GEFÖRDERT VOM

wir! Wandel durch Innovation in der Region

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Abschlussbericht – Teil II Eingehende Darstellung

Fördermaßnahme: **Innovation & Strukturwandel**

WIR!-Bündnis **WIR! GRAVOmer**

Vorhaben: **Teilprojekt 2: „Mikrostrukturierung von Schneidstempeln zur tribologischen Auslegung von Stanzprozessen" KMLT GmbH**

„TriboCuttingPunch"

GRAVOMER
INTELLIGENT SURFACE TECHNOLOGY NETWORK

KMLT
LASER PRECISION

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03WIR2012B
Projektlaufzeit:	01.01.2023 bis 31.12.2024
Berichtslaufzeit:	01.01.2023 bis 31.12.2024

Berichtspflichtiger: KMLT GmbH
Betriebsstätte Neukirch
Freiberger Str. 114,
01159 Dresden

Projektleitung: Herr Kalman Kirchner

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WIR2012B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung 3

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben geführt wurde 4

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens 4

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 8

1.5. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit mit Dritten 9

2. Ausführliche Darstellung

2.1. AP1: Anforderungskatalog / Lastenheft 10

2.2. AP 2: Strukturauslegung und Schaffung der Versuchsvoraussetzungen 11

2.3. AP 3: Schneidwerkzeug und Strukturierung von Schneidstempeln 19

2.4. AP 4: Bauteil- und Schneidwerkzeugcharakterisierung 24

2.5. AP 7: Ganzheitliche Bewertung der Versuchsergebnisse 28

2.6. AP 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 31

3. Verwendung der Zuwendung / Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 33

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 33

5. Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse 34

6. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 34

7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse 35

(Hinweis für die Bearbeitung: Bei den Arbeitspaketen mit der kurzen Darstellung beginnen und dann die Themen des Arbeitspaketes nacheinander unter Teilüberschriften behandeln. Der Sachbearbeiter muss die Punkte aus dem Arbeitspaket im Antrag möglichst im Bericht wiederfinden.)

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die nachfolgende Aufgabenstellung zur „Optimierung der Tribologie in Stanzprozessen" abgeleitet. Es gilt dabei, die Mikrostrukturierung von Schneidstempeln systematisch zu untersuchen, um deren Verschleißverhalten und Standmengenerhöhung in Abhängigkeit der Stempelform und des zu beschneidenden Werkstoffs signifikant zu verbessern.

Im ersten Schritt musste eine umfassende Ressourcenplanung durchgeführt werden, die alle notwendigen Materialien, Werkzeuge und Technologien berücksichtigt, um die Versuchsreihen in den vier definierten Versuchsteilen A bis D (siehe Abbildung 1) erfolgreich durchzuführen. Im Anschluss daran erfolgte die Ableitung einer detaillierten Versuchsmatrix, welche sicherstellt, dass die Versuchsbedingungen für alle Teile einheitlich und reproduzierbar sind, um somit vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten. Nicht dazu zählen die technologischen Schnittparameter, da diese in Abhängigkeit des zu beschneidenden Werkstoffs gewählt werden müssen.

