
Baugruppen  
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr  
Analyse und Beschreibung des  
mechanischen Werkstoffverhaltens  
von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler  
Prozessdynamik beim  
Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche im Überlappstoß  
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger  
Seriennahe Auslegung der Prozesskette  
zur wärmeunterstützten Umformung  
von Aluminiumblechwerkstoffen  
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel  
Herstellung prozessangepasster  
Halbzeuge mit variabler Blechdicke  
durch die Anwendung von Verfahren  
der Blechmassivumformung  
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade  
In-vivo Monitoring of Epithelium  
Vessel and Capillary Density for the  
Application of Detection of Clinical  
Shock and Early Signs of Cancer Develop-  
ment  
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse  
Entwicklung und Qualifizierung eines  
Schneidclinchverfahrens  
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz  
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen  
technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm  
Einfluss von Chargenschwankungen  
auf die Verarbeitungsgrenzen von  
Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel  
Mikrostrukturelle und mechanisch-  
technologische Eigenschaften  
widerstandspunktgeschweißter  
Aluminium-Stahl-Verbindungen für  
den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann  
Konzept zur Beherrschung der  
Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit  
optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren  
auf die Wirbelstromverluste von  
Stator-Einzelzahnblechpaketen für  
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-  
zeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel  
Wirkmedienbasierte Umformung von  
Blechhalbzeugen unter Anwendung  
magnetorheologischer Flüssigkeiten als  
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen  
Simulative Prognose der Geometrie  
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-  
teile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil  
Versagensprognose bei der Prozess  
simulation von Biegeumform- und Falz-  
verfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl  
Flexible Automatisierung der  
Statorenmontage mit Hilfe einer  
universellen ambidexteren Kinematik  
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht  
Optimierte Fertigungstechnologien  
für Rotoren getriebeintegrierter  
PM-Synchronmotoren von  
Hybridfahrzeugen  
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch  
Planning and Production Concepts for  
Contactless Power Transfer Systems for  
Electric Vehicles  
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl  
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen  
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder  
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen  
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt  
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger  
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck  
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation  
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.  
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller  
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen  
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke  
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren  
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner  
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium  
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock  
Analyse und Regelung des Laserstrahliefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke  
Transiente physikalische Mechanismen  
bei der Laserablation von dünnen  
Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz  
Community-basierte Optimierung des  
Anlagenengineerings  
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen  
Qualifizierung des Potentials von  
Verfestigungseffekten zur Erweiterung  
des Umformvermögens aushärtbarer  
Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert  
Erweiterung und Verbesserung von Ver-  
suchs- und Auswertetechniken für die  
Bestimmung von Grenzformänderungs-  
kurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus  
Erstellung eines Werkstofforientierten  
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung  
des Formgebungsvermögens von Alumi-  
niumlegierungen unter Anwendung einer  
zwischen geschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec  
Untersuchungen zur Herstellung von  
funktionsoptimierten Bauteilen im  
partiellen Presshärtprozess mittels lokal  
unterschiedlich temperierter Werkzeuge  
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Verschleißcharakterisierung beschichte-  
ter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela  
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-  
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-  
fungsoptimierung und Fehlerdetektion  
an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland  
Entwicklung einer Methode zur Prognose  
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen  
für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm  
Strukturierte additive Metallisierung  
durch kaltaktives  
Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner  
Herstellung beanspruchungsangepasster  
Aluminiumblechhalbzeuge durch  
eine maßgeschneiderte Variation der  
Abkühlgeschwindigkeit nach  
Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas  
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit  
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim  
Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum  
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles  
for the Generation of Thin Conductive  
Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider  
Umformtechnische Herstellung  
dünnwandiger Funktionsbauteile  
aus Feinblech durch Verfahren der  
Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof  
Sematische Modellierung automatisierter  
Produktionssysteme zur Verbesserung  
der IT-Integration zwischen Anlagen-  
Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöllner  
Erarbeitung von Grundlagen zur  
Abbildung des tribologischen Systems  
in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler  
Einsatz technologischer Versuche zur  
Erweiterung der Versagensvorhersage  
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten  
Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning  
Integration des Systemverhaltens von  
Automobil-Hochvoltleitungen in die  
virtuelle Absicherung durch  
strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl  
Automatisierte Datenerfassung für  
