

# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Motivation</i>	9
1.2 <i>Aufgabenstellung</i>	10
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Lasermikrostrukturierung mit Scanner</i>	11
2.2 <i>Abtragen des selben Materials mittels fs-Laserstrahlung</i>	13
<b>3 Versuchsaufbau</b>	<b>14</b>
3.1 <i>Laser</i>	14
3.1.1 <i>Lasieranlagen</i>	14
3.1.2 <i>Prinzipieller Aufbau des Faserlasers</i>	15
3.1.3 <i>Galvanometer-Scanner</i>	17
3.1.4 <i>Polygonspiegelscanner</i>	18
3.2 <i>Proben</i>	19
3.2.1 <i>Probenmaterial</i>	19
3.2.2 <i>Probenhalterung</i>	21
<b>4 Grundlagen</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Laserstrahlung-Material-Wechselwirkung</i>	23
4.2 <i>Mechanismus des Laserabtrags</i>	24
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>26</b>
5.1 <i>Untersuchungen mit 1064 nm cw-Laser</i>	26
5.1.1 <i>Versuche mit materialeitiger Bestrahlung mit einem Durchlauf</i>	29
5.1.2 <i>Versuche mit materialeitiger Bestrahlung mit mehreren Durchläufe</i>	33
5.1.3 <i>Versuche mit substratseitiger Bestrahlung</i>	37

---

5.2	<i>Untersuchungen mit 1064 nm ns-Pulslaser</i> .....	39
5.2.1	Pulsabtrag mit materialeitiger Bestrahlung .....	40
5.2.2	Pulsabtrag mit substratseitiger Bestrahlung .....	42
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>44</b>
<b>Index</b>	.....	<b>45</b>
<b>Literatur</b>	.....	<b>47</b>
<b>Anlagen</b>	.....	<b>51</b>
<b>Anlagen, Teil 1</b>	.....	<b>A-Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>		

# Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: REM-Aufnahmen von durch aneinander reihen von Linienscans erzeugten Strukturen (Linienabstand: a) 86  $\mu\text{m}$ , b) 84  $\mu\text{m}$ ; Grabenbreite: a), b) 70  $\mu\text{m}$ ; Tiefe: a) 20  $\mu\text{m}$ , b) 45  $\mu\text{m}$ ; Stegbreite: a) 16  $\mu\text{m}$ , b) 14  $\mu\text{m}$ ; Wiederholungen: a) 2, b) 4) aus [6]
- Abbildung 2: a) REM-Aufnahme einer Spiralstruktur (Laserfluenz: 360mJ/cm<sup>2</sup>, Pulswiederholffrequenz: 300 Hz, 6 Wiederholungen), Stegbreite: 10  $\mu\text{m}$ , Grabentiefe: 80  $\mu\text{m}$ ; b) Detailansicht der schräge Bodenfläche im Eckbereich aus [6]
- Abbildung 3: Abtrag der Silberleitbahn mittels fs-Laserstrahlung; Pulsdauer von 235 fs; Pulswiederholungsfrequenz von 1000 kHz; Pulsabstand von 5  $\mu\text{m}$ ; Scangeschwindigkeit von 5000 mm/s; Pulsenergie von 14,77  $\mu\text{J}$ ; Streckenenergie von 14 J/m; Intensität von 6,24 TW/cm<sup>2</sup>
- Abbildung 4: Grunddarstellung des Aufbaus einer Doppelmantel-Faser aus [7]
- Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers aus [7]
- Abbildung 6: Prinzipielle Aufbau eines Galvanometer-Scanners aus [10]
- Abbildung 7: Schematische Darstellung von Galvanometer-Scanner in der Materialbearbeitung aus [11]
- Abbildung 8: links: Funktionsweise eines Polygon-Galvanometer-Scanners aus [12]; rechts: Aufbau vom Polygonspiegelscanner UscaX-2D (Mod. 2017) aus [13]
- Abbildung 9: Bilder von Polygonspiegelscanner an der LHM Hochschule Mittweida aus [13]
- Abbildung 10: Strukturformel und Summenformel der Wiederholeinheit von Polyethylnaphthalat aus [14]
- Abbildung 11: Struktur der Probe
- Abbildung 12: Probe befestigt mit Probenhalter aus Klammern und Trägerplatte
- Abbildung 13: Skizzen der Positionierung der Proben von den zwei Versuchsvarianten; a) materialeitige Bestrahlung; b) substratseitige Bestrahlung
- Abbildung 14: Schema für den Materialabtrag mittels Laserstrahl aus [22]

- Abbildung 15: Einteilung der Kategorien für den Abtrag der Silberleitbahnschicht
- Abbildung 16: Einteilung der Kategorien für den Angriff auf PEN-Substrat
- Abbildung 17: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit
- Abbildung 18: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit
- Abbildung 19: Fast kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne direkte Beschädigung von PEN-Substrat ( $P = 1600W$  ,  $v = 400m/s$  ,  $fz = +1,0$  mm ,  $I = 14,41$  MW/cm<sup>2</sup> , Linienanzahl = 1)
- Abbildung 20: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit im kleinen Intensitätsbereich
- Abbildung 21: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit im kleinem Intensitätsbereich
- Abbildung 22: Nur leichter Abtrag von der Silberleitbahnschicht, Beschädigung von PEN beobachtbar ( $P = 3000W$  ,  $v = 100m/s$  ,  $fz = +6,5$  mm ,  $I = 0,66$  MW/cm<sup>2</sup> , Linienanzahl = 1)
- Abbildung 23: Fast Kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht mit 200 m/s Scangeschwindigkeit ohne Schädigung zum PEN-Substrat zu beobachten ( $P = 900W$  ,  $v = 200m/s$  ,  $fz = +2,0$  mm ,  $I = 2,07$  MW/cm<sup>2</sup> , Linienanzahl = 1)
- Abbildung 24: Ergebnisse nach: a) einem, b) zwei, c) drei Durchlauf bzw. Durchläufe der Strahlung; d) Vergrößerung von a), Darstellung von den wellenförmigen Spurränder ( $P = 1000W$  ,  $v = 500m/s$  ,  $fz = +1,5$  mm ,  $I = 4,06$  MW/cm<sup>2</sup>)
- Abbildung 25: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit verschiedenen Durchläufe
- Abbildung 26: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit verschiedenen Durchläufe
- Abbildung 27: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit Bestrahlung auf der unterer Seite der Probe
- Abbildung 28: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit Bestrahlung auf der unterer Seite der Probe

- Abbildung 29: Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne Schädigung zum PEN-Substrat; a) Ablagerung von Schmelze deutlich beobachtbar; b) Schmale und parallele Abtragspuren zu beobachten ( a)  $P = 500\text{W}$  ,  $v = 300\text{m/s}$  ,  $f_z = +1,0\text{ mm}$  ,  $I = 4,50\text{ MW/cm}^2$  , Linienanzahl = 1; b)  $P = 1200\text{W}$  ,  $v = 500\text{m/s}$  ,  $f_z = +1,0\text{ mm}$  ,  $I = 10,80\text{ MW/cm}^2$  , Linienanzahl = 1 )
- Abbildung 30: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer
- Abbildung 31: Beispiele von starker (links) und keine (rechts) Beschädigung von PEN
- Abbildung 32: Darstellung vom Abtrag von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Pulsdauer
- Abbildung 33: Leichter Abtrag der Leitbahnschicht bei 60 ns Pulsdauer mit max. mittlerer Leistung ( $\tau=60\text{ ns}$ ,  $E_P = 5\text{ mJ}$ ,  $I=26,936\text{ GM/cm}^2$ )
- Abbildung 34: Fast Kompletter Abtrag der Leitbahnschicht bei 120 ns (obenlinks  $E_P = 1\text{ mJ}$ ,  $I=2,694\text{ GM/cm}^2$ ) und 240 ns (obenrechts  $E_P = 1\text{ mJ}$ ,  $I=1,347\text{ GM/cm}^2$ ) Pulsdauern mit min. mittlerer Leistung; kleine schwarze Fläche; keine direkte Schädigung von PEN an den bestrahlten Stellen beobachtbar (unten)
- Abbildung 35: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer
- Abbildung 36: Darstellung vom Abtrag von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Pulsdauer
- Abbildung 37: links: Beeinflusste Spur; rechts: schwarze angegriffene Fläche in der Mitte
- Abbildung 38: links: kreisförmige Spur nach dem Abtragen ( $\tau = 120\text{ ns}$ ,  $E_P = 5\text{ mJ}$ ,  $I=13,468\text{ GM/cm}^2$ ); rechts: durch Wegblasen entstandene Risse ( $\tau = 120\text{ ns}$ ,  $E_P = 7\text{ mJ}$ ,  $I=18,855\text{ GM/cm}^2$ )
- Abbildung 39: Abtrag mit materialseitiger Bestrahlung mit steigender Intensität bei 400 m/s und 500 m/s Scangeschwindigkeit; keine direkte Beschädigung von PEN ( $f_z = + 1\text{ mm}$ , Linienanzahl = 1)
- Abbildung 40: Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung mit steigender Intensität bei 300 m/s und 400 m/s Scangeschwindigkeit; keine direkte Beschädigung von PEN ( $f_z = + 1\text{ mm}$ , Linienanzahl = 1)

Abbildung 41: Einzelpulsabtrag mit materialseitiger und substratseitiger Bestrahlung mit steigender Pulsdauer; keine direkte Beschädigung von PEN ( $I = 2,694 \text{ GW/cm}^2$ )

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1:       Eigenschaften des verwendeten cw-Lasers
- Tabelle 3:       Eigenschaften des verwendeten ns-Pulslasers
- Tabelle 3:       Eigenschaften der Materialien aus [15,16,17,18,19,20,21]

## Abkürzungsverzeichnis

<b>FPC</b>	Flexible Printed Circuit (flexible Leiterplatten)
<b>cw</b>	Continuous Wave (Dauerstrich)
<b>I(r)</b>	Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von r
<b>I<sub>0</sub></b>	Auf der Materialoberfläche fallende Intensität
<b>α</b>	Material- und wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten
<b>r</b>	Eindringtiefe
<b>w<sub>0</sub></b>	Fokusradius
<b>f</b>	Brennweite der Linse
<b>M<sup>2</sup></b>	Beugungsmaßzahl
<b>w<sub>vor</sub></b>	Strahlradius vor der Linse
<b>P<sub>AV</sub></b>	Mittlere Laserleistung
<b>E<sub>s</sub></b>	Streckenenergie
<b>P</b>	Strahlleistung
<b>v</b>	Bearbeitungsgeschwindigkeit/ Scann-Geschwindigkeit
<b>fz</b>	Abstand der Fokusslage zur Probenoberfläche
<b>I</b>	Intensität der Laserstrahlung
<b>PEN</b>	Polyethylenaphthalat
<b>λ</b>	Wellenlänge
<b>Ra</b>	Rauigkeit
<b>fs</b>	Femtosekunde
<b>ns</b>	Nanosekunde
<b>FBG</b>	Faser-Bragg-Gittern
<b>LD</b>	Laserdioden
<b>ρ</b>	Dichte



---

<b>n</b>	Brechungsindex
<b>k</b>	Extinktionskoeffizient
<b>T<sub>s</sub></b>	Schmelztemperatur
<b>T<sub>v</sub></b>	Verdampfungstemperatur
<b>Q<sub>s</sub></b>	Schmelzwärme
<b>Q<sub>v</sub></b>	Verdampfungswärme
<b>A</b>	Absorptionsgrad
<b>T</b>	Transmissionsgrad
<b>d</b>	Dicke



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In den letzten Jahren finden flexible Leiterplatten in viele Bereiche immer öfter Verwendung, z.B. in der Telekommunikation, der Sensortechnik, im Maschinenbau und der Luft- und Raumfahrt [1]. Als wichtige Vorteile hat FPC im Vergleich zu starren Leiterplatten geringes Gewicht und dynamische und mechanische Biegebelastbarkeit und realisiert dadurch kompakten, komplexen, raum- und gewichtsminimierenden Aufbauten [2].

Bei heutiger Herstellung von FPC mittels verschiedener Herstellprozesse liegt das Problem, dass beim drucktechnischen Auftrag in einzelnen Schichten das Material nicht wie beabsichtigt aufgebracht wird. Die häufigen Fehler sind, dass an manchen Stellen nicht genug Material aufgetragen wird oder an manchen Stellen zu viel Material aufgetragen wird und als Folge zu unerwünschten Verbindungen zwischen isolierten Bereichen führt.

Um die Funktionsbauteile und Produkte fehlerfrei herzustellen, ist es jetzt ein neuartiges Qualitätssicherungsverfahren für flexible Substrate im Produktionsprozess zu entwickeln. In diesem Qualitätssicherungsprozess soll erst die Qualität des Materialauftrags optisch analysiert werden und dann sind die entstehenden Fehler innerhalb der Herstellprozesse zu korrigieren, sodass die beabsichtigte Geometrie des Materialauftrags mit der Erzielten übereinstimmt. Die Korrigierung enthält hauptsächlich zwei Schritte: das fehlende Material aufzutragen und das überschüssige Material abzutragen.

Schichtabtrag mittels Laser bietet ein berührungsloses, flexibles, selektives, präzises und schnelles Abtragsverfahren an, was möglicherweise auch in dem Qualitätssicherungsprozess bei der FPC-Herstellung eingesetzt werden sollte. Beim Einsatz von ultrakurzen Laserpulsen mit Pulsdauern unterhalb weniger Piko-sekunden oder sogar im Femtosekundenbereich zur Mikromaterialbearbeitung lassen sich die thermischen oder mechanischen Schäden wegen der kurzen Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie minimieren bzw. vermeiden [3].

Am Laserinstitut der Hochschule Mittweida wurde es schon untersucht, Silberleitbahnen auf Kunststoffsubstrat mit Kurz- und Ultrakurzpulslasern abzutragen. Und es wurde verifiziert, dass ein Abtrag der Silberleitbahn mittels Femtosekunden-Laserpulsen mit einer Wellenlänge von 1064 nm ohne Beeinflussung der Trägerfolie möglich ist. Sinnvoll ist es auch, was auch das Hauptziel dieser Arbeit entspricht, dass Untersuchungen mit längeren Nanosekunden-Laserpulsen und auch cw-Lasern durchzuführen, um eine günstigere Variante auszusuchen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war Verifizierung von Laserquellen zum Abtrag von parasitären Schichten. Es war Untersuchungen mit verschiedenen Laserquellen durchzuführen, um zu einer besten Qualität des Abtrages zu kommen.

Die Proben sind flexible PCB aus gedruckten ungesinterten Silberleitbahnen auf PEN-Substrat. Die Silberleitbahn sollte mittels Laser-Ablation abgetragen werden und die Trägerfolie aus PEN darf dabei nicht oder nur geringfügig geschädigt werden. Der Abtrag der Silberleitbahnen muss so folgen, dass die elektrischen Verbindungen an den bearbeiteten Stellen nach dem Abtragsprozess komplett getrennt werden.

In den Untersuchungen sollten die Ergebnisse diskutiert und ausgewertet werden. Die Schwellen für Abtrag von den Silberleitbahnen und auch für Beschädigung von der Trägerfolie waren zu analysieren und die für den Abtrag der Silberleitbahnschicht geeigneten Laserparameter sollten dabei ermittelt werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Lasermikrostrukturierung mit Scanner

Die Lasermikrobearbeitung ist ein technisches Verfahren, das sich besonders für die schnelle Bearbeitung verschiedenster Materialien eignet. Insbesondere die Bearbeitung mit einem Ultrakurzpuls-Laser garantiert eine hervorragende Qualität bei hoher Präzision. Dieses Verfahren der Lasermikrobehandlung ist aufgrund kurzer Bearbeitungszeiten besonders günstig.

Ultrakurzpuls-Laser sind universelle Werkzeuge für die Bearbeitung von nahezu allen festen Werkstoffen. Diese Laser sind hochflexibel einsetzbar und erzeugen hochpräzise und beständige Strukturen bei minimalen thermischen und mechanischen Schäden [4,5].

Maskenprojektionstechnik ist eine Möglichkeit, mit der Mikrostrukturen mittels Laserpulsabtrag erzeugt werden können. Bei dem Verfahren wird eine Maske mit dem Laser bestrahlt und ihre Struktur verkleinert auf die Probe abgebildet. Dadurch kann eine komplizierte Struktur mit einem einzigen Laserpuls auf die Probe übertragen werden. Die Nachteile von diesem Verfahren ist jedoch, dass für jede unterschiedliche Struktur eine spezielle Maske benötigt wird.

Bei der Lasermikrostrukturierung mit Scanner wird nur eine einfache Maske (quadratisch, rechteckig, kreisförmig) verwendet und die Struktur durch eine gezielte Bewegung des Laserstrahls mittels Scanner auf der Probe erzeugt. Damit können mit einer einfachen Maske unterschiedlichste 3D Strukturen generiert werden.

Die folgenden Beispiele sind von den Untersuchungen, die mit einem ArF-Excimerlaser mit 193 nm Wellenlänge durchgeführt wurden.

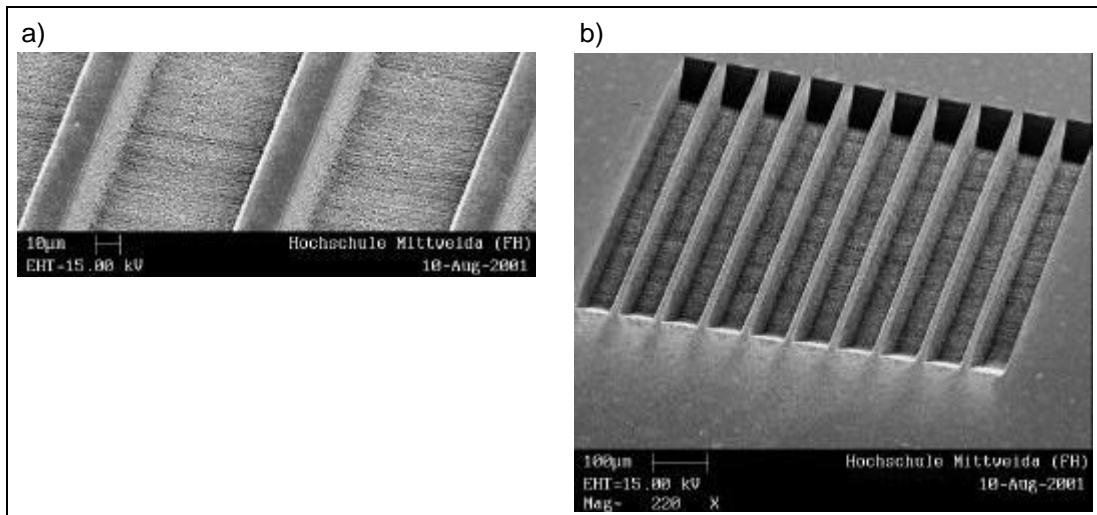


Abbildung 1: REM-Aufnahmen von durch aneinander reihen von Linienscans erzeugten Strukturen (Linienabstand: a) 86 µm, b) 84 µm; Grabenbreite: a), b) 70 µm; Tiefe: a) 20 µm, b) 45 µm; Stegbreite: a) 16 µm, b) 14 µm; Wiederholungen: a) 2, b) 4) aus [6]

Die Untersuchungen wurden an PMMA durchgeführt. Der Kunststoff PMMA lässt sich mit dem Excimerlaser sehr gut bearbeiten und aufgrund seiner Eigenschaften ist beispielsweise für medizinische Anwendungen geeignet. Um möglichst niedrige Rauigkeiten am Boden und an den Wänden der Strukturen zu erreichen, wurde mit einem großen Pulsüberlapp von 97 % (Pulsdistanz: 1,75 µm) gearbeitet. Mit Hilfe eines Dektak-Profilometers wurden am Boden der Strukturen geringe Rauigkeiten von  $R_a=0,5\text{...}0,6$  µm bestimmt.

Die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Probe führt zu eine Schräge am Beginn und Ende jeder Linie, die beim Entwurf der Struktur berücksichtigt werden muss (Abbildung 2). Durch den Einzelpulsabtrag und den Pulsabstand wird der Anstieg der Schräge bestimmt.