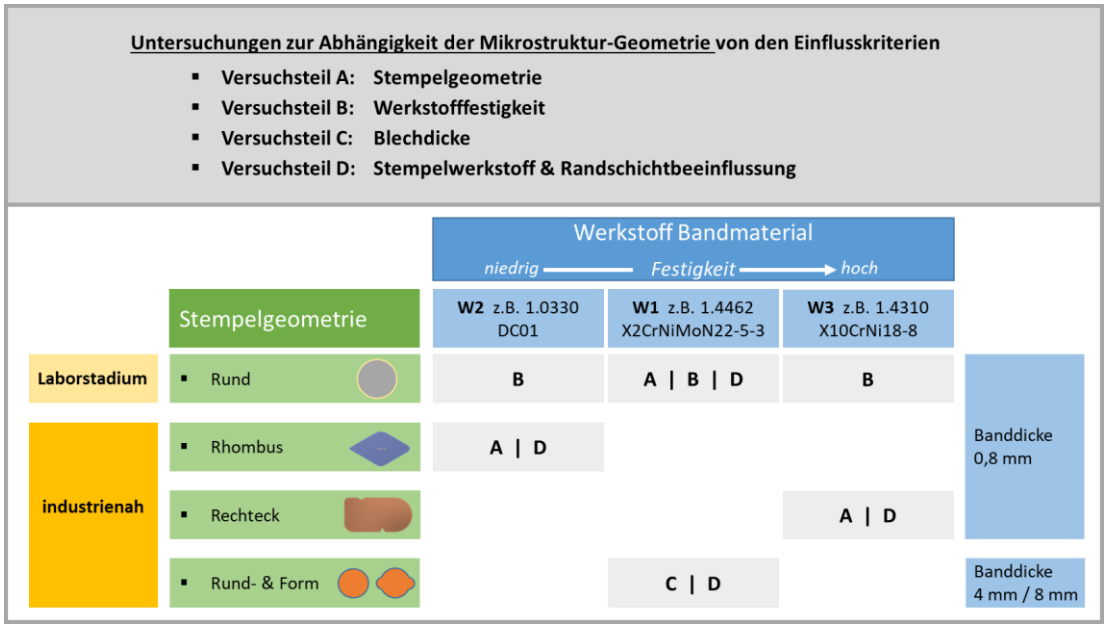


Abbildung 1: Untersuchungen zur Abhängigkeit der Mikrostruktur-Geometrie von verschiedenen Einflussparametern

Die Durchführung der Versuche umfasst in Teil A die Untersuchung des Einflusses verschiedener Mikrostrukturierungen auf die Stanzprozesse, wobei unterschiedliche Stempel- und Bandwerkstoffe berücksichtigt werden. In Teil B sind die verschiedenen Bandwerkstoffe unter identischen technologischen Bedingungen zu vergleichen, um den spezifischen Einfluss der Mikrostrukturierung isoliert zu bewerten. Teil C beinhaltet die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf Bänder höherer Blechdicken, bei gleichzeitiger Variation der technologischen Bedingungen des Feinschneidens bei einem assoziierten Partner. Schließlich werden in Teil D Einzelparameterversuche durchgeführt, in denen alternative Stempelwerkstoffe sowie unterschiedliche Laserablationsverfahren hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Stempelrandschichteigenschaften untersucht werden.

Eine essenzielle Komponente der Aufgabenstellung ist die Ableitung einer geeigneten Messstrategie zur Erfassung der Bauteil- und Stempelqualität, um die Ergebnisse der Versuche quantitativ und qualitativ zu analysieren.

Die abschließende Dokumentation der Versuchsergebnisse sowie deren kritische Diskussion der Ergebnisse im Kontext der übergeordneten Projektzielen wie beispielsweise die Erarbeitung von neuen Kompetenzen im Werkzeugbau, der Laserstrukturierung zur Absicherung der Innovationsfähigkeit und dem Erhalt der ökologisch wirtschaftlichen Lebensverhältnisse sind Bestandteil des Projekts.

Durch die strukturierte Bearbeitung dieser Aufgabenstellung wird angestrebt, substanzielle Fortschritte in der Mikrostrukturierung von Schneidstempeln zu erzielen, die zu einer signifikanten Verbesserung der Stanzprozesse führen können.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben geführt wurde

Die Motivation des Projekts lag darin, die Relevanz der tribologischen Optimierung von Stanzprozessen sowie der Erhöhung der Standmengen der eingesetzten Aktivteile auf ein breites Spektrum an Anwendungsbereichen innerhalb der Schneidtechnologien zu untersuchen. Die von den Partnern übernommenen Aufgaben sind in direkter Übereinstimmung mit ihren in der Vergangenheit erworbenen Kompetenzen und sind strategisch auf die spezifischen technologischen sowie wirtschaftlichen Ziele ausgerichtet, die sie im Rahmen ihrer Beteiligung am Konsortium anstreben. Zu den produzierenden Partner im Bereich der Schneidtechnologie gehören die Fischer Werkzeugbau GmbH, die CEFEG GmbH sowie die Scherdel Feinschneidtechnik GmbH als assoziierter Partner.