diskret ereignisorientierte Simulationen  
in der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold  
Mikroschockwellenumformung mittels  
ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger  
Laserstrahlschweißen thermoplastischer  
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl  
Methods-Energy Measurement - Eine  
Methode zur Energieplanung für  
Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow  
Erweiterung des Unternehmenscontrol-  
lings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung zyklisch-symmetrischer  
Bauteile mit Nebenformelementen durch  
Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann  
Beitrag zur Untersuchung der  
tribologischen Bedingungen in der  
Blechmassivumformung - Bereitstellung  
von tribologischen Modellversuchen und  
Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner  
Methodik zur virtuellen Absicherung  
der formgebenden Operation des  
Nasspressprozesses von  
Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein  
Der grundoperationsspezifische  
Mindestenergiebedarf als Referenzwert  
zur Bewertung der Energieeffizienz in  
der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis  
Thermisch unterstützte Umformung von  
Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel  
Flexible Systems for Permanent  
Magnet Assembly and Magnetic Rotor  
Measurement / Flexible Systeme zur  
Montage von Permanentmagneten und  
zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis  
Schädigungs- und Versagensverhalten  
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter  
Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozessverhalten von Silizium als  
Werkzeugwerkstoff für das  
Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck  
Zeitliche Pulsformung in der  
Lasermikromaterialbearbeitung –  
Grundlegende Untersuchungen und  
Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto  
Mechatronic Simulation Approach for  
the Process Planning of Energy-Efficient  
Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel  
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik  
für verteilte Wicklungen im  
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung  
montageführender Werkerinformations-  
systeme simultan zum  
Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus  
Hochpräzise adaptive Steuerung und  
Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer  
Erzeugung von thermoplastischen  
Werkstoffverbunden mittels simultanem,  
intensitätsselektivem  
Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger  
Untersuchung einer thermisch unter-  
stützten Fertigungskette zur Herstellung  
umgeformter Bauteile aus der höherfes-  
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin  
Design of Manufacturing Processes for  
the Cold Bulk Forming of Small Metal  
Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy  
Experimental Investigation, Modeling,  
Simulation and Optimization of Molded  
Interconnect Devices (MID) Based on  
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-  
mentelle Untersuchung, Modellierung,  
Simulation und Optimierung von Molded  
Interconnect Devices (MID) basierend  
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren  
für flachleiterbasierte  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner  
Charakterisierung und Modellierung  
des spannungszustandsabhängigen  
Werkstoffverhaltens der Magnesium-  
legierung AZ31B für die numerische  
Prozessauslegung  
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar  
A reliable methodology to deduce  
thermo-mechanical flow behaviour of  
hot stamping steels  
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler  
Steuerung von Blechmassivumformpro-  
zessen durch maßgeschneiderte  
tribologische Systeme  
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller  
Untersuchung des kombinierten Trenn-  
und Umformprozesses beim Fügen art-  
ungleicher Werkstoffe mittels  
Schneidlinchverfahren  
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-  
technologie für integrierte Leistungs-  
module in harschen Umgebungs-  
bedingungen  
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc  
Eine Simulationsmethode für das  
3-Rollen-Schubbiegen  
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer  
Arbeitsraumüberwachung und autonome  
Bahnplanung für ein sicheres und  
flexibles Roboter-Assistenzsystem  
in der Fertigung  
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer  
Der Einfluss von Poren auf die  
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen  
von Hochleistungs-Leuchtdioden  
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.  
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeuoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz  
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagertähle für die Wärmebehandlungssimulation  
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl  
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile  
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm  
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz  
Intralogs Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner  
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann  
Modellbasierte Zustands- und Prozess-  
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-  
sischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozess- und Werkstoffverhalten bei  
schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier  
Ganzheitliches ontologiebasiertes  
Wissensmanagement im Umfeld der  
industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr  
Datenerfassung für die Anwendung  
lernender Algorithmen bei der Herstel-  
lung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener  
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-  
verzahnten Zahnradern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng  
Numerische, analytische und empirische  
Modellierung des Heißscrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses  
zur Verbesserung der tribologischen  
Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti  
Evaluation of failure behaviour  
of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung hochfester Aluminiumblech-  
bauteile in einem kombinierten Umform-  
und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner  
Automatische Bahnplanung für die Auf-  
teilung von Prozessbewegungen in syn-  
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-  
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter  
Qualifizierung des Montageprozesses  
hochminiaturisierter elektronischer Bau-  
elemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend  
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen  
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.  