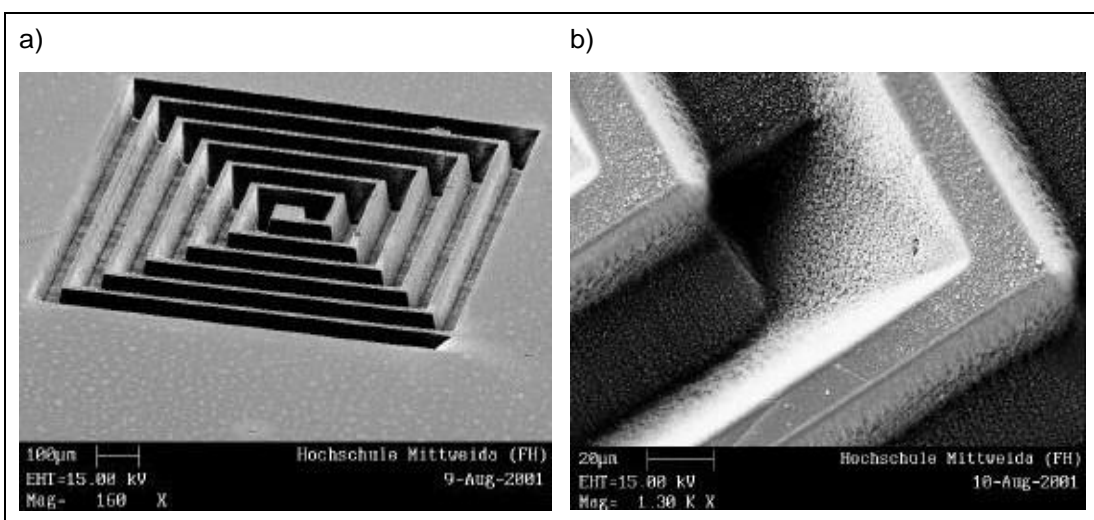


Abbildung 2: a) REM-Aufnahme einer Spiralstruktur (Laserfluenz:  $360\text{mJ/cm}^2$ , Pulswiederholffrequenz: 300 Hz, 6 Wiederholungen), Stegbreite:  $10\ \mu\text{m}$ , Grabentiefe:  $80\ \mu\text{m}$ ; b) Detailansicht der schräge Bodenfläche im Eckbereich aus [6]

Durch Maskenprojektion mittels bestimmten Laser und Scanner können somit Mikrostrukturen mit hoher Präzision erzeugt werden. Mit der Mikrostrukturierung mit Scanner lassen sich je nach Anforderung bestimmte Oberflächeneigenschaften und auch selektiver Materialabtrag erzielen. Beim Einsatz von ultrakurzen Laserpulse lassen sich die thermischen oder mechanischen Schäden wegen der kurze Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie minimieren bzw. vermeiden [6].

## 2.2 Abtragen des selbe Materials mittels fs-Laserstrahlung

Am Laserinstitut Hochschule Mittweida wurde es schon mit den gleichen Proben (siehe Abschnitt 3.2.1) untersucht, dasselbe Schichtmaterial mittels Kurz- und Ultrakurzpuls laser abzutragen. Mittels fs-Laser der Wellenlänge von  $1064\ \text{nm}$  konnte ein Abtrag der Silberleitbahn ohne Beeinflussung der Trägerfolie garantiert werden.

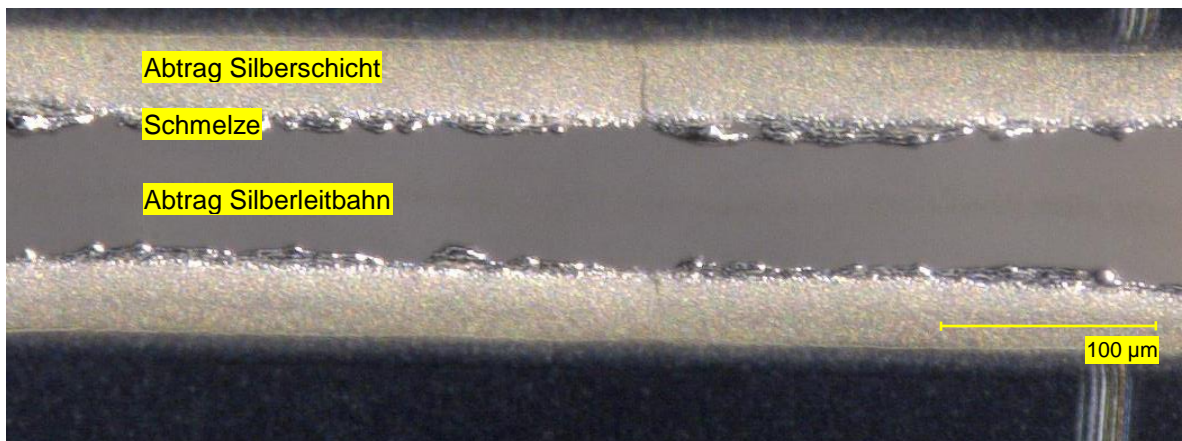


Abbildung 3: Abtrag der Silberleitbahn mittels fs-Laserstrahlung; Pulsdauer von 235 fs; Pulswiederholffrequenz von 1000 kHz; Pulsabstand von  $5\ \mu\text{s}$ ; Scangeschwindigkeit von 5000 mm/s; Pulsenergie von  $14,77\ \mu\text{J}$ ; Streckenenergie von  $14\ \text{J/m}$ ; Intensität von  $6,24\ \text{TW/cm}^2$

Die Abtragsspuren waren relativ parallel und hatte eine Breite von ca.  $65\ \mu\text{m}$ . An den Spurrändern war wenige Ablagerung der Schmelze zu sehen. Eine Beschädigung der Trägerfolie konnte im Bereich und außerhalb der Silberleitbahn nicht beobachtet werden.

## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Laser

#### 3.1.1 Laseranlagen

Für die Untersuchungen wurden zwei Laseranlagen aus der Firma IPG-Photonics verwendet: der cw-Laser YLR-3000-SM und der 500 W ns-Pulslaser. Der cw-Laseranlage YLR-3000-SM war ein diodengepumpter Ytterbium Faserlaser. Zur Materialbearbeitung wurde zu der ns-Pulslaseranlage ein Galvanometer-Scanner und zu der cw-Laseranlage ein Polygonspiegelscanner verwendet. Die Grundprinzipie und Aufbauten von Galvanometer-Scanner und Polygonspiegelscanner wurden im Kapitel 3.1.6 erklärt. In folgender Tabelle wurden die Eigenschaften von der cw-Laseranlage aufgelistet:

<b>Anlage :</b>	IPG Ytterbium Fiber Laser
<b>Laser :</b>	YLR-3000-SM
<b>Betriebsart:</b>	cw
<b>Optik :</b>	Jenoptik JENar 255-1030...1080-160
<b>Wellenlänge:</b>	1064 nm
<b>Strahlqualität :</b>	$M^2 < 1,3$
<b>Brennweite :</b>	255 mm
<b>Rohrstrahldurchmesser :</b>	ca. 16 mm
<b>Fokusbereich, berechnet:</b>	28,07 $\mu\text{m}$
<b>Laserleistung :</b>	300 W - 3000W
<b>Polygonscanner :</b>	max. Scangeschwindigkeit $\approx 500$ m/s

Tabelle 1: Eigenschaften des verwendeten cw-Lasers

Bei der cw-Laseranlage dient ein Ytterbium Faserlaser als Laserquelle. Mit einer Beugungsmaßzahl von  $M^2 < 1,3$  hatte der erzeugten Laserstrahl eine relativ gute Strahlqualität. Die mit der Optik JENar 255-1030...1080-160 der Firma Jenoptik fokussierte Laserstrahlung hat einen Durchmesser von ca. 28,07  $\mu\text{m}$  und der wurde mit folgend stehender Gleichung (1) berechnet:

$$w_0 = f \cdot \frac{\lambda \cdot M^2}{w_{vor} \cdot \pi} \quad \text{für kleine Strahldivergenzen} \quad (1)$$



Die Eigenschaften von dem ns-Pulslaser wurden in folgender Tabelle dargestellt:

<b>Anlage :</b>	IPG Ytterbium Fiber Laser
<b>Laser :</b>	IPG-YLR-HP-1-30x240-500-500
<b>Betriebsart:</b>	gepult
<b>Optik :</b>	Jenoptik JENar 255-1030...1080-239
<b>Wellenlänge:</b>	1064 nm
<b>Fokiusdurchmesser, berechnet:</b>	28,07 $\mu\text{m}$
<b>Max. <math>P_{AV}</math> :</b>	500 W
<b>Brennweite :</b>	255 mm
<b>Pulsdauer :</b>	30 ns, 60 ns, 120 ns, 240 ns
<b>Galvanometer-Scanner :</b>	max. Scangeschwindigkeit $\approx 10 \text{ m/s}$

Tabelle 2: Eigenschaften des verwendeten ns-Pulslasers

Die Hauptwellenlänge von den beiden Lasern beträgt 1064 nm, an der die zu abtragende Silberleitbahnschicht gut absorbiert und die Trägerfolie aus PEN eine hohe Transmissionsgrad besitzt. Mit diesen Eigenschaften war es möglich, die Untersuchungen zum Abtrag der Silberleitbahnschicht mit verschiedenen Varianten durchzuführen.

### 3.1.2 Prinzipieller Aufbau des Faserlasers

Faserlaser sind eine spezielle Art von diodengepumten Festkörperlaser. Die Hauptbestandteile eines Lasers sind die Pumpquelle, das laseraktive Medium und der Resonator. Beim Faserlaser besteht die Pumpquelle aus einer oder mehreren Pump-Laserdioden. An den zwei Endseiten der Faser befinden sich die Einkoppeloptik und die Auskoppeloptik, die gleichzeitig auch als Resonator dienen. Das laseraktive Medium ist der dotierte Faserkern im Innen der Faser. Häufigst verwendete Dotierungselement für den laseraktiven Faserkern ist Erbium, gefolgt von Ytterbium und Neodym für Hochleistungsanwendungen. Aus Kostensgründen enthält meist nur der Faserkern der Glasfaser eine Dotierung.

Im Allgemeinen werden Faserlaser optisch gepumpt, indem parallel zum Faserkern Strahlung von Diodenlasern eingekoppelt wird. Faserlasern unterscheiden sich zwischen Singlemode-Faserlaser und Doppelmantelfaserlaser, wobei die Doppelmantelfaserlaser höhere Leistungen erlauben.

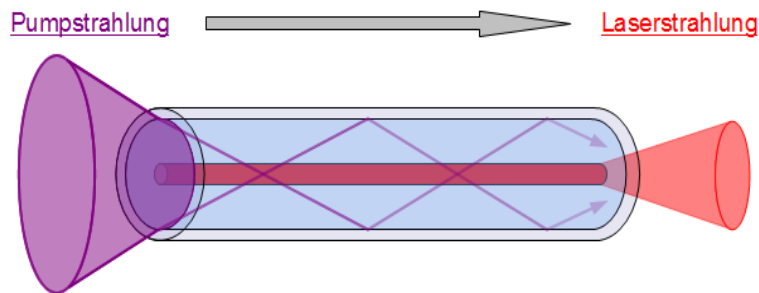


Abbildung 4: Grunddarstellung des Aufbaus einer Doppelmantel-Faser aus [7]

Die Ummantelung hat eine niedrigere Brechzahl als der Kern, sodass an der Grenzfläche Totalreflexion stattfindet. Aus dem dicken Mantel gelangt die Pumpstrahlung verteilt in den aktiven Kern. Die Laserstrahlung, welche durch den laseraktiven Kern geleitet wird, erfährt aufgrund der großen Länge der Faser eine sehr hohe Verstärkung. Dadurch besitzt der Faserlaser sehr hohe elektrisch-optische Wirkungsgrade bis zu über 60%. Die am Ende ausgekoppelte Laserstrahlung lässt sich auch sehr gut in der Lichtleiterfaser ein-koppeln und weiter zu den Bearbeitungsstellen führen.

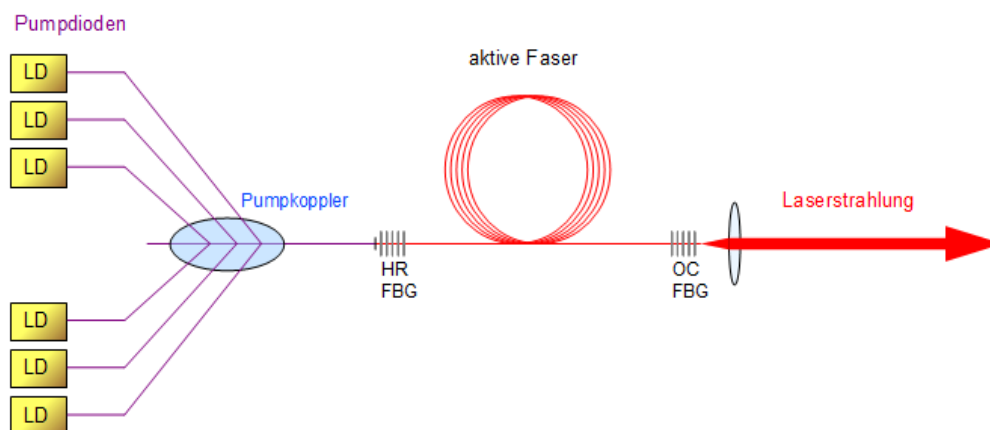


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers aus [7]

Das Pumpen mit Diodenlasern ergibt kompakte Laserquellen, die mit gutem Wirkungsgrad und hoher mechanischer Stabilität arbeiten. Wegen der großen Oberfläche der Faser im Verhältnis zum Volumen findet eine gute Wärmeabfuhr statt, sodass keine zusätzliche Kühlung derartiger Faserlaser notwendig ist. Außerdem verfügen die weiteren Vorteile wie hohe Lebensdauer, wartungsfreien und unempfindlichen Aufbau und verlustarme Strahl-führung.

Die aktuellen maximalen Ausgangsleistungen bei Faserlasern liegen bei 100 kW für Multimode und 10 kW für Singlemode. Bei der Erzeugung von Impulsen geringer Dauer ergeben sich hohe Spitzenleistungen. Durch den kleinen Querschnitt der Faser ist die Spitzenleistung begrenzt, da die hohen Intensitäten zur Zerstörung der Faser führen [7,8,9].

### 3.1.3 Galvanometerscanner

Der Galvanometer-Scanner besteht aus zwei voneinander getrennte kippbaren Spiegeln, die mit den Galvanometern verbunden sind. Die zwei Spiegel können durch Drehen des Galvanometers gekippt werden und somit den eintreffenden Laserstrahl in zwei Achsen ablenken. Dadurch kann der fokussierte Laserstrahl auf jeden beliebigen Punkt des Scanfeldes positioniert werden.

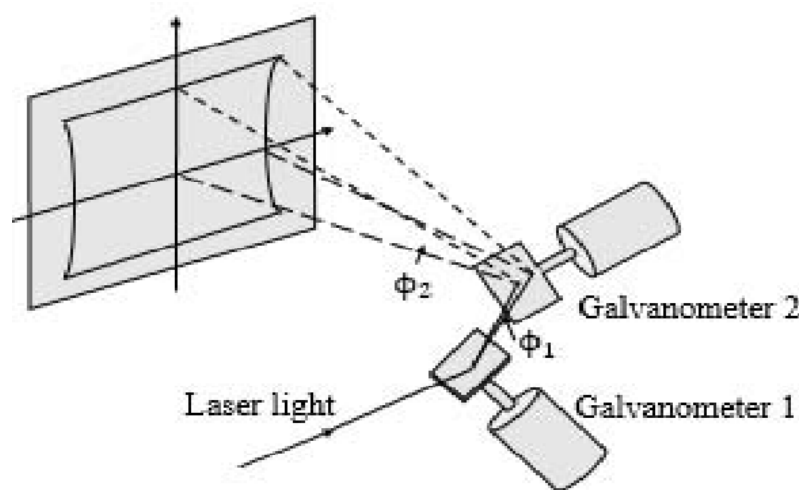


Abbildung 6: Grunddarstellung der Funktionsweise eines Galvanometer-Scanners aus [10]

Aufgrund der geringen Abmessungen und des kleinen Gewichtes können die Spiegel schnell bewegt werden und damit eine hohe Scangeschwindigkeit realisieren [10]. Der für die Untersuchungen eingesetzte Galvanometer-Scanner bei ns-Puls laseranlage konnte unter Verwendung der entsprechenden Optik eine max. Scangeschwindigkeit von ca. 10000 mm/s erreichen.

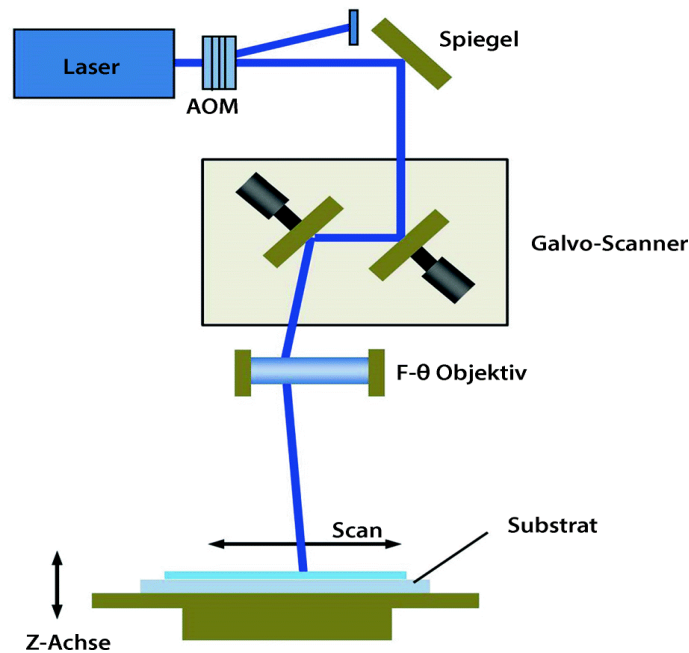


Abbildung 7: Schematische Darstellung von Galvanometer-Scanner in der Materialbearbeitung aus [11]

### 3.1.4 Polygonspiegelscanner

Um eine höhere Scangeschwindigkeit in dem Laserbearbeitungsprozess zu realisieren, wurde der Polygonspiegelscanner, auch als Polygon-Scanner oder Polygon-Galvanometer-Scanner genannt, entwickelt. Der Polygonspiegelscanner ermöglicht die präzise und wiederholbare Ablenkung und Positionierung des Laserstrahls für die Mikrobearbeitung.

Ein Polygonspiegelscanner setzt sich hauptsächlich aus dem Galvanometer-Scanner, dem Polygonrad und der F-Theta-Linse zusammen. Das Polygonrad hat acht Facetten. Durch Rotieren des Polygonrades mit einer konstanten Geschwindigkeit um eine mechanische Achse wird der eintreffende Laserstrahl schnell in der Fast-axis (schnelle Achse) abgelenkt. Der Galvanometer-Scanner dient dazu, den Laserstrahl in der Slow-axis (langsame Achse) abzulenken. Somit wird das Scannen des Laserstrahls in einem sogenannten Scan-feld realisiert [12].

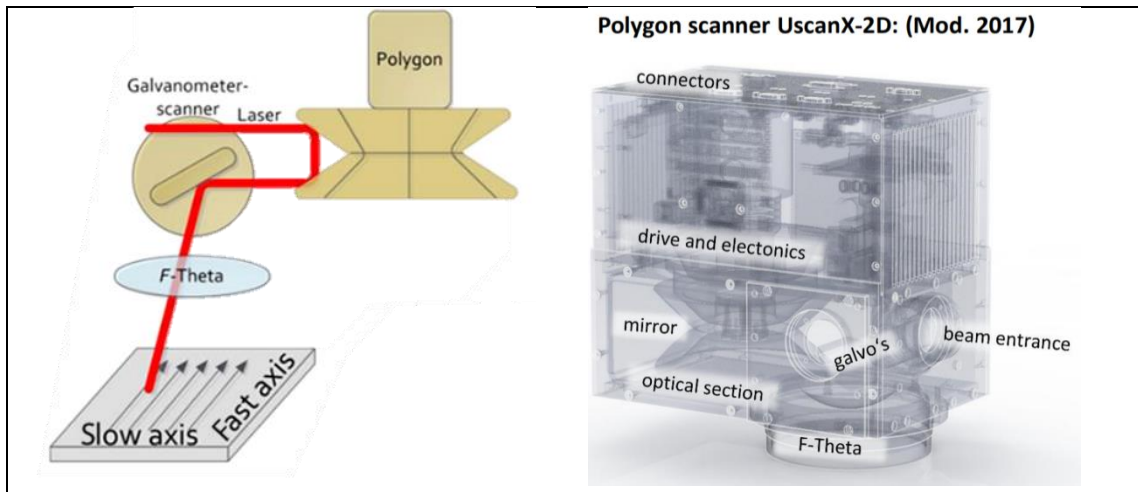


Abbildung 8: links: Funktionsweise eines Polygon-Galvanometer-Scanners aus [12]; rechts: Aufbau vom Polygonspiegelscanner UscaX-2D (Mod. 2017) aus [13]

Je nach dem Bearbeitungsabstand zum Werkstück kann es mit dem Polygonspiegelscanner verschiedene max. Scangeschwindigkeit erreichen. Der in den Untersuchungen verwendeten Polygonspiegelscanner realisiert mit der eingesetzten Optik eine max. Scangeschwindigkeit von ca. 500m/s.