Dabei fertigt die Fischer Werkzeugbau GmbH hochwertige Werkzeuge für Stanz- und Spritzgussverfahren. Dafür steht ein moderner Maschinenpark zu Verfügung, sodass nahezu alle nötigen Bearbeitungs- und Montageschritte im eigenen Haus abgebildet werden können. Stanz- und Folgeverbundwerkzeuge werden unter Serienbedingungen auf einer vollwertigen Produktionspresse von PME getestet. Dem Werkzeugbau Fischer obliegt zudem die Gesamtprojektleitung des Verbundprojektes.

Die CEFEG GmbH fertigt Federn, Verbindungselemente und Stanzteile verschiedener Werkstoffspezifikationen. Dafür steht ihr ein Maschinenpark aus diversen Pressen und Stanz-Biege-Automaten zur Verfügung. Das Leistungsspektrum umfasst die Bereiche Konstruktion, Werkzeugbau, Fertigungstechnik bis hin zur Qualitätssicherung. Neben der Lohnfertigung bietet die CEFEG ihre Werkzeugbaukapazitäten auch nach extern an.

Die zur Scherdel-Gruppe gehörende Scherdel-Feinschneidtechnik GmbH fertigt hochpräzise Feinschneid- und Umformteile. Zur Verarbeitung kommen hochfeste Bleche, Vergütungsstähle und Federbleche. Ein eigener Werkzeugbau realisiert den Bau von Umform-, Schneid-, Feinschneid- und Spezialwerkzeugen.

Als produzierender Partner im Bereich der präzisen Lasermikrobearbeitung ist die KMLT GmbH seit nun mehr als 34 Jahren aktiv. Das Angebotsspektrum umfasst u.a. Lasermikroschneiden, Lasermikrobearbeitung, Laserschweißen, SMD-Schablonen, Laserbeschriftung, Lasergravur.

Im Bereich der Forschung werden am Fraunhofer IWU seit 30 Jahren fundierte Untersuchungen im Bereich der Umformtechnik von Blechwerkstoffen mit Schwerpunkten in den Bereichen Schneid- und Umformprozesse, Methoden der Werkstoff- und Oberflächencharakterisierung sowie neue Fertigungstechnologien durchgeführt. Darüber hinaus werden wissenschaftliche Untersuchungen zur Oberflächenfunktionalisierung, beispielsweise mittels Laserablation, für den Maschinenbau, Werkzeugbau die Medizintechnik und Automotive-Bereich vorgenommen.

Die Rahmenbedingungen zur Durchführung des Projekts waren anfänglich noch etwas durch Preisschwankungen und lange Lieferzeiten für die im Projekt benötigten Werkstoffe, bedingt durch den russischen Angriffskrieg und die dadurch ausgelöste Energiekriese, geprägt. Ohne die Verzögerungen im Projekt wäre der Zeitrahmen, für eine ordnungsgemäße Durchführung der Arbeiten, ausreichend gewesen.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Bei der Beantragung des Vorhabens wurde ein vollumfänglicher Arbeitsplan mit direkt zuweisbaren Arbeitspaketen erstellt. Nachfolgend ist in Tabelle 1 der Gesamtarbeitsplan des Vorhabens sowie in Tabelle 2 die Ableitung der Unterarbeitspakete für das Fraunhofer IWU dargestellt. Leider ist es im Projektverlauf zu zwei wesentlichen Verzögerungen gekommen, die das Projekt maßgeblich beeinflusst haben.