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert  
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung  
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander  
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten  
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz  
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen  
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona  
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle  
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann  
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014  
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner  
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung  
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel  
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe  
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel  
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern  
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle  
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation  
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf  
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen  
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari  
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production  
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand  
Prozessübergreifende Analyse komplexer  
Montageprozessketten mittels  
Data Mining  
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl  
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-  
ported Hybrid Compensation System for  
Improving the Power Quality in Medium  
Voltage Networks  
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2  
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger  
Additive Fertigung polymerer optischer  
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren  
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter  
Modellierung von Vorentwürfen in der  
virtuellen Realität mit natürlicher  
Fingerinteraktion  
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer  
Oberflächenmodifizierung und Entwick-  
lung einer Auswertemethodik zur Ver-  
schleißcharakterisierung im Presshär-  
teprozess  
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer  
Web- und wissensbasierter Engineering-  
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-  
matisierungslösungen  
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25  
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross  
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-  
basierten kryogenen Minimalmengen-  
schmierung  
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker  
Qualifizierung laser-additiv gefertigter  
Komponenten für den Einsatz im Werk-  
zeugbau der Massivumformung  
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied  
Totally Integrated Ecology Management  
for Resource Efficient and Eco-Friendly  
Production  
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein  
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine  
Analysestrategie zur Bestimmung des  
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-  
verhaltens von Nadelkränzen –  
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,  
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf  
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie  
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl  
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik  
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen  
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren  
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian  
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte  
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß  
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.  
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

## Abstract

This work addresses the issue of fast energy distribution relative to a workpiece when laser material processing. Therefore, available technologies are evaluated by their dynamic by the data transfer rate. This rate is the number of resolvable spots per unit time the system can generate. The idea of beam shaping using the acousto-optic effect shows the highest data transfer rate. This idea was caught up in this thesis and a new technology for laser beam shaping is presented. The innovation of this new technology is the calculation of the signals necessary for the acousto-optic laser beam shaping (AOS). An Iterative-Fourier-Transformation-Algorithm for producing efficient laser beam shaping has been developed within this work. First, the thesis deals with the general features of the AOS-technology: switching rate, maximum applicable laser power and restrictions for the achievable intensity distributions. Moreover, hardware to apply this technology with multi-kW-lasers is commercially available. These characteristics make AOS nearly universally applicable with all kind of laser sources in pulsed and continuous wave (cw) operations.

Im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit wurden Systeme für die Strahlführung und -formung von Laserstrahlen hinsichtlich ihrer Dynamik anhand der Datenübertragungsrate bewertet und verglichen. Die Datenübertragungsrate ist die Anzahl an Strukturpunkten pro Zeiteinheit, die mit einem System erzeugt werden kann. Es zeigt sich dabei, dass eine Strahlformung mit akustooptischem Effekt die höchsten Datenübertragungsraten ermöglicht und somit ein enormes Potential birgt. Dieser Idee wurde in vorliegender Arbeit nachgegangen und so eine neue Technologie für die Laserstrahlformung bei der Materialbearbeitung erforscht. Die Innovation besteht hier in der Berechnung der Signale, die für die akustooptische Laserstrahlformung (AOS) notwendig sind. Im Rahmen dieser Arbeit ist hierfür ein Iterativer-Fourier-Transformations-Algorithmus entwickelt worden, mit dem eine effiziente Strahlformung erreicht wird. Diese Arbeit befasst sich mit der AOS-Technologie zuerst im Allgemeinen: So werden die Umschaltrate, die Leistungsgrenzen für den Einsatz dieser Technologie und die Einschränkungen für die erreichbaren Intensitätsverteilungen in der Bearbeitungsebene aufgezeigt. Gerätschaften, die für diese Technologie kommerziell erhältlich sind, können dabei mit mehreren tausend Watt Laserleistung betrieben werden. Damit ist die AOS nahezu unbegrenzt mit Strahlquellen im kontinuierlichen Betrieb und auch im Pulsbetrieb einsetzbar.