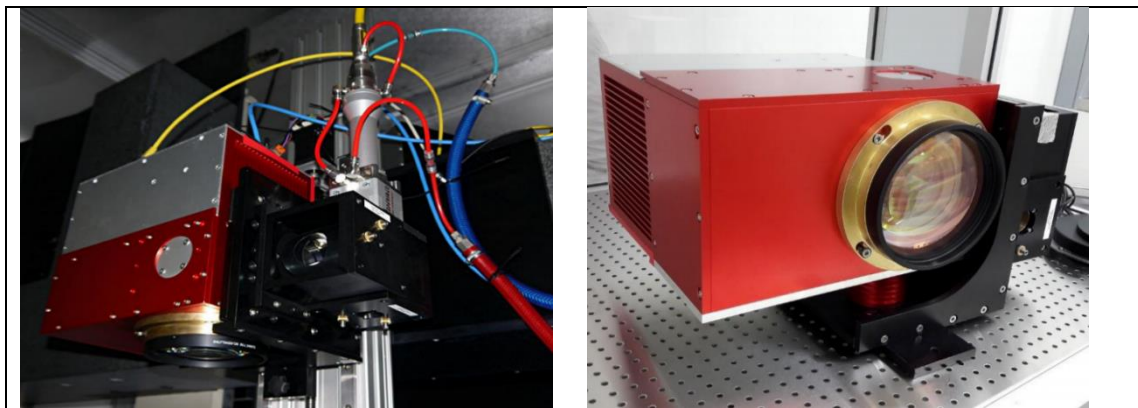


Abbildung 9: Bilder von Polygonspiegelscanner an der LHM Hochschule Mittweida aus [13]

## 3.2 Proben

### 3.2.1 Probenmaterial

Die Probe sind flexible PCB aus gedruckter ungesinterter Silberleitbahn mit der Dicke von ca. 1  $\mu\text{m}$  auf Polyethylnaphthalat-Substrat mit der Dicke von ca. 120  $\mu\text{m}$ . Polyethylnaphthalat ist ein durch Polykondensation hergestellter thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester. Der Schmelzpunkt von Polyethylnaphthalat liegt bei 260°C. Ab einer Temperatur von ca. 286°C erfolgt die thermische Zersetzung der chemischen Verbindungen innerhalb den Polyethylnaphthalat-Molekülen. Abbildung 10 stellt die Strukturformel und Summenformel der Wiederholeinheit von Polyethylnaphthalat dar.

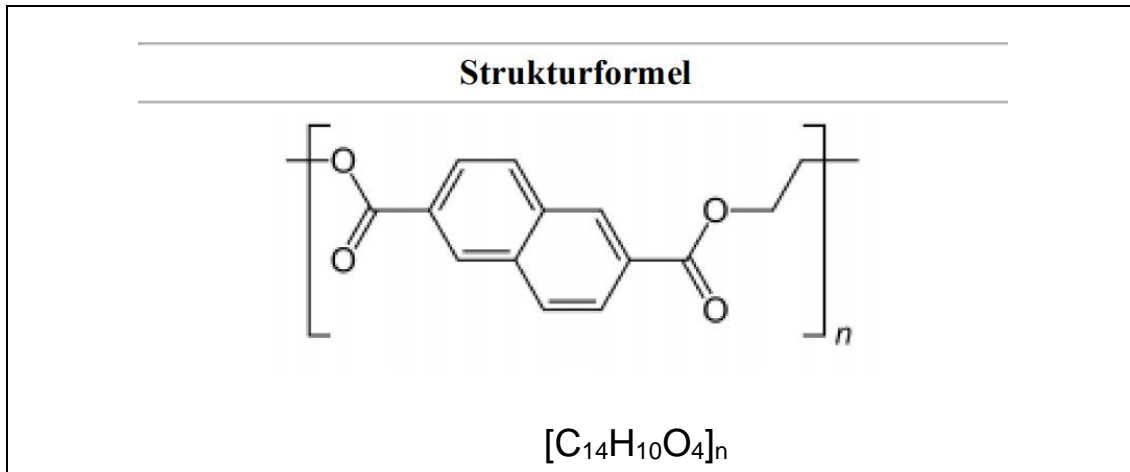


Abbildung 10: Strukturformel und Summenformel der Wiederholeinheit von Polyethylenaphthalat aus [14]

In der Abbildung 10 wurde die Strukturformel von PEN dargestellt. Die wichtigen Eigenschaften von dem PEN-Substrat und der Silberleitbahn wurden in der Tabelle 1 zusammengefasst. Der Absorptionskoeffizient ließ sich zum einem über die Extinktion der Spektrometeruntersuchung mit der Gleichung (2) im Kapitel 4.1 berechnen.

	<b>PEN-Substrat</b>	<b>Ag (Silberleitbahn)</b>
<b>Dichte <math>\rho</math></b>	1,328 g/cm <sup>3</sup>	10,5 g/cm <sup>3</sup>
<b>Brechungsindex <math>n</math> (<math>\lambda=1064\text{nm}</math>)</b>	1,65	0,088527
<b>Extinktionskoeffizient <math>k</math> (<math>\lambda=1064\text{nm}</math>)</b>	0	7,7679
<b>Schmelztemperatur <math>T_s</math></b>	260 °C	961,78 °C
<b>Thermische Zersetzung</b>	286 °C	-
<b>Verdampfungstemperatur <math>T_v</math></b>	-	2162 °C
<b>Schmelzwärme <math>Q_s</math>:</b>	140 J/g	104 kJ/kg
<b>Verdampfungswärme <math>Q_v</math>:</b>	-	2357 kJ/kg
<b>Dicke <math>d</math>:</b>	ca. 120 $\mu\text{m}$	ca. 1 $\mu\text{m}$
<b>Absorptionsgrad <math>A</math> (<math>\lambda=1064\text{nm}</math>):</b>	0,061	0,893
<b>Transmissionsgrad <math>T</math> (<math>\lambda=1064\text{nm}</math>) :</b>	0,868	0,127

Tabelle 3: Eigenschaften der Materialien aus [15,16,17,18,19,20,21]

Die Struktur der Probe wurde in folgender Abbildungen dargestellt:

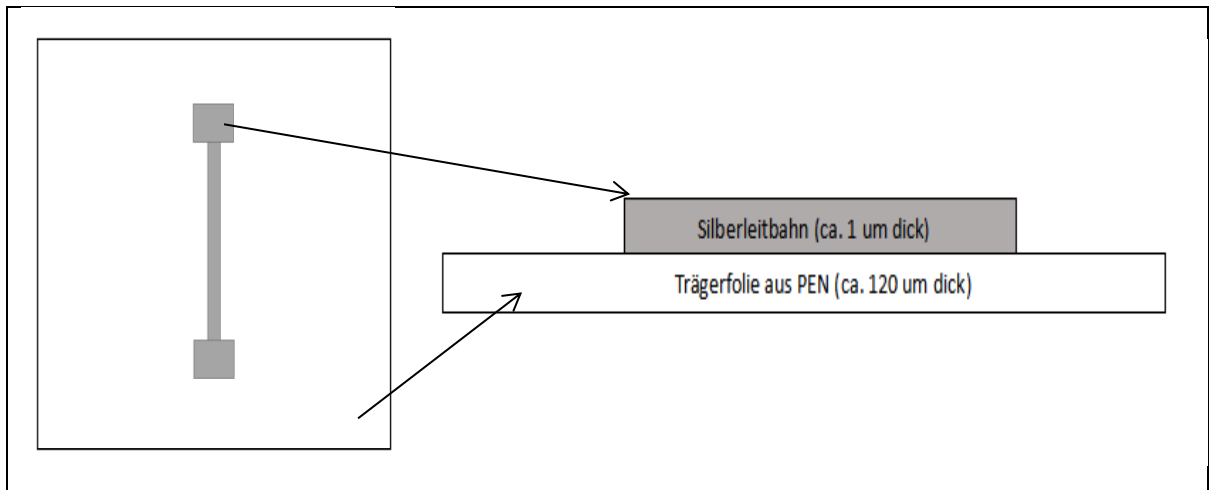


Abbildung 11: Struktur der Probe

Das PEN-Substrat hat hohen Transmissionskoeffizient bei der Wellenlänge von 1064 nm, wobei die Silberleitbahn absorbiert fast 90% der Strahlung. Die thermische Zersetzung folgt schon ab einer Temperatur von 286°C. Ab 961,78°C schmilzt und ab 2162°C verdampft die Silberleitbahn.

### 3.2.2 Probenhalterung

Um das Problem, dass das PEN-Substrat durch die Wärmeleitung zwischen PEN-Substrat und Stahlplatte angegriffen wird, zu vermeiden, wurden die Probe in der Versuchsdurchführung nicht direkt auf der Trägerplatte aufgelegt, sondern mit zwei Klammern gezogen und ca. 5 mm von der Trägerplatte aufgehoben. Im unten der Klammern sind Magnete angeklebt, mit den konnten die Klammern sehr gut auf der Trägerplatte aus Stahl haften und positioniert werden. In der Abbildung 12 wird das Foto von dem Probenhalter mit Probefolie dargestellt.

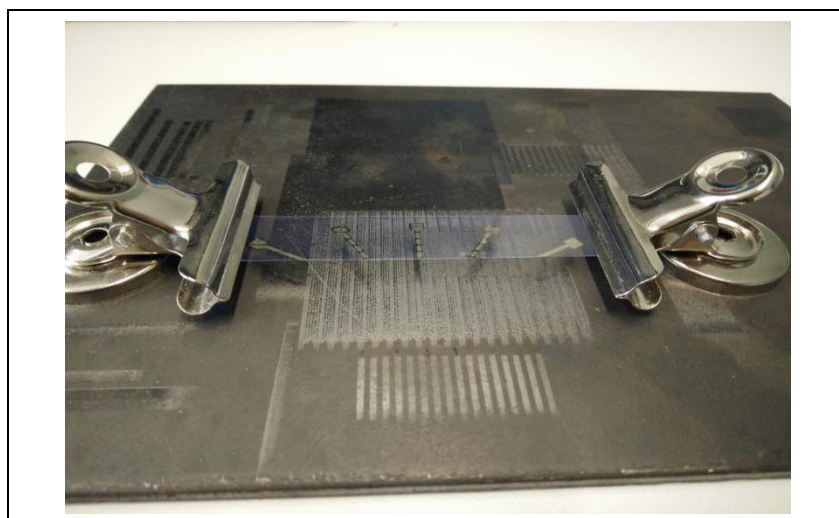


Abbildung 12: Probe befestigt mit Probenhalter aus Klammern und Trägerplatte

Die Untersuchungen wurden mit materialseitiger und probenseitiger Bestrahlung durchgeführt. In der Abbildung 13 wurde es dargestellt, wie die Proben bei den zwei Varianten positioniert wurden.

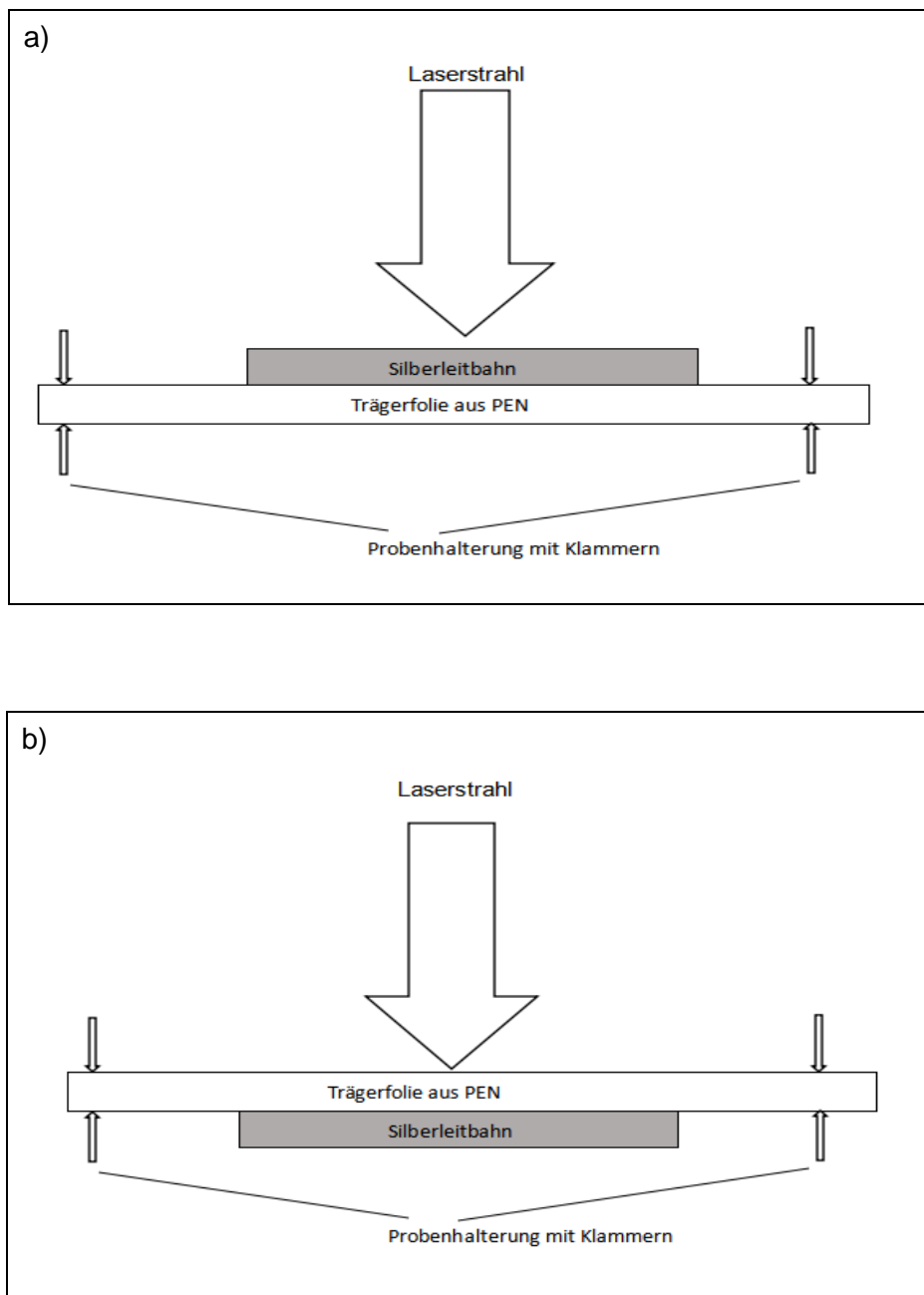


Abbildung 13: Skizzen der Positionierung der Proben von den zwei Versuchsvarianten; a) materialseitige Bestrahlung; b) substratseitige Bestrahlung



## 4 Grundlagen

### 4.1 Laser-Material-Wechselwirkung

Laserstrahlung hat im Vergleich zu normalen Lichtquellen die typischen Eigenschaften wie z.B. die sogenannte Monochromasie, Kohärenz und hohe Energiedichte. Mit diesen lässt sich Laserstrahlung sehr gut fokussieren und damit hohe Intensität erzielen. Auf diesem Grund findet die Laserstrahlung in der Materialbearbeitung und auch in vielen anderen Bereichen Anwendungen.

Beim Eintreffen der Laserstrahlung an der Oberfläche des beaufschlagten Mediums wird erst ein Teil der Strahlung reflektiert. Die entscheidende Größe für die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie ist die Absorption von Laserstrahlung, also die Übertragung eines möglichst großen Teils der Laserenergie auf das zu bearbeitende Substrat. Diese ist abhängig von der Wellenlänge der Strahlung, der Temperatur und den Werkstoffeigenschaften. Je nach verwendeter Laserstrahlung kann es unterschiedliche optische Eindringtiefen erreicht werden. Die optische Eindringtiefe kann mittels des Lambert-Beer'schen Gesetzes beschrieben werden:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot r} \quad (2)$$

Die Intensität der Strahlung nimmt mit zunehmender Eindringtiefe ab, d.h. die Strahlung wird dabei vom Material absorbiert. Ab einer bestimmten Leistungsdichte nimmt beim Laser die Absorption wesentlich höhere Werte an, als sie nach der oberen Gleichung zu erwarten sind. Als Folge von nichtlinearen Wechselwirkungsprozessen zwischen Laserstrahlung und bestrahlter Zone tritt anomale Absorption auf. Durch Überschreiten einer Intensitätsschwelle können absorptionsfreie Stoffe auch in absorbierende Stoffe überführt werden. Oberhalb der kritischen Intensität absorbieren praktisch alle Substanzen sehr gut [22].

Nach dem Auftreten eines Laserpulses auf der Materialoberfläche können verschiedene Wechselwirkungen auftreten. Die Elektronen des Substratmaterials absorbieren die Energie des Laserpulses vornehmlich durch lineare Prozesse. Für hohe Laserintensitäten im Fall von ultrakurzen Lichtimpulsen kann auch nichtlineare Absorption eine Rolle spielen, besonders bei transparenten Materialien liegt dieses bei Laserwellenlängen im nahen infraroten Spektralbereich vor [23].

Eine Umwandlung von auf das Werkstück treffender elektromagnetischer Energie in Wärme findet nach der Absorption der Laserstrahlung statt. Bei höherer absorbierter Energie schmilzt und verdampft das Material. Beim Schmelzen gehen die Materialien in

den flüssigen Zustand über und können mit Druckluft weggeblast werden. Beim Verdampfen des Materials verlassen energiereiche Atome an der Oberfläche des Werkstücks und gehen in den dampfförmigen Zustand über. Diese thermischen Prozesse kann man in verschiedenen Weise zur Materialbearbeitung ausnutzen.

## 4.2 Mechanismus des Laserabtrags

Der Materialabtrag mittels Laserstrahl wird durch eine dampfförmige und eine flüssige Phase bedingt. Nach dem Auftreffen der Energiemenge des Laserstrahls auf das zu bearbeitende Werkstück führt es zu einer lokalen Verdampfung des Werkstückmaterials, mit dem durch diesen entstandenen Dampfdruck wird das Werkstückmaterial aus der Wechselwirkungszone getrieben. Die Verdampfungszone bildet sich unterhalb der Werkstückoberfläche aus. Dadurch kann auch ein Teil des durch Wärmeleitung schmelzflüssig gewordenen Werkstoffes explosionsartig aus der Bearbeitungszone entfernt werden [22]. Teilweise wird zusätzlich ein koaxial zum Laserstrahl geführter Gasstrahl zur Unterstützung des Materialaustriebs angewendet. In der Abbildung 14 wurde das Schema für den Materialabtrag mittels Laserstrahl dargestellt.