Bei der Durchführung des Projekts kam es durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Partnern zu gegenseitigen Abhängigkeiten, welche durch die Bauteil- oder Werkstoffverfügbarkeit begründet waren.

1. **Verzögerung:** Bei der Bestellung der Rundstempelhalbzeuge durch die Firma Fischer Werkzeugbau GmbH kam es zu einer Verkettung unglücklicher Umstände (hohe Lieferzeit, Werkstoff-Falschlieferung, Reklamation und Neubestellung), wodurch ca. 7 Monate Projektverzögerung resultieren. Problem war, dass die Rundstempelhalbzeuge durch den Normalienhersteller nominal in ASP23 hergestellt und in 07/2023 geliefert wurden. Bei der Durchführung von Vorversuchen am Fraunhofer IWU wurde festgestellt, dass die Stempel ein leichtes Übermaß besitzen und es infolgedessen zu Stempelbrüchen kam. Des Weiteren wurden bei der Ursachenforschung zum Stempelbruch das Material mittels EDX analysiert und festgestellt, dass des sich nicht um das bestellte Material ASP23 handeln konnte. Die Reklamation hat sich bis Mitte November hingezogen. Die Neulieferung der Stempelhalbzeuge erfolgte durch einen

neuen Lieferanten in 12/2023, im Material Vanadis23, welches die gleiche Zusammensetzung und Eigenschaften wie ASP23 aufweist. Erst im Januar 2024 konnte die Strukturierung der Rundstempel durch die KMLT GmbH für die Laborversuche erfolgen.

2. **Verzögerung:** Im Rahmen eines anderen Projekts wurde der Ultrakurzpuls Laser durch einen neuen Femtosekundenlaser in der am Fraunhofer IWU vorhandenen Laseranlage ersetzt. Für die Umbauarbeiten waren zwei Monate (11-12/2023) eingeplant. Aufgrund mehrerer funktionsrelevanten Fehler konnte die Anlage nicht wie geplant im Dezember 2023 in Betrieb genommen werden. Die Fehlersuche und Wiederinbetriebnahme zog sich bis April 2024 hin, da die Abnahme der Anlage seitens IWU bis zur Behebung der Fehler verweigert wurde. Die Umsetzung der für die Praxisversuche notwendigen Formstempel konnte erst im Mai erfolgen.

Durch die beschriebenen Verzögerungen kam es ebenfalls zu einer verzögerten Meilensteinerreichung.

Der Meilenstein 1, symbolisch für den „Abschluss der Strukturauslegung, Abtragscharakterisierung und Strukturherstellung für Versuchsteil A" wurde erreicht.

- Die systematische Strukturauslegung ist abgeschlossen.
- Die fertigungstechnischen Randbedingungen zur Realisierung potentieller Strukturvarianten wurden definiert.
- Geometrisch und technologisch festgelegte Strukturvarianten für Versuchsteil A wurden hergestellt.

Der Meilenstein 2, symbolisch für den „Abschluss der Schneidversuche Teil A - erprobtes Mikrostrukturdesign" erreicht.

- Nach Anfertigung der Schneidstempel wurden die Dauerschneidversuche im mit verschiedenen Schneidstempelgeometrien durchgeführt und ausgewertet.
- Geeignete Mikrostrukturierungsvarianten konnten auf den Stempelmantelflächen identifiziert und Optimierungspotenzial abgeleitet werden.

Der Meilenstein 3, symbolisch für den „Abschluss der Schneidversuche Teil C - erprobte Mikrostrukturen definiert für den Feinschneidprozess" wurde nur teilweise, aufgrund der fehlenden Schneidversuchen im Teil C, erreicht.