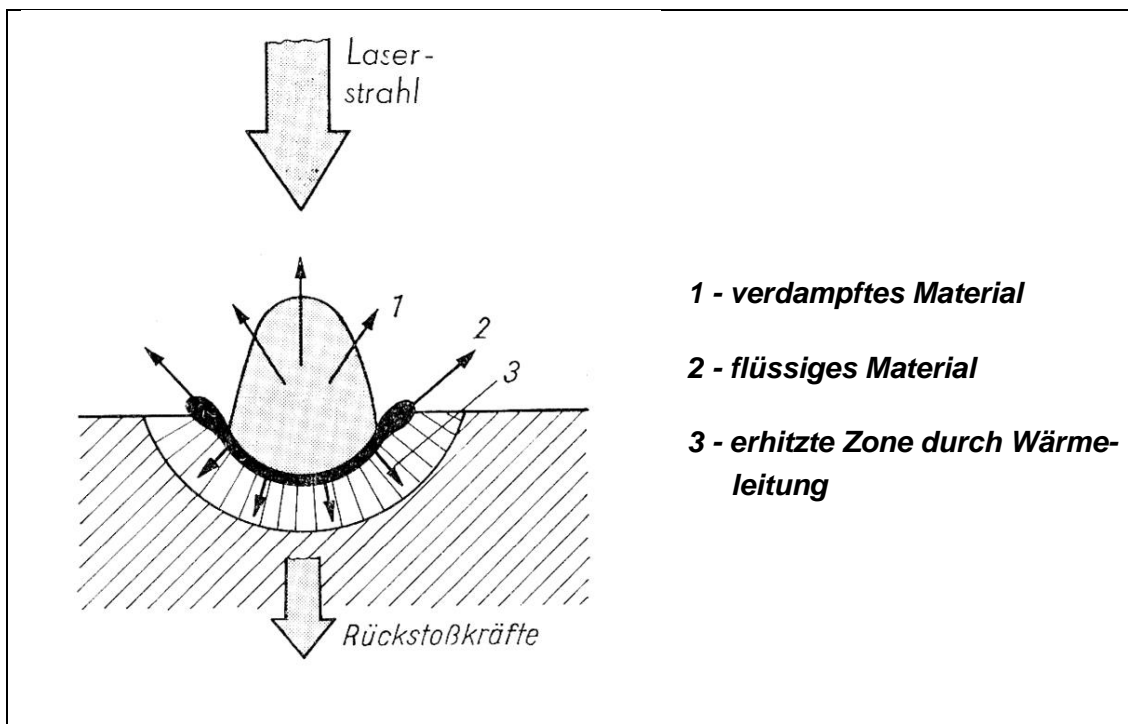


Abbildung 14: Schema für den Materialabtrag mittels Laserstrahl aus [22]

Eine für die Lasermaterialbearbeitung häufig verwendete Größe ist die sogenannte Streckenenergie. Die Streckenenergie ist die nötige Energiemenge, die zur Materialbearbeitung auf das zu bearbeitende Werkstück aufgebracht werden muss. Diese beschreibt den

Zusammenhang zwischen der Strahlleistung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit und lässt sich mit der Gleichung (3) berechnen.

$$E_s = \frac{P}{v} \quad (3)$$

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Untersuchungen mit 1064 nm cw-Laser

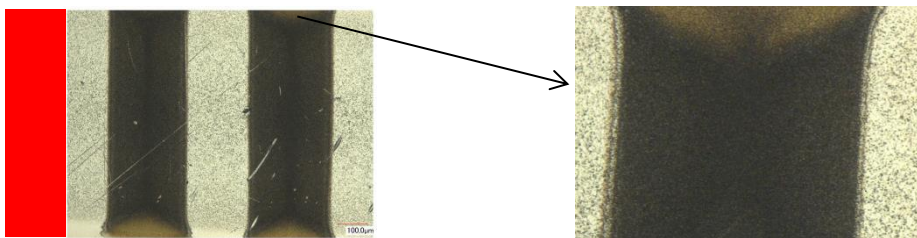
Zuerst wurden die Untersuchungen mit 1064 nm cw-Laser in Kombination mit Polygonspiegelscanner durchgeführt. Das Abtragen der Silberleitbahn wurde mit materialeseitiger und auch substratseitiger Bestrahlung des Laserstrahls versucht, dabei wurden die Laserleistung, die Fokussierung und die Scangeschwindigkeit des Polygonscanners variiert. Bei den Untersuchungen mit materialeseitiger Bestrahlung wurde es auch versucht, das Abtragen der Silberleitbahn mit mehreren Durchläufen der Laserstrahlung zu realisieren. Unter optischen Mikroskopen wurden die alle Bilder von den Proben zum Vergleichen und Diskutieren der Ergebnisse aufgenommen.

Um die Abtragsqualität besser zu diskutieren wurden die Ergebnisse des Abtrags von Silberleitbahnschicht und die Ergebnisse des Angriffs von Laserstrahlung auf dem PEN-Substrat getrennt verglichen und in verschiedene Kategorien eingeteilt. In folgende wurden die Einteilung aller Kategorien beschrieben:

#### **Kategorien für den Abtrag von Ag-Schicht (Abbildung 15):**

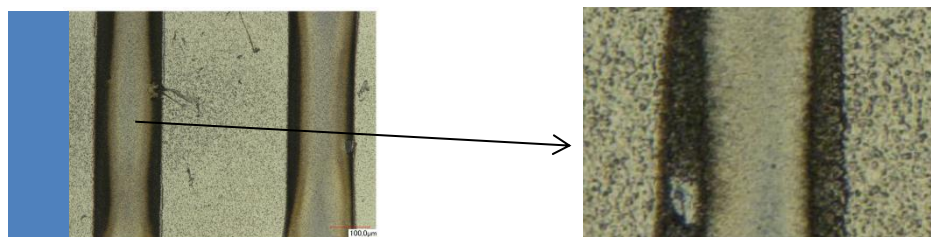
##### **Kategorie 1: fast kein**

Fast kein Abtrag von Ag-Schicht passiert. Die Silberleitbahnschicht wurde nur leicht erwärmt oder teilweise geschmolzen. An der Oberfläche ist schwarze Silberoxid zu erkennen.



##### **Kategorie 2: leicht**

Leichter Abtrag von Ag-Schicht. Die Silberleitbahnschicht wurde nur wenig abgetragen. An den bearbeiteten Stellen war es immer noch Schichtmaterial übrig.

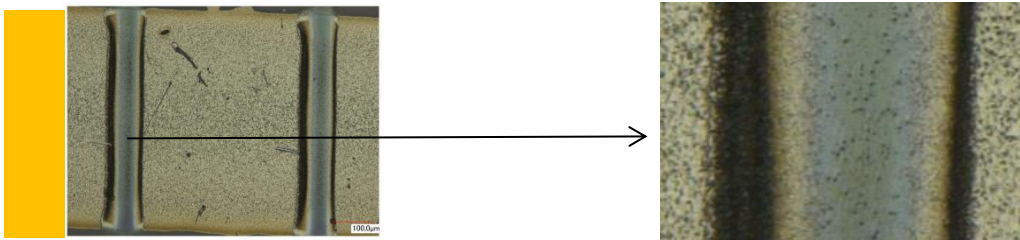


**Kategorie 3: nicht komplett**

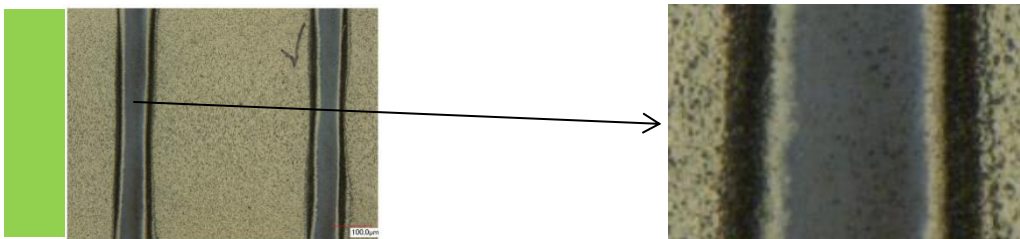
Abtrag ist nicht komplett, die Ag-Leitbahn ist nicht komplett getrennt. An manchen Stellen wurde die Silberleitbahnschicht abgetragen, sodass das PEN-Substrat schon zu sehen war. Die Verbindungen der Silberleitbahn wurden aber nicht komplett getrennt.

**Kategorie 4: fast komplett**

Ag-Schicht wurde fast komplett abgetragen, nur noch ganz wenige Ag liegt auf dem PEN-Substrat.

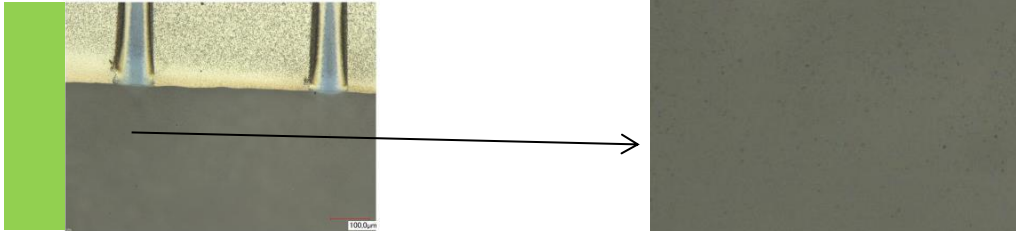
**Kategorie 5: komplett**

Ag-Schicht komplett abgetragen. An den abgetragenen Stellen war das PEN-Substrat deutlich zu sehen.

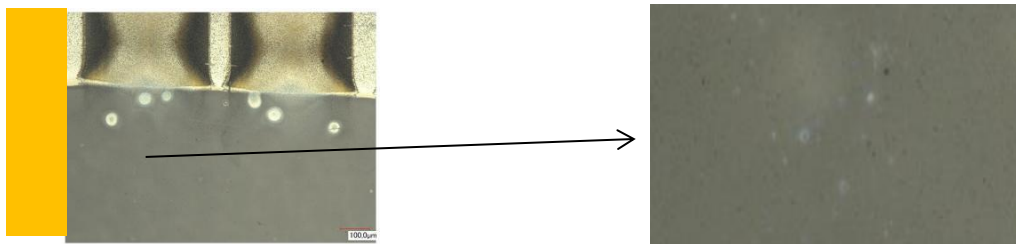


**Kategorien für den Angriff auf PEN-Substrat (Abbildung 16):****Kategorie 1: keine**

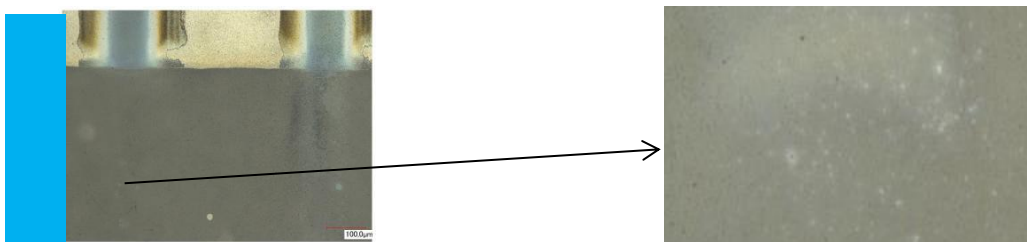
Kein Angriff von Laserstrahlung auf PEN-Substrat. Es war nach der Bearbeitung keine Beschädigung vom PEN-Substrat zu erkennen.

**Kategorie 2: leicht**

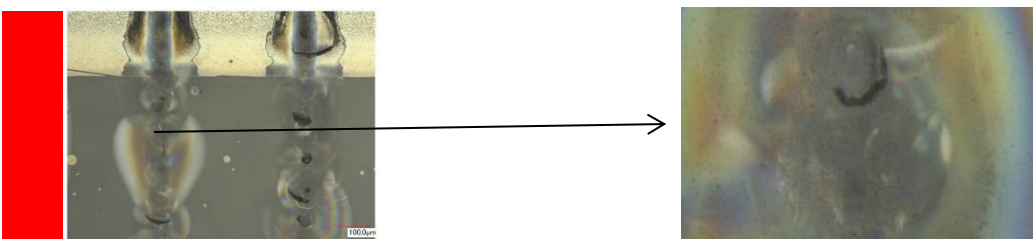
Nur leichte Schädigung vom PEN-Substrat. An den von der Laserstrahlung bestrahlten Stellen waren wenige durch thermische Angriff entstandene kleine weiße Flecke zu beobachten.

**Kategorie 3: mittig**

Große und deutliche Schädigung. An den bestrahlten Stellen waren großflächige beschädigte Zone deutlich zu sehen.

**Kategorie 4: stark**

Starke Verfärbung und Zerstörung von PEN-Substrat.



### 5.1.1 Versuche mit materialeitiger Bestrahlung mit einem Durchlauf

In diesem Teil wurde die Probe von der Materialseite mit Laserstrahlung bestrahlt, d.h. die Laserstrahlung wurde direkt auf der Silberleitbahn aufgetragen (siehe Kapitel 3.2.2). Verwendet wurde der 1064 nm cw-Laser YLR-3000-SM aus der Firma IPG. Mit dem Polygonspiegelscanner war die Bearbeitung mit einer Scangeschwindigkeit bis zu max. ca. 500m/s zu realisieren. Die Untersuchungen wurden mit der erreichbaren minimalen Leistung von 300 W bei 100m/s und 200m/s Scann-Geschwindigkeit und bis der maximaler Leistung von 3 kW bei 5 verschiedenen Scangeschwindigkeit von 100m/s bis 500m/s mit einer Defokussierung bis 8,0 mm durchgeführt. Um die Abtragsqualität genau zu diskutieren und in den richtigen Kategorien einzuteilen, wurden die Bilder von den Proben mit Lichtmikroskope durch Auflicht, Seitenlicht und Durchlicht aufgenommen. Die Ergebnisse in Kategorien wurden in folgenden Abbildungen dargestellt:

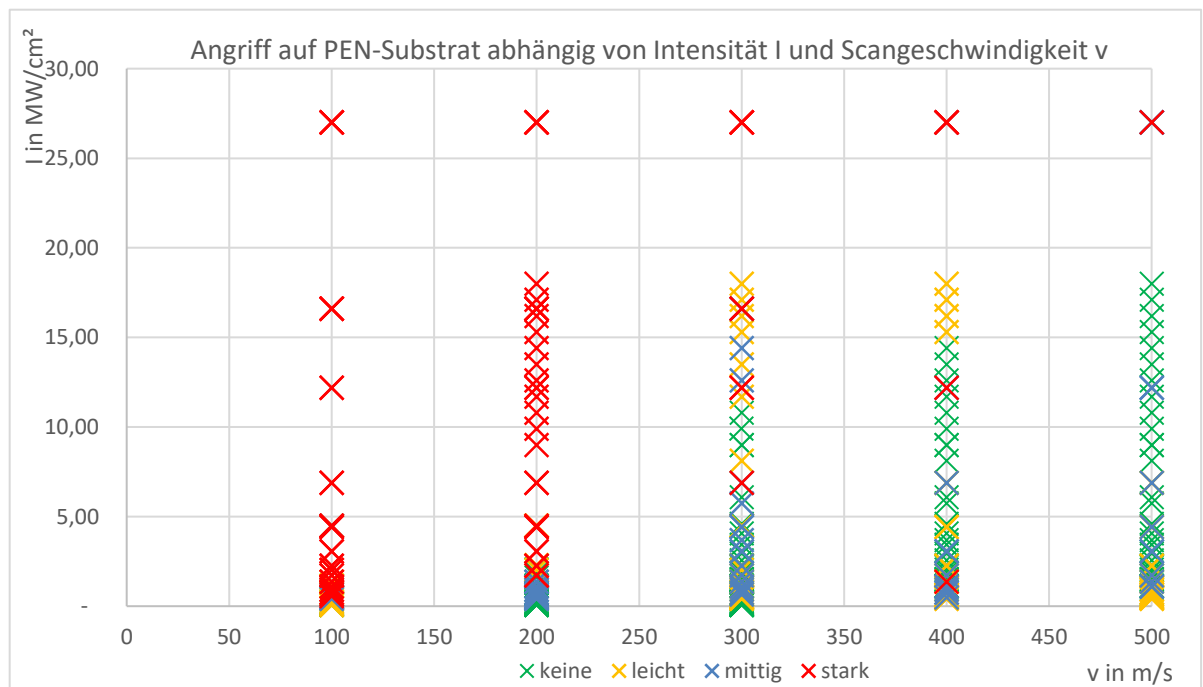


Abbildung 17: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit

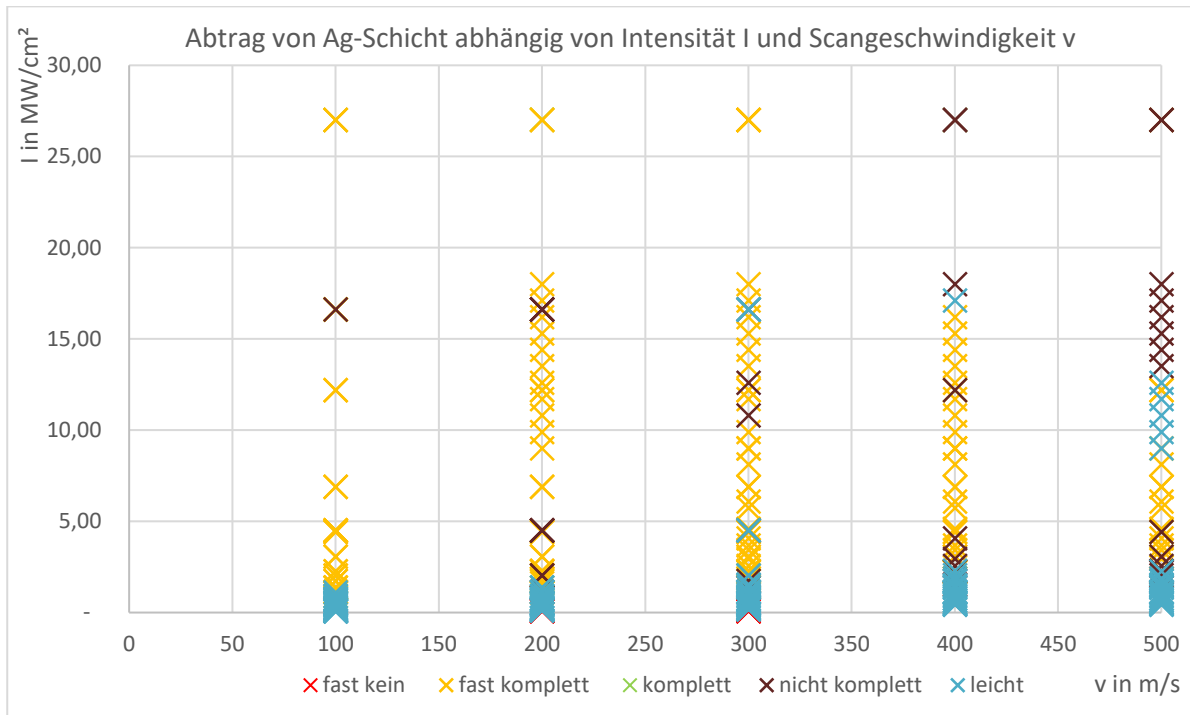


Abbildung 18: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit

Ab einer Strahlungsintensität von ca. 2,5 MW/cm<sup>2</sup> erfolgt der fast komplette Abtrag der Leitbahnschicht. Ein starker Angriff auf dem PEN-Substrat passierte ab der Intensität von ca. 12 MW/cm<sup>2</sup> bei der Scangeschwindigkeit von  $v = 300$  m/s. Bei 400 m/s Scangeschwindigkeit war die Beschädigung von PEN-Substrat ab der Intensität von ca. 15 MW/cm<sup>2</sup> deutlich zu erkennen. Bei der maximalen Scangeschwindigkeit von  $v = 500$  m/s war es unter der Intensität von ca. 20 MW/cm<sup>2</sup> noch keine starke Beschädigung des PEN-Substrates zu beobachten, da die Wechselwirkungszeit dabei minimal war. Die besten Ergebnisse liegen an den Grenzen der Schädigung zum PEN-Substrat, wobei das PEN-Substrat noch nicht von der Laserstrahlung thermisch angegriffen wurde und der Abtrag der Silberleitbahnschicht gut erfolgte (Abbildung 19).

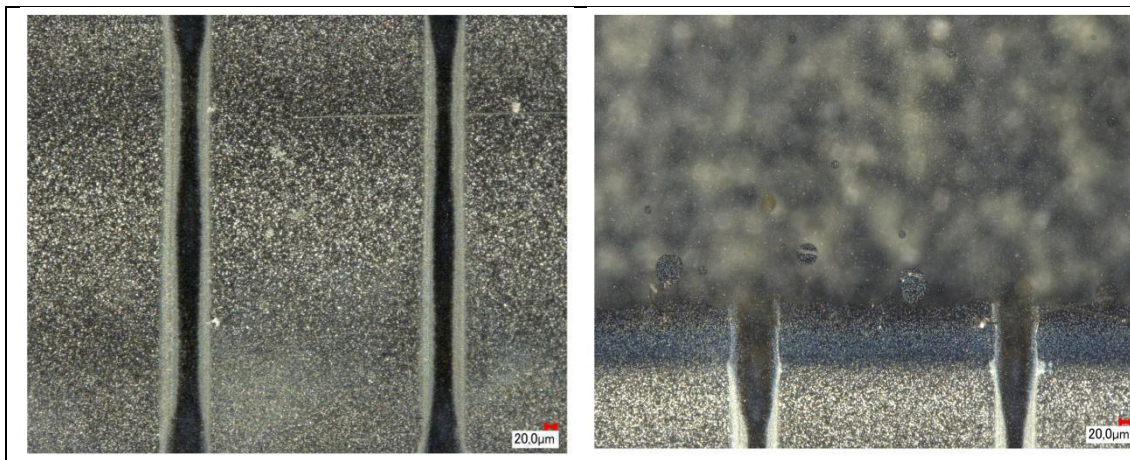


Abbildung 19: Fast kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne direkte Beschädigung von PEN-Substrat



Die Ergebnisse von den Scangeschwindigkeiten von 100 m/s und 200 m/s sind in kleinem Intensitätsbereich in folgenden Abbildungen dargestellt:

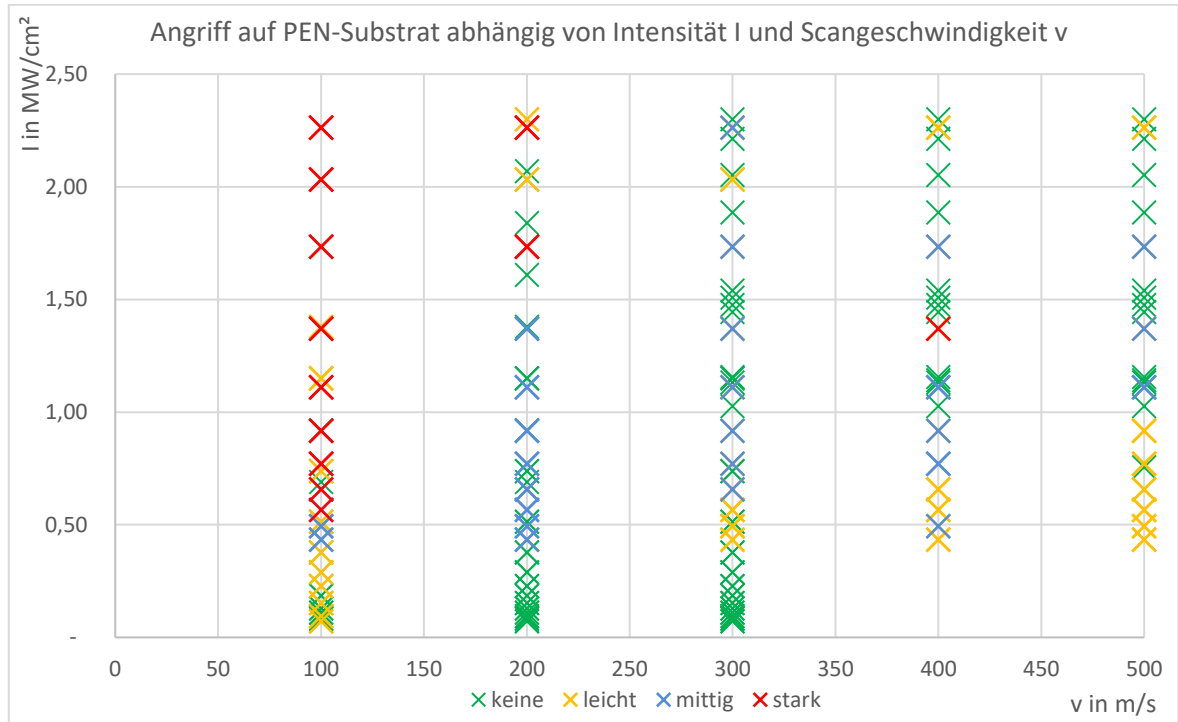


Abbildung 20: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit im kleinem Intensitätsbereich

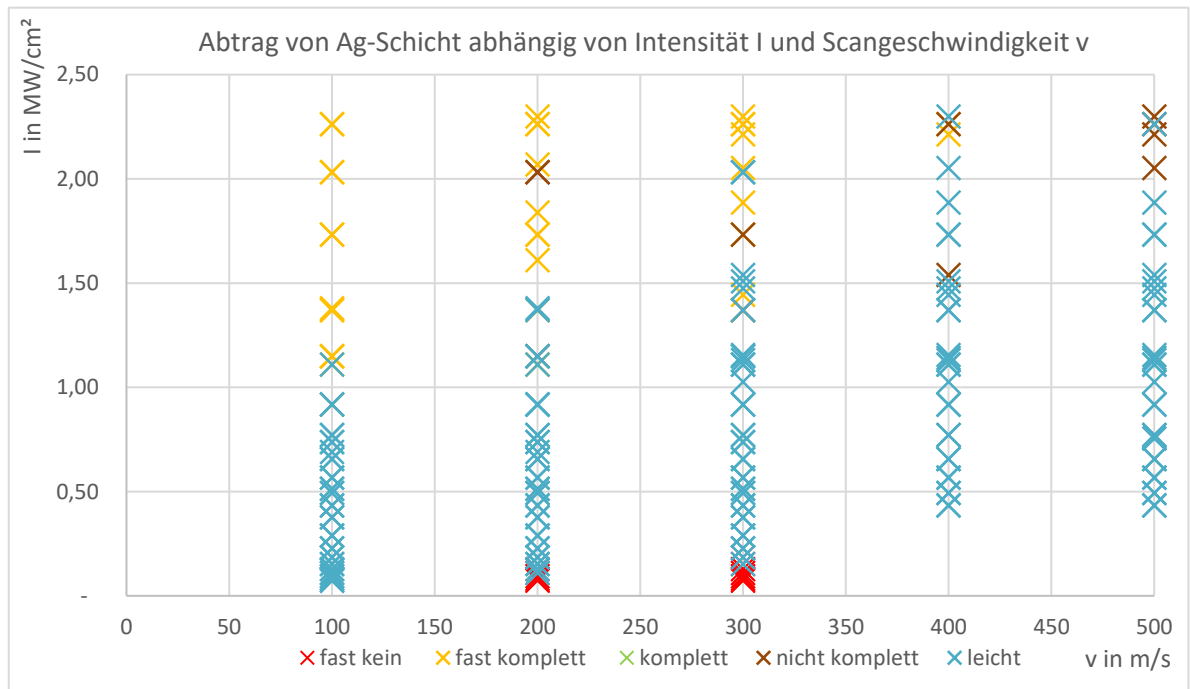


Abbildung 21: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit im kleinem Intensitätsbereich

Auf Grund der längeren Wechselwirkungszeit bei den Scangeschwindigkeiten von 100m/s und 200m/s war die Schädigung der Trägerfolie im Vergleich zu anderen Scangeschwindigkeiten schon bei sehr niedriger Intensität gut zu beobachten. Bei der Intensität von ca. 0,6 MW/cm<sup>2</sup> und 100 m/s Scangeschwindigkeit war das PEN-Substrat schon stark beschädigt, wobei die Silberleitbahnschicht nur ganz leicht abgetragen wurde (Abbildung 22). Im kleinen Intensitätsbereich bei 200 m/s Scangeschwindigkeit unter der Intensität von ca. 1,7 MW/cm<sup>2</sup> erschien der fast komplette Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne starke Beschädigung vom PEN-Substrat (Abbildung 23).

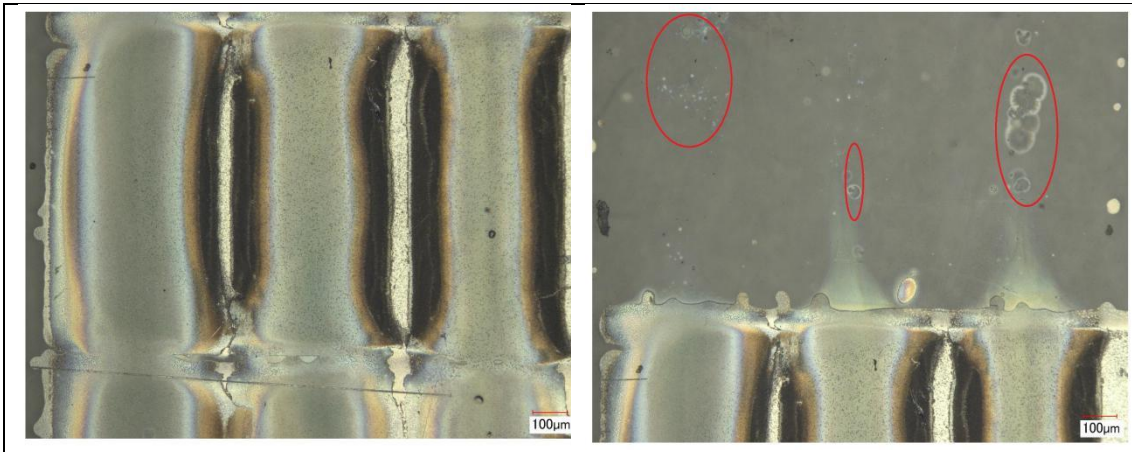


Abbildung 22: Nur leichter Abtrag von der Silberleitbahnschicht, Beschädigung von PEN beobachtbar

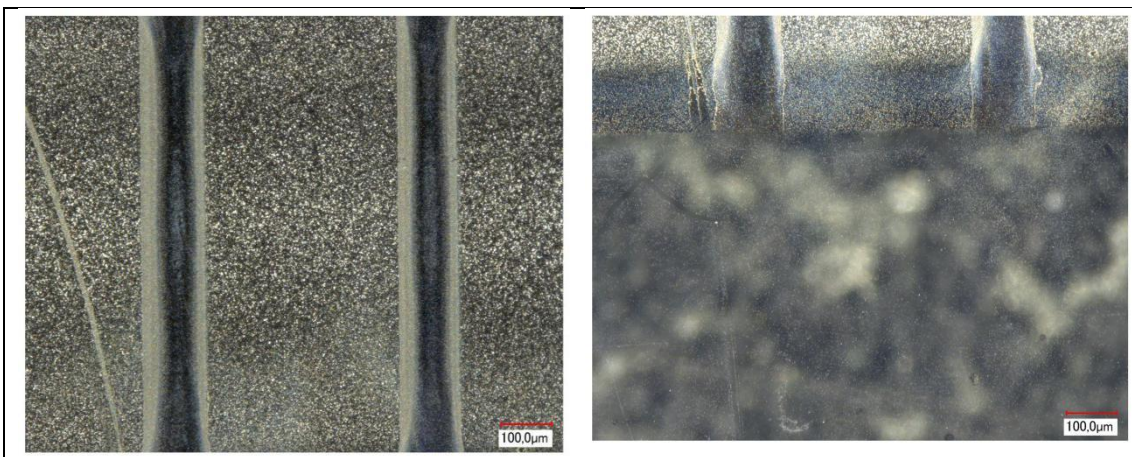


Abbildung 23: Fast Kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht mit 200 m/s Scangeschwindigkeit ohne Schädigung zum PEN-Substrat zu beobachten

### 5.1.2 Versuche mit materialeitiger Bestrahlung mit mehreren Durchläufen

Um das PEN-Substrat nicht zu beschädigen und der Abtrag der Silberleitbahnschicht komplett zu erfolgen wurde es in den folgenden Untersuchungen versucht, die Leitbahnschicht mit bis zu drei Durchläufe der Laserstrahlung abzutragen. Die Anzahl der Durchläufe der Laserstrahlung wird auch als Linienanzahl bezeichnet. Aus den durchgeführten Untersuchungen wurden für die Ergebnisse die Strahlintensität berechnet und die günstigen Intensitätsbereiche bzw. Parameterbereiche für verschiedene Scangeschwindigkeiten ausgewählt. In diesen Intensitätsbereichen bzw. Parameterbereiche sollten die Trägerfolien nach erstem Durchlauf noch nicht beschädigt oder nur leicht angegriffen werden. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in Kategorien eingeteilt und in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt.

Es ist in den Graphen besonders zu erkennen, dass nach dem zweiten Durchlauf der Laserstrahlung der Anteil von starkem Angriff auf PEN-Substrat schon deutlich höher geworden war. Nach dem dritten Verlauf der Laserstrahlung war der Anteil von unbeschädigten oder leicht beschädigten PEN-Substrat nur unter sehr niedrigen Intensitäten zu sehen. Die Grenzintensitäten der Beschädigung zur Trägerfolie nach dem dritten Durchlauf der Laserstrahlung lagen bei den Scangeschwindigkeiten von 100m/s, 200m/s, 300m/s und 400m/s in der Nähe von  $1,0 \text{ MW/cm}^2$  und bei 500m/s Scangeschwindigkeit bei etwa  $2,0 \text{ MW/cm}^2$ .

Wobei der Anteil vom Angriff auf PEN-Substrat nach dem zweiten Durchlauf der Laserstrahlung stark änderte, wies es aber kaum Unterschied des Abtrages von Silberleitbahnschicht nach den zwei Durchläufe auf. Eine starke Verringerung von dem Anteil leichtes Abtrages von Silberleitbahnschicht passierte erst nach drei Durchläufe, wobei es ober der Intensität von  $2,0 \text{ MW/cm}^2$  nur die gelben und grünen Kategorien gab, welche fast kompletter und kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht bedeuten.

Beste Ergebnisse mit drei Durchläufe war bei der Scangeschwindigkeit von 500m/s. Nach einem Durchlauf der Laserstrahlung lag es noch wenige Schichtmaterial an den Spurrändern. Bei zwei Durchläufe der Laserstrahlung wurde dieses restliche Schichtmaterial weiter abgetragen und nach drei Durchläufe wurde es fast komplett abgetragen. Dadurch entstand es schmale und parallele Spuren. Eine direkte Schädigung zum PEN-Substrat war nach drei Durchläufe der Laserstrahlung nicht zu beobachten (Abbildung 24 a), b) und c)).

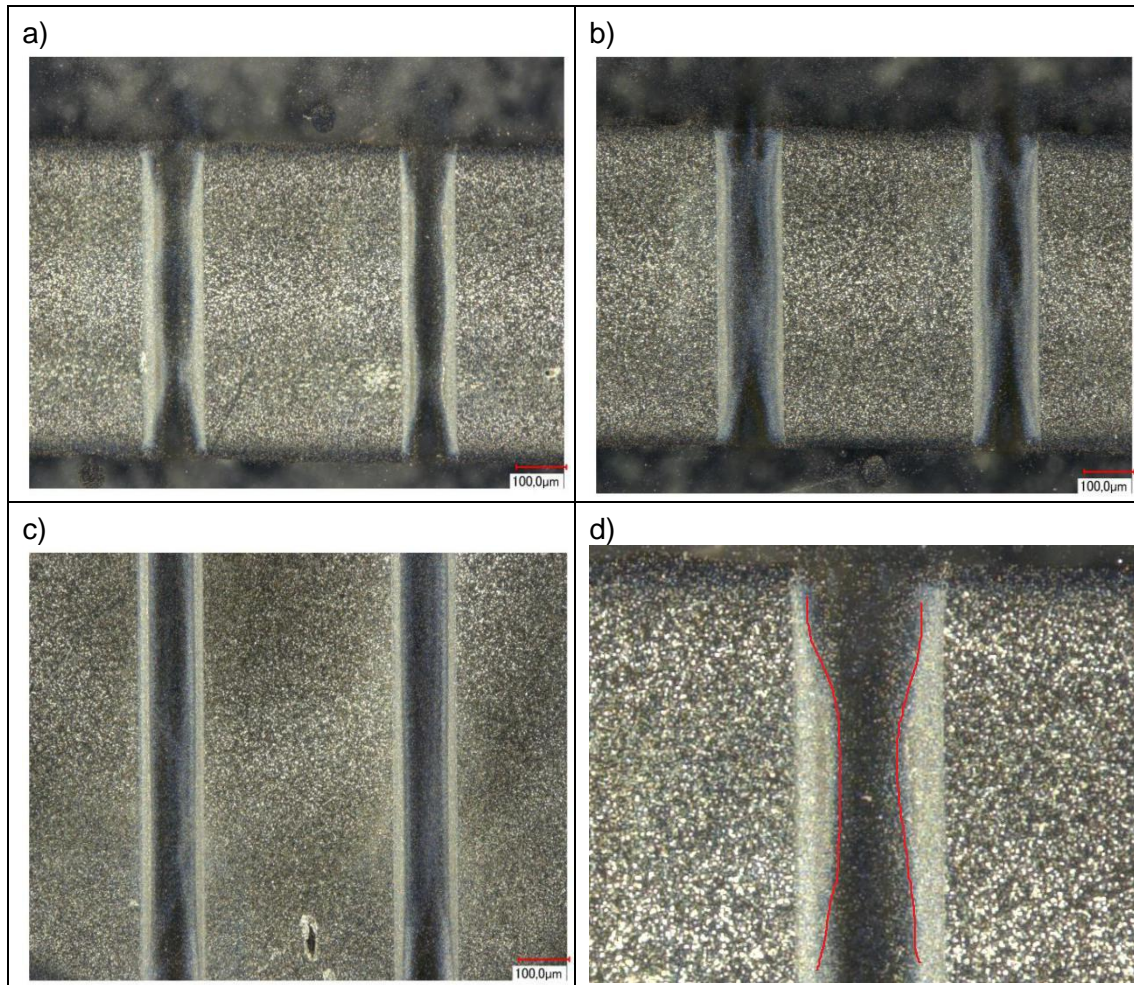


Abbildung 24: Ergebnisse nach: a) einem, b) zwei, c) drei Durchlauf bzw. Durchläufe der Strahlung; d) Vergrößerung von a), Darstellung von den wellenförmigen Spurrändern

Bei manchen Proben entstanden nach dem ersten Durchlauf der Laserstrahlung unparallele oder wellenförmige Spurränder (Abbildung 24 d)). Dies ließ sich mit der Ungleichmäßigkeit der Schichtdicke von Silberleitbahn begründen. Die Silberleitbahn wurde mittels Inkjet-Drucktechnik aufgebracht. Aufgrund der Benetzungskraft von Flüssigkeiten waren die Schichtdicke nach dem Trocknen ungleichmäßig. Da die Wärmeleitfähigkeit von der Leitbahnschicht auch von der Schichtdicke abhängig war, wurde die von der Laserstrahlung aufgetragene Wärmemenge auch unterschiedlich geleitet. Dadurch wurde das Abtragsprozess beeinflusst und führte es zu unparallelen oder wellenförmigen Spurränder.

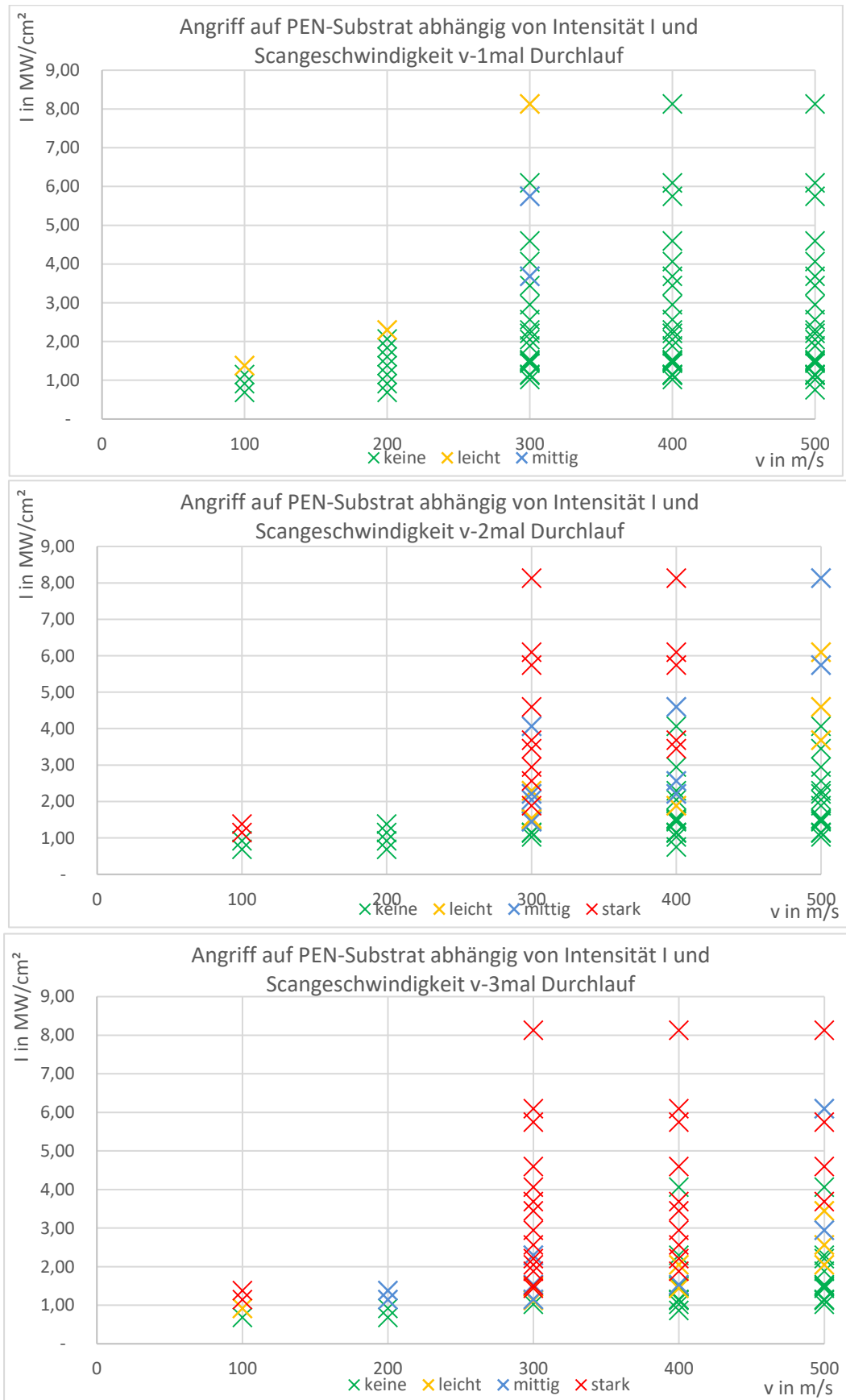


Abbildung 25: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit verschiedenen Durchläufen