- Die Dauerschneidversuche für Teil A bis Teil C wurden komplett durchgeführt und ausgewertet.
    - Teil C wurde teilweise fertiggestellt
- Die unter Teil A gewonnenen Erkenntnisse konnten, auf die in Teil C spezifische Schneidaufgabe übertragen und teilweise validiert werden.
    - Stempelstrukturierung ist erfolgt → Validierung ist teilweise erfolgt
- Die Wirksamkeit von Mikrostrukturierungen auf das tribologische Regime und ein Einfluss auf den Stempelverschleiß wurde nachgewiesen.
    - Versuche und deren Auswertung seitens Scherdel wurden noch nicht vollständig durchgeführt

Tabelle 1: Überblick zum Gesamtarbeitsplan

		Fischer	CEFEG	Scherdel	IWU	KMLT	Jahr 1												Jahr 2											
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1 Anforderungskatalog / Lastenheft																														
AP1.1	Anforderungskatalog an Schneidprozess und Schneidwerkzeuge																													
AP1.2	Anforderungskatalog für den Laserstrukturierungsprozess des Schneidstempels																													
AP1.3	Anforderungskatalog für die Werkzeug- und Bauteilbewertung																													
AP2 Strukturauslegung und Schaffung der Versuchsvoraussetzungen																														
AP2.1	Strukturauslegung für die Mantelflächenstrukturierung von Schneidstempeln																													
AP2.2	Erarbeitung und Anwendung einer Auslegungsmethodik in Abhängigkeit der Stempelgeometrie																													
AP2.3	Charakterisierung des Laserabtrags an ausgewählten Stempelwerkstoffen																													
AP2.4	Bewertungskonzept zum Ergebnisvergleich zwischen Kurzpuls- und Ultrakurzpulslasersystem																													
AP2.5	Detailierung Versuchsmatrix Untersuchungsteil A: Einfluss des Strukturdesigns																													
AP2.6	Detailierung Versuchsmatrix Untersuchungsteil B: Einfluss der Festigkeit des Bandwerkstoffs																													
AP2.7	Detailierung Versuchsmatrix Untersuchungsteil C: Einfluss der Bandwerkstoffdicke																													
AP2.8	Detailierung Versuchsmatrix Untersuchungsteil D: Einfluss Stempelwerkstoff / Randschichteinfluss																													
AP3 Schneidwerkzeug und Strukturierung von Schneidstempeln																														
AP3.1	Konstruktion und Aufbau von Schneidwerkzeugen und -vorrichtungen																													
AP3.2	Konstruktion und Herstellung der Schneidstempel-Halbzeuge																													
AP3.3	Übertragung von Strukturvorgaben auf Stempelgeometrien sowie Ableitung von Maschinenprogrammen																													
AP3.4	Laserstrukturierung von Schneidstempeln unterschiedlicher Stempelgeometrien																													
AP4 Bauteil- und Schneidwerkzeugcharakterisierung																														
AP4.1	Charakterisierung der Stempelmakrogeometrie vor und nach der Versuchsdurchführung																													
AP4.2	Charakterisierung der Stempelmakro- und Stanzgittergeometrie während der Versuchsdurchführung																													
AP4.3	Charakterisierung der applizierten Mikrostrukturierung vor und nach den Schneidversuchen																													
AP5 Schneidversuche mit Rundstempeln (Labormaßstab)																														