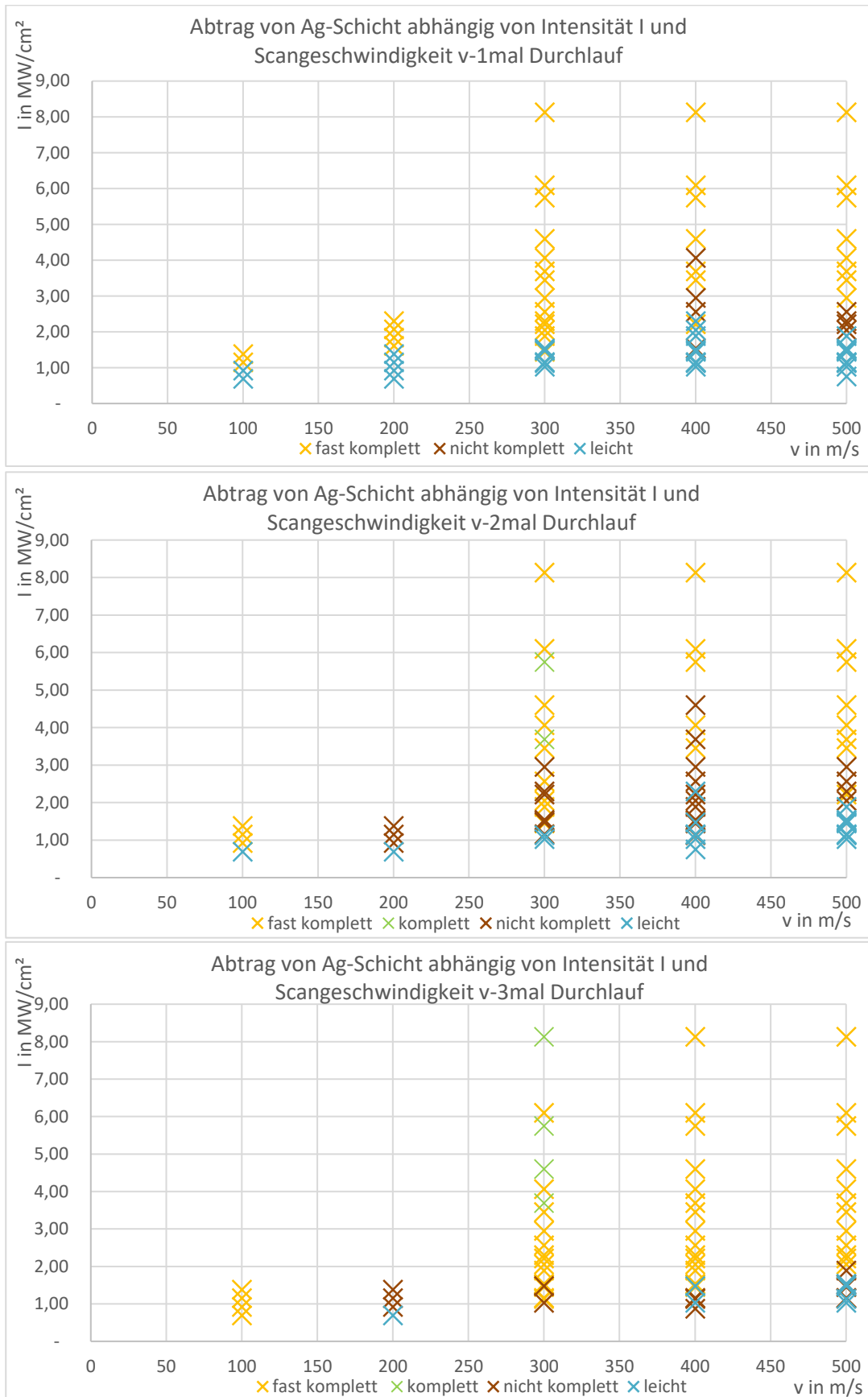


Abbildung 26: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit verschiedenen Durchläufen

### 5.1.3 Versuche mit substratseitiger Bestrahlung

In diesem Teil wurde es versucht, die Probe umgekehrt zu positionieren, sodass die Leitbahnschicht unter der Trägerfolie lag und die Laserstrahlung durch die Trägerfolie auf die Silberleitbahnschicht strahlte (3.2.2). Da die Trägerfolie eine sehr hohe Transmissionsgrad an der Wellenlänge von 1064 nm besaß, sollte ein großer Teil der gesamten Energie von der Laserstrahlung durch die Trägerfolie auf der Silberleitbahnschicht gebracht werden konnte. Die Silberleitbahnschicht wurde vom Innen erwärmt und zu Schmelze bzw. Dampf gebracht. Durch den entstandenen Dampfdruck wurde die Silberleitbahnschicht vom Innen weggeblasen und somit abgetragen. Die Ergebnisse wurden ebenfalls diskutiert und in Kategorien eingeteilt:

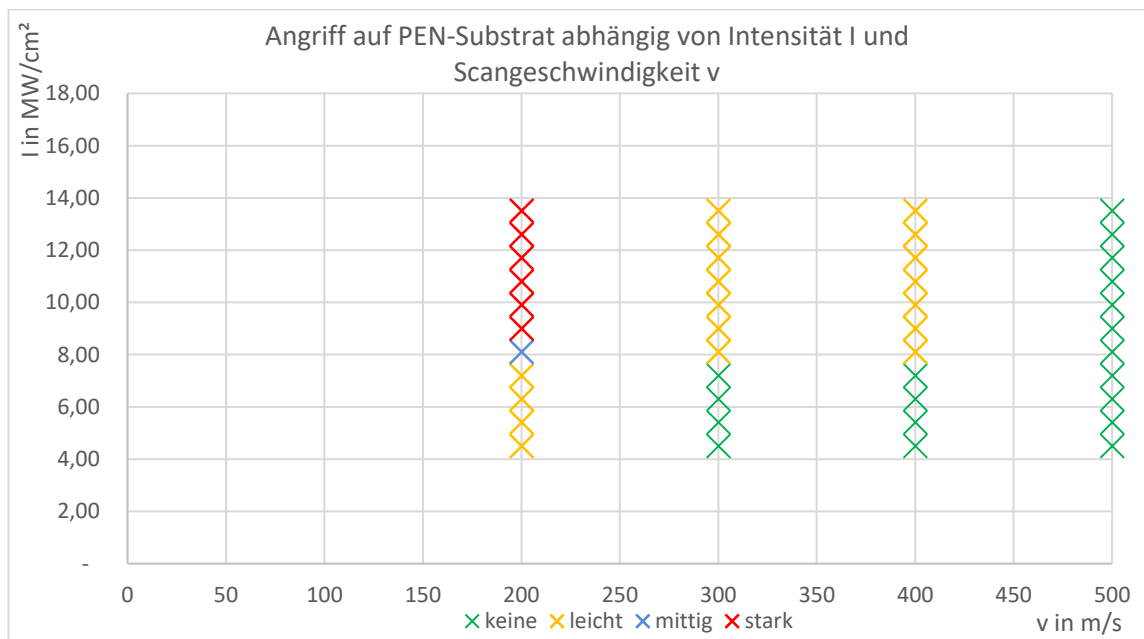


Abbildung 27: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit Bestrahlung auf der unteren Seite der Probe

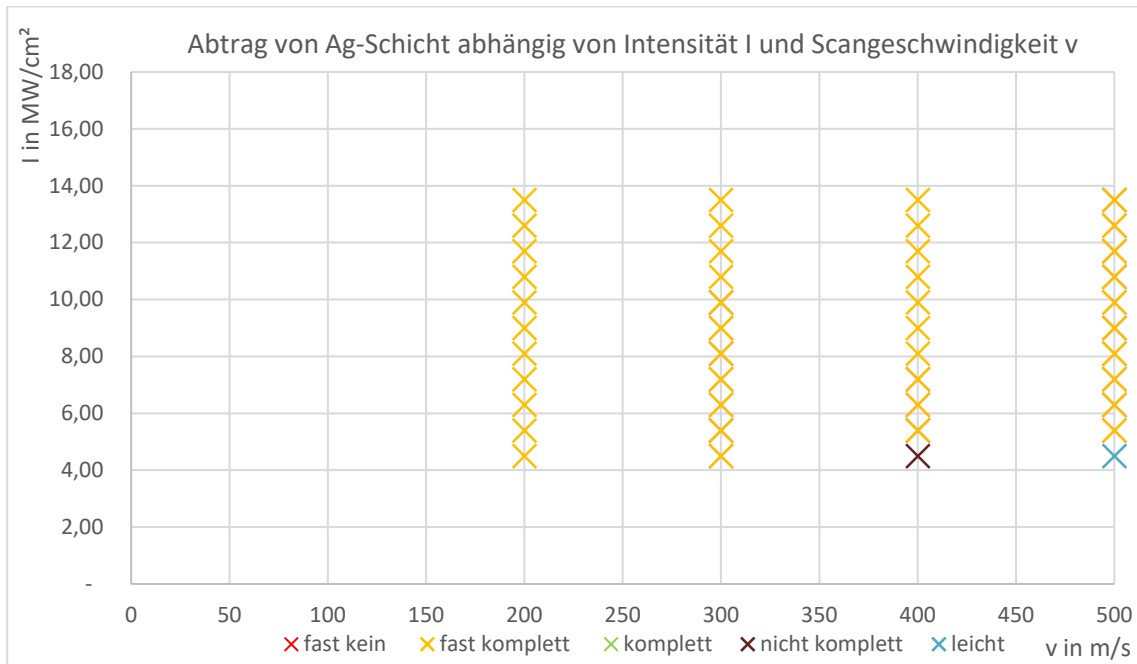


Abbildung 28: Darstellung des Abtrages von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Scangeschwindigkeit mit Bestrahlung auf der unteren Seite der Probe

Aus den durchgeführten Untersuchungen wurden für die Ergebnisse die Strahlintensität berechnet und die günstigen Intensitätsbereiche bzw. Parameterbereiche für verschiedene Scangeschwindigkeiten ausgewählt. In diesen Intensitätsbereichen bzw. Parameterbereichen sollten die Trägerfolien mit der direkten Bestrahlung des Laserlichtes nicht beschädigt oder nur leicht angegriffen werden.

Bei der Scangeschwindigkeit von 200m/s war es bei einer Intensität von ca.4,2 MW/cm<sup>2</sup> noch eine leichte Angriff auf dem PEN-Substrat zu beobachten. Bei 300m/s und 400m/s ließ sich die für das PEN-Substrat unschädliche Intensität niedriger als ca.7,2 MW/cm<sup>2</sup> beschränken. Bei 500 m/s war es bis einer Intensität von ca.13,5 MW/cm<sup>2</sup> keine Schädigung zu der Trägerfolie zu sehen.

Ein fast kompletter Abtrag der Leitbahnschicht ohne direkte Schädigung zur Trägerfolie war möglich. Die entstandenen Spuren waren schmal und parallel. An den Spurrändern war wenige Ablagerung vom Schichtmaterial zu sehen (Abbildung 29 a)). Unter dem Mikroskop konnte man an den abgetragenen Stellen durchschauen und eine leichte braune Verfärbung der Trägerfolie war zu merken. Die mit höherer Intensität und Scangeschwindigkeit bearbeiteten Proben hatten auch sauberer Spurränder, weil die Wechselwirkungszeit geringer war und mit höherer Energie weniger stärkerer Dampfdruck erzeugt wurde, damit das Wegblasen bzw. Abtragen des Schichtmaterials gut erfolgen konnten (Abbildung 29 b)).



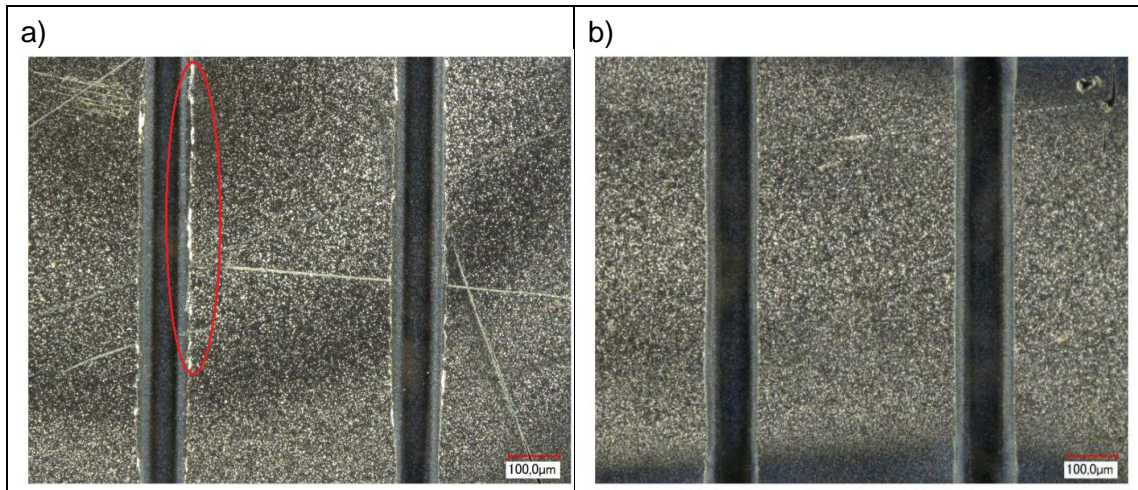


Abbildung 29: Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne Schädigung zum PEN-Substrat; a) Ablagerung von Schmelze deutlich beobachtbar; b) Schmale und parallele Abtragspuren zu beobachten

## 5.2 Untersuchungen mit 1064 nm ns-Pulslaser

Als zweiter Hauptteil dieser Arbeit wurden in diesem Teil Untersuchungen mit einem ns-Pulslaser mit der Wellenlänge von 1064 nm durchgeführt. Die zu variierenden Parametern waren die mittlere Laserleistung, die Scangeschwindigkeit des Galvanometer-Scanners, die Pulsdauer und die Pulswiederholfrequenz. Um Einzelpulsabträge mit hohem Pulsabstand realisieren, sodass sich die einzelnen Pulse gegenseitig nicht beeinflussten, wurden die Pulswiederholfrequenz und die Scangeschwindigkeit angepasst.

Mit dem verwendeten ns-Pulslaser konnte Laserpulse mit 4 Pulsdauern realisiert werden: 30 ns, 60 ns, 120 ns und 240 ns. Bei Pulsdauern von 30 ns lagen die Pulsabträge mit erreichbarer max. Scangeschwindigkeit trotzdem ganz nah voneinander. Einzelpulsabtrag bei 30ns Pulsdauer war deshalb mit der Laseranlage nicht möglich.

Sowie bei den Untersuchungen mit dem cw-Laser wurden hierbei auch mit materialseitiger und substratseitiger Bestrahlung untersucht. Die Ergebnisse von den Versuche mit Pulsdauern von 60 ns, 120 ns und 240 ns wurden diskutiert und in den entsprechenden Kategorien eingeteilt. Der Einfluss von Pulsdauer zum Angriff von Laserpulse auf PEN-Substrat und zum Abtrag der Silberleitbahnschicht sollte dabei auch beobachtet und diskutiert werden.

### 5.2.1 Pulsabtrag mit materialeseitiger Bestrahlung

Wie bei den Untersuchungen mit der cw-Laseranlage wurde in diesem Teil die Strahlung direkt auf der Silberleitbahnschicht aufgebracht. Im Vergleich zu den Versuche mittels cw-Laser waren die Ergebnisse bei der ns-Laseranlage deutlicher zu erkennen und damit ließen die besser diskutieren und anschließend in den entsprechenden Kategorien einteilen. Die Ergebnisse wurden in den folgenden Abbildungen dargestellt:

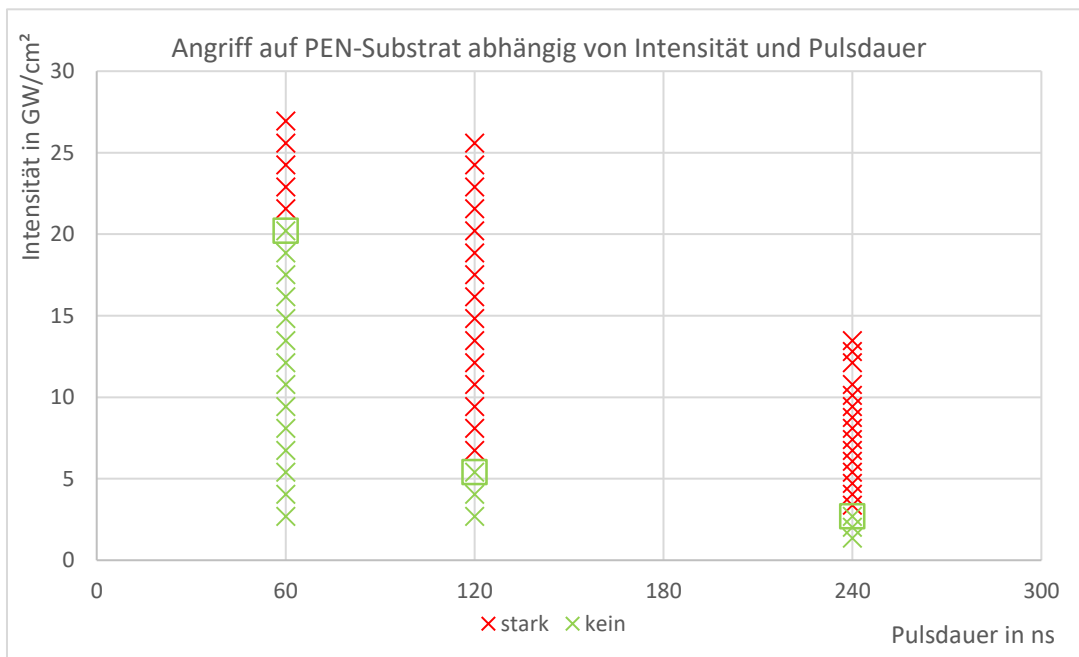


Abbildung 30: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer

Bei den Untersuchungen mittels cw-Laser waren die Ergebnisse vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer in 5 Kategorien unterzuscheiden, wobei es einen Übergang von leichtem Angriff bis zu starken Beschädigungen vom PEN-Substrat zeigte. Dieser Übergang war beim ns-Laser kaum zu sehen, da bei den Versuche mittels cw-Laser der Angriff auf PEN über Fläche der Schädigungen und Stärke der Verfärbung diskutiert wurde. Hierbei ließ der Angriff auf PEN besser erkennen und zwischen starker und keiner Schädigung unterscheiden (Abbildung 31).

Eine Beschädigung von PEN passierte bei 60 ns Pulsdauer ab einer Intensität von ca. 20 GW/cm². Bei längerer Pulsdauer senkte sich die Grenzintensität stark ab, bis zu ca. 5 GW/cm² bei 120 ns Pulsdauer und ca. 3,5 GW/cm² bei 240 ns Pulsdauer. Die Absenkung der Grenzintensität zwischen starker und keiner Schädigung nähern sich zu einer Logarithmusfunktion.

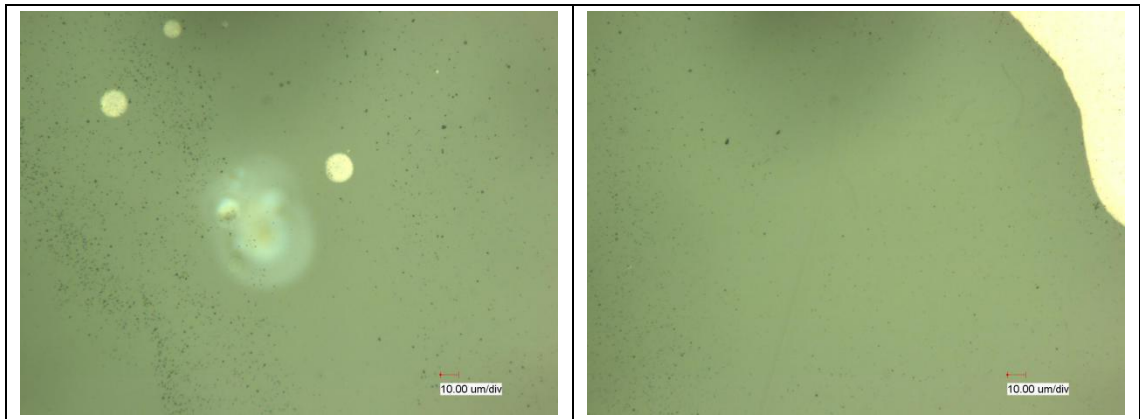


Abbildung 31: Beispiele von starker (links) und keine (rechts) Beschädigung von PEN

Aufgrund der von der Laserquelle bestimmten Intensitätsverteilung der Laserpuls zeigten alle von dem Laserpuls beschossenen Spuren eine wassertropfenförmige Form an. Der Abtrag von Silberleitbahnschicht wurde in der Abbildung 32 dargestellt. Bei der Pulsdauer von 60 ns war es mit der höchsten Leistung und niedrigster Pulswiederholfrequenz nur leichter Abtrag der Leitbahnschicht zu beobachten (Abbildung 33). Bei 120 ns und 240 ns Pulsdauern war die Silberleitbahnschicht mit der niedrigsten mittleren Leistung und der Intensität von ca. 3 GW/cm<sup>2</sup> auch fast komplett abgetragen (Abbildung 34).

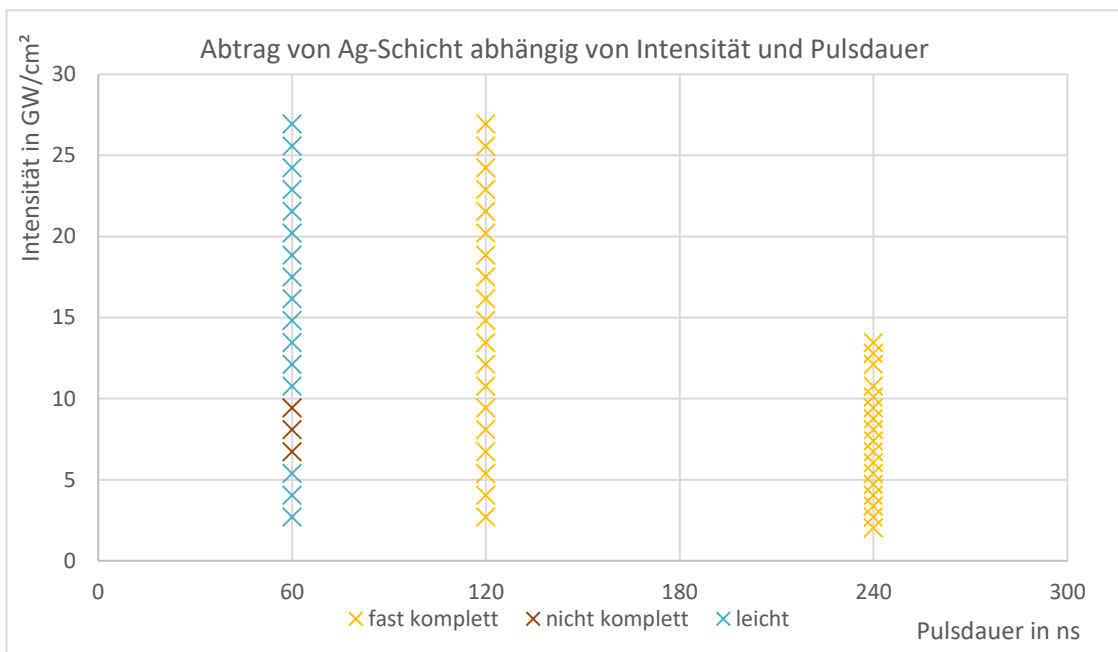


Abbildung 32: Darstellung vom Abtrag von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Pulsdauer

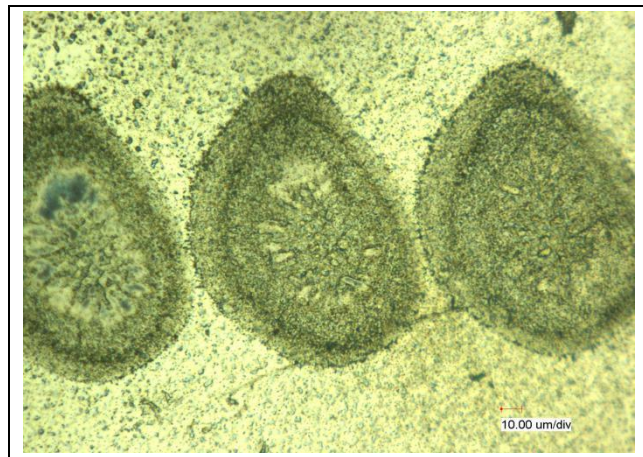


Abbildung 33: Leichter Abtrag der Leitbahnschicht bei 60 ns Pulsdauer mit max. mittlerer Leistung

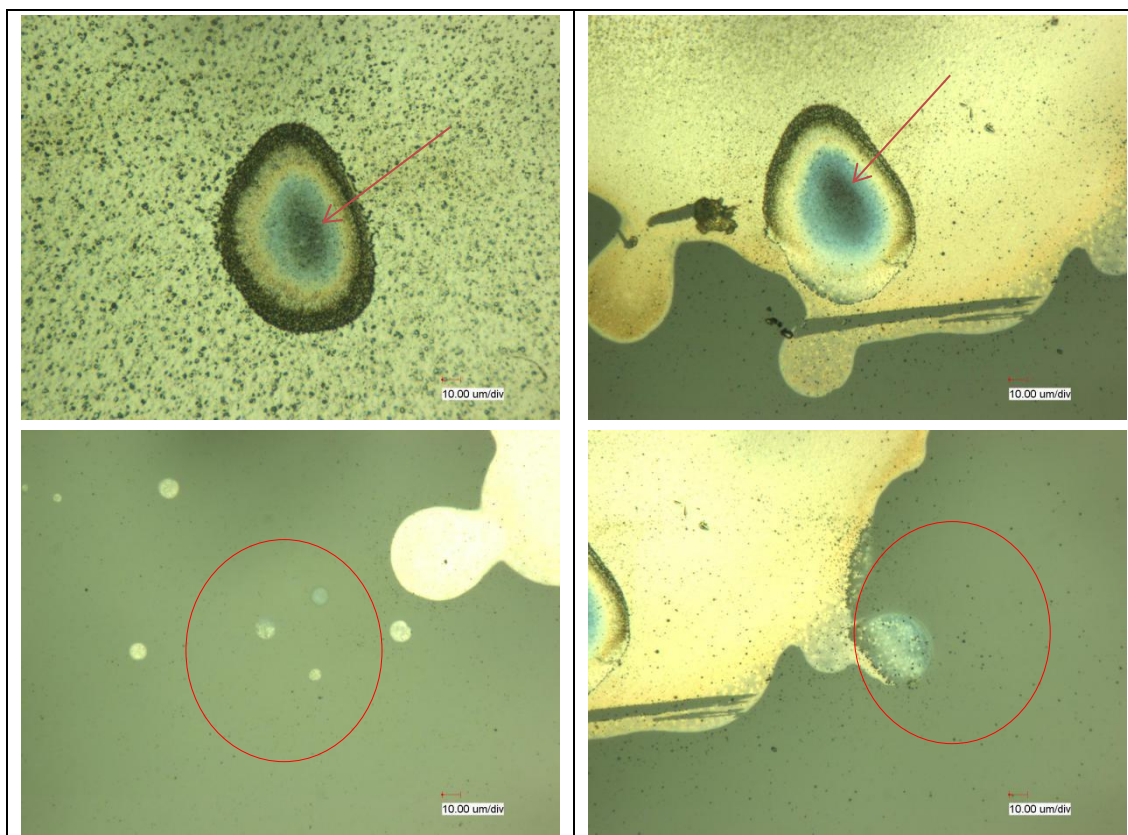


Abbildung 34: Fast kompletter Abtrag der Leitbahnschicht bei 120 ns (obenlinks) und 240 ns (obenrechts) Pulsdauern mit min. mittlerer Leistung; kleine schwarze Fläche; keine direkte Schädigung von PEN an den bestrahlten Stellen beobachtbar (unten)

Bei den meisten Proben war in der Mitte der abgetragenen Stelle eine kleine schwarze, durch Wärmeleitung zwischen Silberschicht und Trägerfolie angegriffene Fläche beobachtbar, auch wenn der PEN-Substrat nicht direkt beschädigt war (Abbildung 34 oben). Ein fast kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht ohne direkte Beschädigung von PEN

war nur mit kleiner beschädigter schwarzen Fläche bei 120 ns und 240 ns Pulsdauern im geringen Intensitätsbereich möglich (Abbildung34 ).

### 5.2.2 Pulsabtrag mit substratseitiger Bestrahlung

Die Ergebnisse in Kategorien wurden in den Abbildungen 35 und 36 dargestellt.

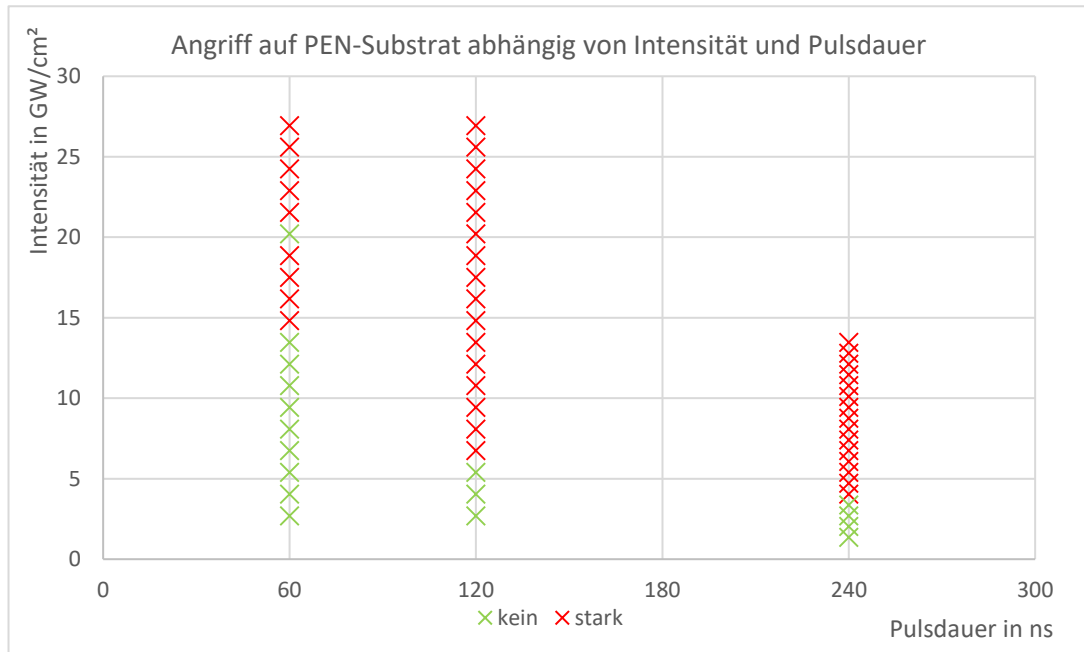


Abbildung 35: Darstellung vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer

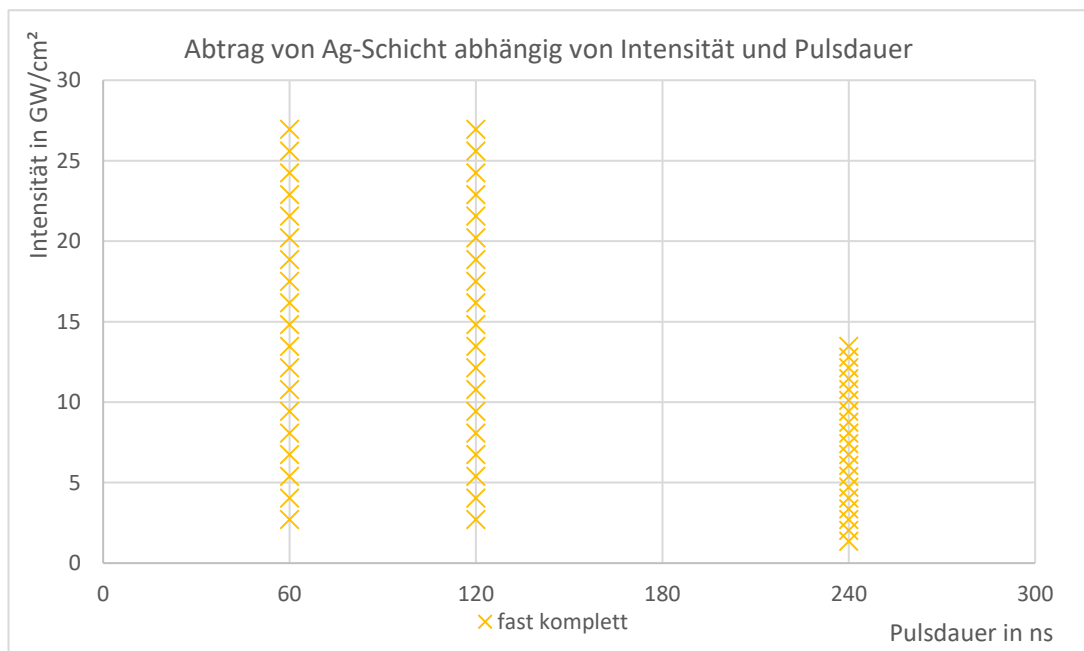


Abbildung 36: Darstellung vom Abtrag von Ag-Schicht abhängig von Intensität und Pulsdauer

Das Graph vom Angriff auf PEN-Substrat abhängig von Intensität und Pulsdauer weicht von dem Versuch mit materialseitiger Bestrahlung (Abbildung 30) nur im kleinen Bereich ab. Hier stehts zwischen den Intensitäten von  $15 \text{ GW/cm}^2$  und  $20 \text{ GW/cm}^2$  auch die starke Beschädigung von PEN. Grund dafür war die Entstehung der Spuren nach dem Abtragen überschüssiger Schichtmaterial (Abbildung 37 links). Diese wurden auch als starker Angriff erkannt.

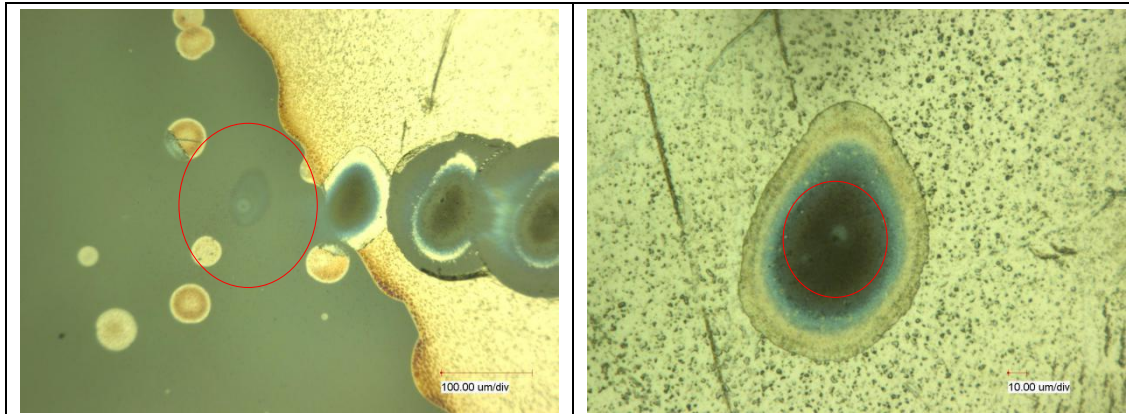


Abbildung 37: links: Beeinflusste Spur; rechts: schwarze angegriffene Fläche in der Mitte

Der Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung erfolgte leichter als bei materialseitiger Bestrahlung. Bei aller Proben war der Abtrag der Silberleitbahn fast komplett, auch bei der Pulsdauer von 60 ns. Wie beim Versuch mit materialseitiger Bestrahlung entstand nach dem Abtragen in der Mitte die angegriffene schwarze Fläche (Abbildung 37 rechts). Die substratseitiger Bestrahlung erzeugte im Innen der Silberschicht Dampfdruck, durch den der Abtrag erfolgte. Bei manchen Proben waren der Dampfdruck so stark, sodass die Schicht außerhalb der von Laserpuls beschossenen Stelle auch weg geblasen wurde (Abbildung 38 links). Die gesamten abgetragenen Spur war annähernd ein Kreis, der um den Mittelpunkt der Laserpuls lag. An manchen Proben waren die durch Wegblasen der Silberschicht entstandenen Risse zu beobachten (Abbildung 38 rechts)

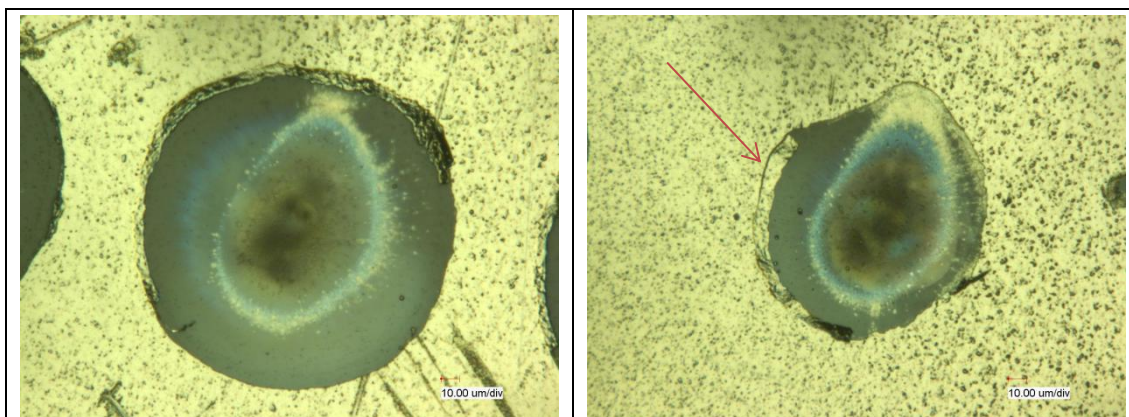


Abbildung 38: links: kreisförmige Spur nach dem Abtragen; rechts: durch Wegblasen entstandene Risse

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein fast kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht war bei aller drei im Kapitel 5.1 beschriebenen Varianten möglich, wobei eine direkte Beschädigung der Trägerfolie auch nicht beobachtet werden konnte. Jedoch eine leichte braune Verfärbung der Trägerfolie an der abgetragenen Stelle war bei allen Varianten beobachtbar.

Beim Abtrag mit materialseitiger Bestrahlung mit einem Durchlauf des Laserstrahls war es meistens die entsprechenden wellenförmigen Spurränder zu beobachten, was beim Abtrag mit drei Durchläufe kaum zu sehen war. Mehrere Durchläufe der Laserstrahlung führten zu stärkerem Angriff auf dem PEN-Substrat als bei einem Durchlauf. Deswegen ließ sich der Intensitätsbereich bzw. Parameterbereich für fast kompletten Abtrag der Leitbahn ohne direkte Schädigung der Trägerfolie beim Abtrag mit mehreren Durchläufen der Laserstrahlung stark beschränkt.

Der Abtrag der Leitbahn ohne direkte Schädigung der Trägerfolie bei materialseitiger und substratseitiger Bestrahlung mit einem Durchlauf des Laserstrahls war in relativ großen Intensitätsbereiche bzw. Parameterbereiche möglich. Die Spurränder bei substratseitiger Bestrahlung waren schmal und parallel. An den abgetragenen Stellen war die Trägerfolie noch gut durchsichtbar. Der Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung hat damit im Vergleich zu anderen Varianten die beste Abtragsqualität.

Je länger die Wechselwirkungszeit war, desto größer wurde die durch Wärmeleitung zwischen Silberschicht und Trägerfolie beeinflusste Zone. Beim fast kompletten Abtrag der Silberschicht mittels ns-Laserpuls war die in der Mitte entstandenen schwarze Fläche schwer zu vermeiden. Der Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung ging leichter, wobei der erzeugten Dampfdruck ausgenutzt wurde.

Mit diesen Untersuchungen wurde es verifiziert, dass ein fast kompletter Abtrag der Silberleitbahnschicht mittels 1064nm Wellenlänge cw-Laser mit leichter Verfärbung von PEN-Substrat möglich war. Bevorzugter Abtragsverfahren war der Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung.