AP5.1	Versuchsaufbau für Laborversuche																													
AP5.2	Dauerschneidversuche im Labormaßstab mit Rundstempeln der Versuchsteile A/B/D:																													
AP5.3	Erfassung von Prozessgrößen mittels integrierter Sensorik																													
AP6 Schneidversuche mit Formstempeln (Praxisumfeld)																														
AP6.1	Versuchsaufbau für Versuche im Praxisumfeld																													
AP6.2	Dauerschneidversuche im Praxisumfeld Teil A: Strukturdesign und Stempelgeometrie																													
AP6.3	Dauerschneidversuche im Praxisumfeld Teil C: variierende Banddicke																													
AP6.4	Dauerschneidversuche im Praxisumfeld Teil D: variierender Stempelwerkstoff u.a.																													
AP6.5	Erfassung der Prozessbedingungen mittels integrierter Sensorik																													
AP7 Ganzheitliche Bewertung der Versuchsergebnisse																														
AP7.1	Analyse Schneidversuche "Rundstempel" bei variierenden Prozessbedingungen																													
AP7.2	Analyse Schneidversuche "Rhombusstempel" im Einsatz bei Bandwerkstoffen geringer Festigkeit																													
AP7.3	Analyse Schneidversuche "Rechteckstempel" im Einsatz bei hochfesten Bandwerkstoffen																													
AP7.4	Analyse Schneidversuche "Rund- & Formstempel" im Einsatz bei mittelfesten Bandwerkstoffen und Blechdicken >= 4mm																													
AP7.5	Analyse der mit Kurzpuls- und Ultrakurzpulslaser hergestellten Schneidstempel-Strukturierungen																													
AP7.6	Korrelation von Strukturierungseffekten im Schneidprozess																													
AP7.7	Ableitung von Optimierungspotentialen																													
AP8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung																														
AP8.1	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes strukturierter Rundstempel für das Schneiden von Bandwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeit																													
AP8.2	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes strukturierter Rhombusstempel für das Schneiden von Bandwerkstoffen geringer Festigkeit																													
AP8.3	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes strukturierter Rechteckstempel für das Schneiden von hochfesten Bandwerkstoffen																													
AP8.4	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes strukturierter Rund- & Formstempel für das Schneiden von Bandwerkstoffen mittlerer Festigkeit und																													
AP8.5	Effizienzvergleich eingesetzter Lasersysteme in Abhängigkeit der zu strukturierenden Stempelgeometrien																													
AP9 Projektmanagement / Dokumentation																														
AP9.1	Projektmanagement Verbundpartner 1 und Gesamtprojektleitung (Werkzeugbau Fischer)																													
AP9.2	Projektmanagement Verbundpartner 4 (IWU)																													
AP9.3	Projektmanagement Verbundpartner 2 (KMLT)																													
AP9.4	Projektmanagement Verbundpartner 3 (Cefeg)																													
AP9.5	Projektmanagement verbundpartner 5 (Scherdel)																													
Meilensteine														M1					M2					M3						