## Literatur

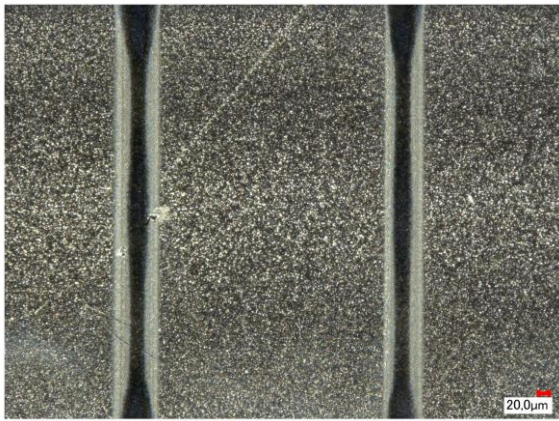
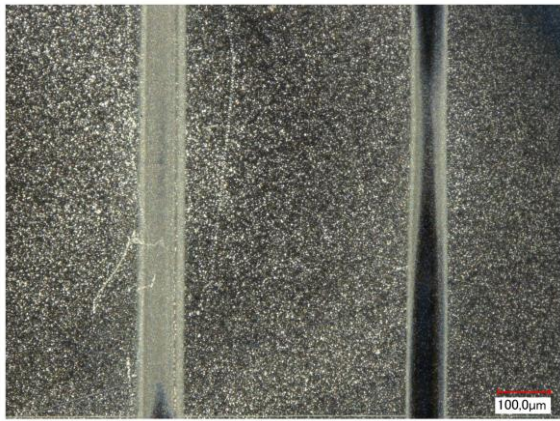
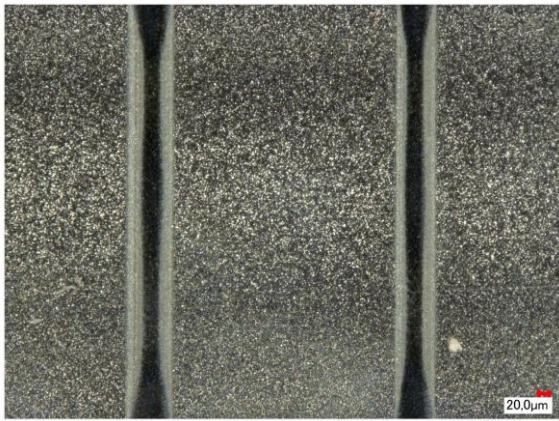
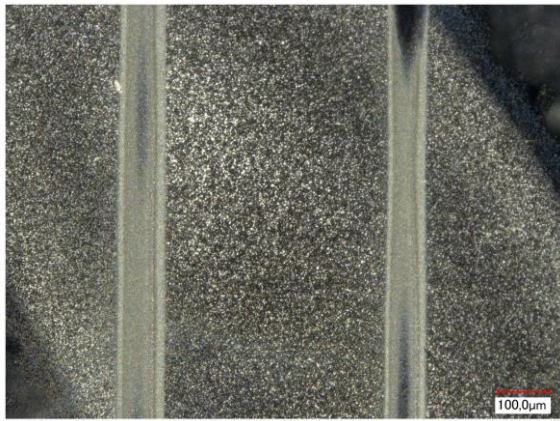
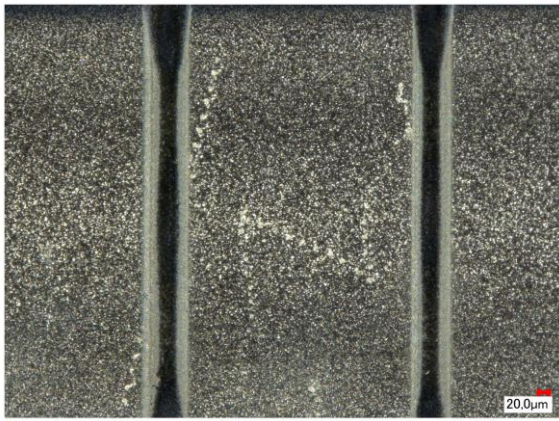
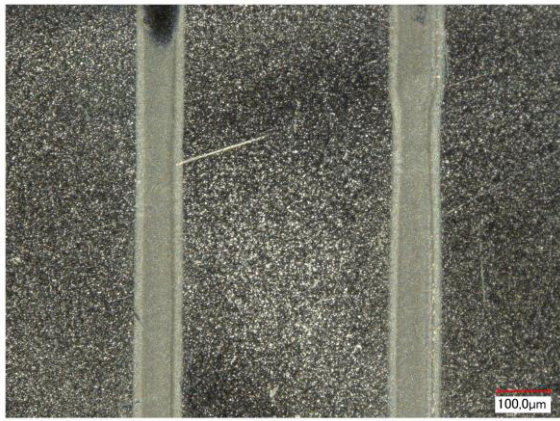
- [1] <https://www.itwissen.info/FPC-flexible-printed-circuit-Flexible-Leiterplatte.html>, verfügbar am 06.08.2018 15:17
- [2] [http://www.contag.de/leiterplatten.php?leiterplatten\\_produkte\\_flex.html](http://www.contag.de/leiterplatten.php?leiterplatten_produkte_flex.html), verfügbar am 06.08.2018 15:00
- [3] [https://www.iof.fraunhofer.de/content/dam/iof/de/documents/Publicationen/Jahresbericht/2004/2004\\_05\\_nolte.pdf](https://www.iof.fraunhofer.de/content/dam/iof/de/documents/Publicationen/Jahresbericht/2004/2004_05_nolte.pdf), verfügbar am 07.08.2018 15.50
- [4] <https://www.wlw.de/de/firmen/lasermikrobearbeitung>, verfügbar am 15.12.2018 12:00
- [5] [https://www.lzh.de/sites/default/files/events/hannover\\_messe/2016/de/LZH-PS-MIC-kroepke-clock\\_de.pdf](https://www.lzh.de/sites/default/files/events/hannover_messe/2016/de/LZH-PS-MIC-kroepke-clock_de.pdf), verfügbar am 15.12.2018 12:10
- [6] [http://laz.hs-mittweida.de/3\\_forschung/20\\_mikro/beispiele/Mikrobearbeitung%20Kunststoff.pdf](http://laz.hs-mittweida.de/3_forschung/20_mikro/beispiele/Mikrobearbeitung%20Kunststoff.pdf), verfügbar am 16.12.2018 15:10
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Faserlaser>, verfügbar am 01.12.2018 20:10
- [8] <https://www.eval.at/lasa---laser-sicherheit-in-der-ausbildung/kapitel-1---laser-allgemein/1-5---lasertypen-und-anwendungen>, verfügbar am 01.12.2018 20:15

- [9] <https://www.schneidforum.de/schneidwissen/laserschneiden/faser-laser-vs-co2.html>, verfügbar am 01.12.2018 20:23
- [10] <https://www.semanticscholar.org/paper/A-High-Definition-LIDAR-System-Based-on-Two-Mirror-Nguyen-Dinh/24597f588ec766081fb263d32a04c602ca78db04>, verfügbar am 06.11.2018 18:14
- [11] [https://www.google.de/search?q=galvo+scanner+prinzip&sa=X&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ved=2ahUKEwjE5-CD06ffAhXEa1AKHQ\\_MCUcQsAR6BA-gEEAE&biw=1513&bih=648#imgrc=3ovvw-BYYuWy9M:](https://www.google.de/search?q=galvo+scanner+prinzip&sa=X&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ved=2ahUKEwjE5-CD06ffAhXEa1AKHQ_MCUcQsAR6BA-gEEAE&biw=1513&bih=648#imgrc=3ovvw-BYYuWy9M:), verfügbar am 06.11.2018 18:30
- [12] [https://www.researchgate.net/publication/318834415\\_POLYGO-NSCANTECHNIK\\_FUR\\_DIE\\_LASERMIKROBEARBEITUNG/download](https://www.researchgate.net/publication/318834415_POLYGO-NSCANTECHNIK_FUR_DIE_LASERMIKROBEARBEITUNG/download), verfügbar am 17.12.2018 21:05
- [13] <https://indico.frm2.tum.de/event/100/contributions/973/attachments/238/352/Hochrate-Mikro-SLM.pdf>, verfügbar am 16.12.2018 20:25
- [14] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylennaphthalat>, verfügbar am 06.08.2018 14:16
- [15] S. Berdous; D. Berdous; N. Saidi-Amroun; D. E. Akretche; M Saidi: The Permeability of Polyester Film (PEN) to Copper Ions; International Journal of Polymer Analysis and Characterization; 18:5; 358-368; Algier; 2013
- [16] B. Duh; Verfahren zur Kristallisation von Polyethylennaphthalat; Ohio; US; 1996

- [17] <http://www.formel-sammlung.de/formel-Schmelztemperatur-und-spezifische-Schmelzwaerme-3-25-152.html>, verfügbar am 17.01.2018 14:00
- [18] K. M. McPeak; S. V. Jayanti; S. J. P. Kress; S. Meyer; S. Iotti; A. Rossinelli; D. J. Norris; Plasmonic films can easily be better; Rules and recipes; ACS Photonics 2; 326-333; 2015
- [19] H. Nakamura; Y. Shirakawa; H. Kitamura; T. Yamada; Z. Shidara; T. Yokozuka; P. Nguyen; T. Takahashi; S. Takahashi; Blended polyethylene terephthalate and polyethylene naphthalate polymers for scintillation base substrates; Japan; 2013
- [20] <http://www.rsc.org/periodic-table/element/47/silver>, verfügbar am 12.01.2018 10:54
- [21] <http://www.formel-sammlung.de/formel-Siedetemperatur-und-spezifische-Verdampfungswaerme-3-25-153.html>, verfügbar am 17.01.2018 14:02
- [22] Witlof, Brunner; Klaus, Junge: Wissensspeicher Lasertechnik, 286-289, Leipzig: Fachbuchverl., 1987
- [23] <http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/fu-berlin/2002/31/Grundlagen.pdf>, verfügbar am 07.12.2018 18:20



# Anlagen

$v = 400 \text{ m/s}$ $I = 9,0 \text{ MW/cm}^2$	$v = 500 \text{ m/s}$ $I = 9,0 \text{ MW/cm}^2$
	
$I = 9,9 \text{ MW/cm}^2$	$I = 9,9 \text{ MW/cm}^2$
	
$I = 10,8 \text{ MW/cm}^2$	$I = 10,8 \text{ MW/cm}^2$
	
$I = 11,07 \text{ MW/cm}^2$	$I = 11,07 \text{ MW/cm}^2$

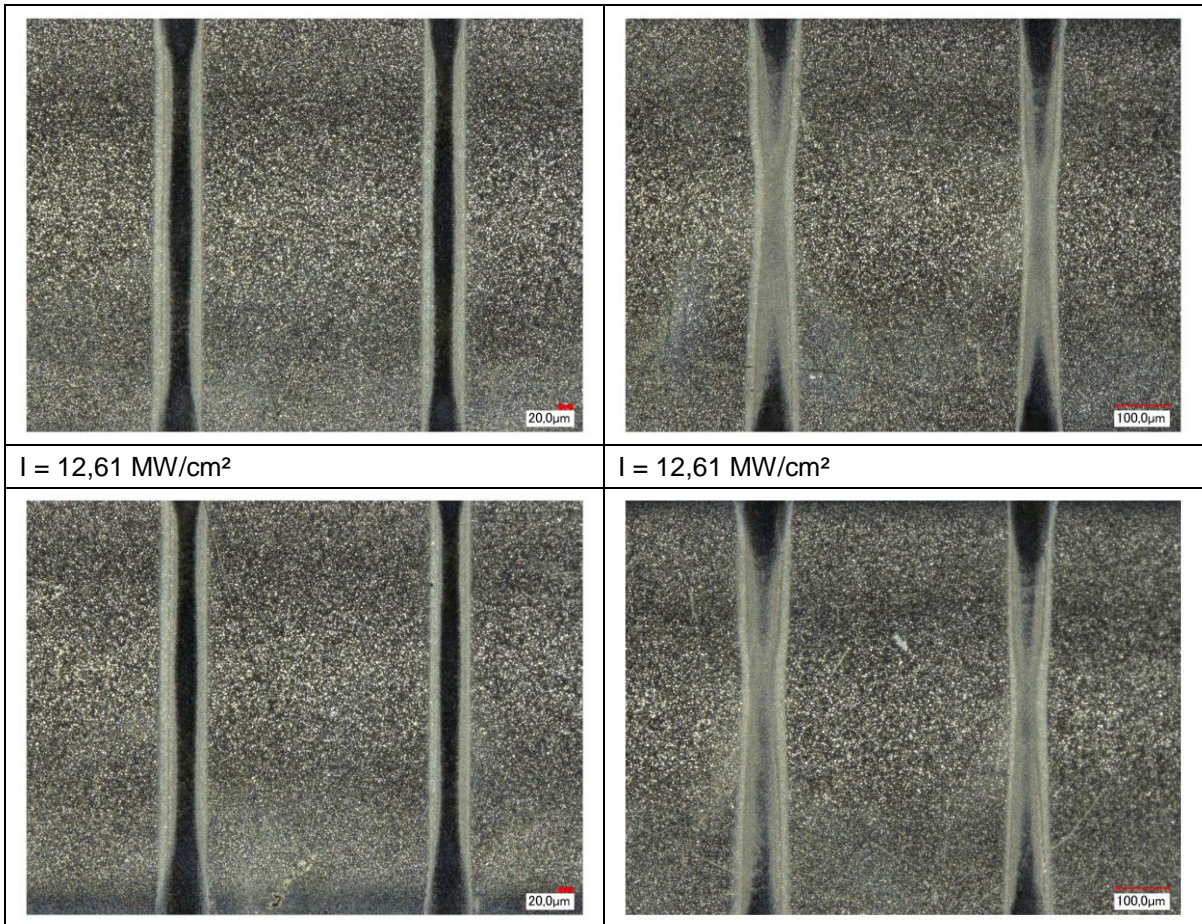

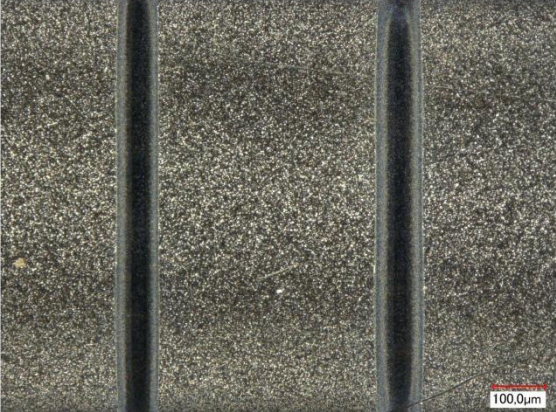






Abbildung 39: Abtrag mit materialeitiger Bestrahlung mit steigender Intensität bei 400 m/s und 500 m/s Scangeschwindigkeit; keine direkte Beschädigung von PEN ( $f_z = +1 \text{ mm}$ , Linienanzahl = 1)



<p><math>v = 300 \text{ m/s}</math></p>	<p><math>v = 400 \text{ m/s}</math></p>
<p><math>I = 4,5 \text{ MW/cm}^2</math></p>	<p><math>I = 4,5 \text{ MW/cm}^2</math></p>
	
<p><math>I = 5,4 \text{ MW/cm}^2</math></p>	<p><math>I = 5,4 \text{ MW/cm}^2</math></p>
	
<p><math>I = 6,3 \text{ MW/cm}^2</math></p>	<p><math>I = 6,3 \text{ MW/cm}^2</math></p>
	



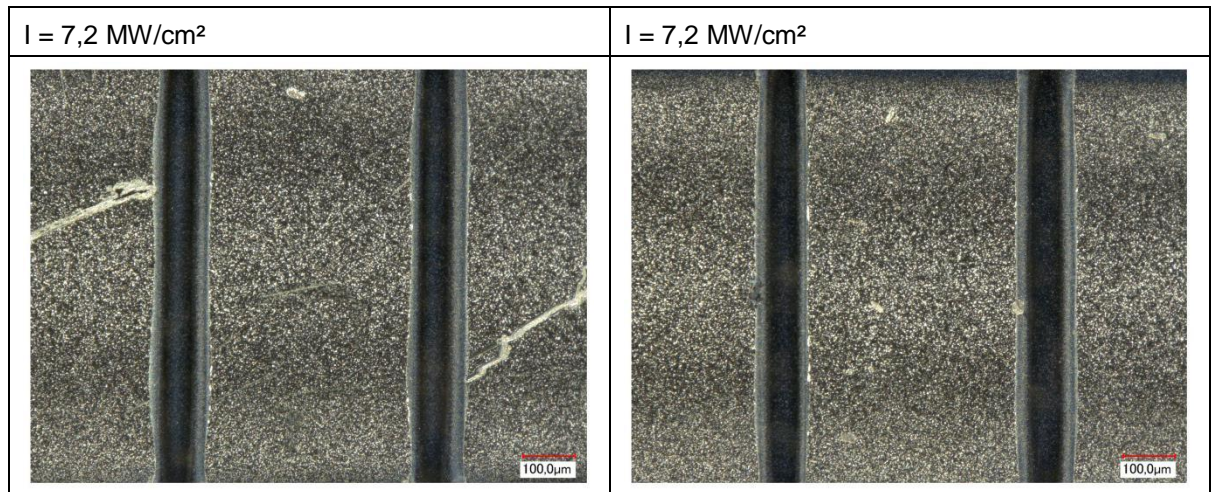


Abbildung 40: Abtrag mit substratseitiger Bestrahlung mit steigender Intensität bei 300 m/s und 400 m/s Scangeschwindigkeit; keine direkte Beschädigung von PEN (fz = + 1 mm, Linienanzahl = 1)

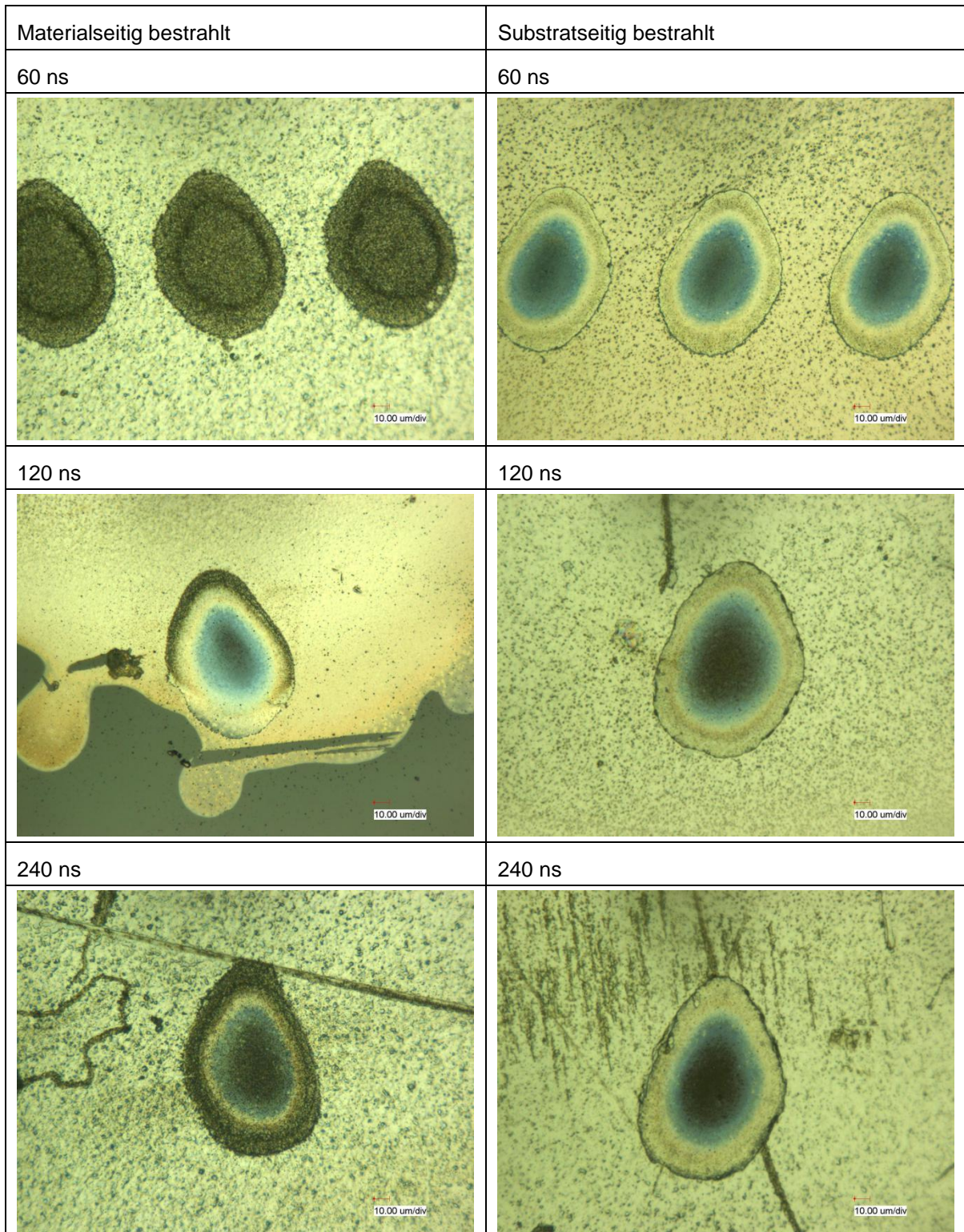


Abbildung 41: Einzelpulsabtrag mit materialeseitiger und substratseitiger Bestrahlung mit steigender Pulsdauer; keine direkte Beschädigung von PEN ( $I = 2,694 \text{ GW/cm}^2$ )

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 19.12.2018

Zihao Zhao