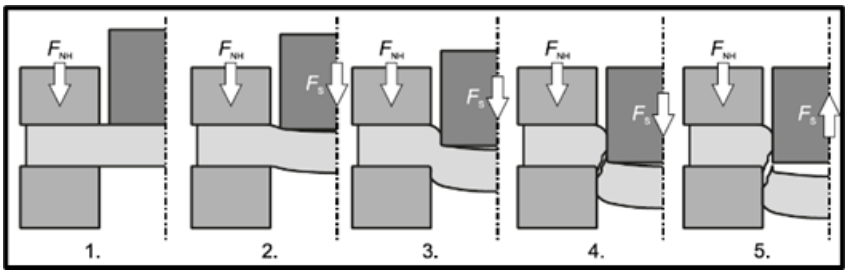
Tabelle 2: Überblick zum Arbeitsplan KMLT GmbH

			WZB Fischer GmbH	CEFEG GmbH	Scherdel GmbH	FhG IWU	KMLT GmbH	Jahr 1												Jahr 2											
								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1	**Anforderungskatalog / Lastenheft**																														
	AP1.2	Anforderungskatalog an Laserstrukturierungsprozess des Schneidstempels mittels Laserablation																													
	AP1.2.1	Anforderungskatalog für die Laserbearbeitung von Rundstempeln auf einem 3 Achs Laserzentrum						0,30	0,30	0,30																					
	AP1.3	Anforderungskatalog an Werkzeug- und Bauteilbewertung																													
	AP1.3.6	Systematik zur Erfassung der Mikrostrukturgeometrie an Rundstempel						0,30	0,30	0,30																					
AP2	**Strukturauslegung und Schaffung der Versuchsvoraussetzungen**																														
	AP2.2	Erarbeitung und Anwendung einer Auslegungsmethodik in Abhängigkeit der Stempelgeometrie																													
	AP2.2.1	Erarbeitung der Auslegungsmethodik zur Strukturierung von Rundstempeln auf 3-Achs Laserzentrum								0,60	0,60	0,60				0,40	0,40			0,40	0,40										
	AP2.3	Charakterisierung des Laserabtrags an ausgewählten Stempelwerkstoffen																													
	AP2.3.1	Charakterisierung des Abtragsverhaltens der Stempelwerkstoffe "S1", "S2" und "S3" mittels Ultrakurzpulslasersystems eines 3-Achs Laserzentrums									0,50	0,50				0,40	0,40			0,40	0,40										
	AP2.3.2	Charakterisierung des Abtragsverhaltens der Stempelwerkstoffe "S1" und "S2" mittels Kurzpulslasersystems eines 3-Achs Laserzentrums																		0,40	0,40										
	AP2.4	Bewertungskonzept zum Ergebnisvergleich zwischen Kurzpuls- und Ultrakurzpulslasersystem																		0,10	0,10										
AP3	**Schneidwerkzeug und Strukturierung von Schneidstemp**																														
	AP3.3	Übertragung von Strukturvorgaben auf Stempelformen sowie Ableitung von Maschinenprogrammen																													
	AP3.3.1	Ableitung der Maschinenprogrammierung für Rundstempel auf einem 3-Achs-Laserbearbeitungszentrum für Labor- und Praxisversuche auf Basis der berechneten Strukturvorgaben										0,50	0,50	0,50				0,50	0,50					0,50	0,40							
	AP3.4	Laserstrukturierung von Schneidstempeln unterschiedlicher Stempelformen																													
	AP3.4.1	Laserstrukturierung der Rundstempel für Labor- und Praxisversuche											1,00	1,00	1,00			1,00	0,80	1,00				1,00	1,00							
AP4	**Bauteil- und Schneidwerkzeugcharakterisierung**																														
	AP4.3	Charakterisierung der applizierten Mikrostrukturierung vor und nach den Schneidversuchen																													
	AP4.3.1	Charakterisierung der Stempeleigenschaften und der Mikrostrukturierung für Rundstempel der Laborversuche vor und nach den Schneidversuchen											0,30	0,30	0,20	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10			
AP7	**Ganzheitliche Bewertung der Versuchsergebnisse**																														
	AP7.5	Analyse Strukturierungen der mit Kurzpuls- und Ultrakurzpulslaser hergestellten Schneidstempeln																													
	AP7.5.2	Bewertung mittels 3-Achs Laserzentrum hergestellten Strukturvarianten																	0,20	0,20	0,10			0,10	0,10				0,10	0,10	0,10	
AP8	**Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**																														
	AP8.5	Effizienzvergleich eingesetzter Lasersysteme in Abhängigkeit der zu strukturierenden Stempelform																													
	AP8.5.1	Bewertung Fertigungsaufwand für die Mikrostuktturierung der Rundstempel																												0,20	0,20	0,10
AP9	**Projektmanagement / Dokumentation**																														
	AP9.3	Projektmanagement VP2 (KMLT)						0,15					0,15							0,15						0,15					0,20	0,20
	Meilensteine Verbund- und Teilvorhaben															M1				M2					M3						
																M1K				M2K					M3K						

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Stand der Technik im Bereich der Mikrostrukturierung von Schneidstempeln umfasst verschiedene Aspekte der Werkzeug- und Prozessoptimierung, um die Effizienz und Lebensdauer der Stempel zu erhöhen. Ein zentrales Kriterium für die Reibwertreduzierung ist die Analyse der Stempelrückzugskraft sowie des Stempelverschleißes während des Schneidprozesses. Die Schnittflächenqualität wird als Funktion der Werkzeugstandzeit bewertet, und die gewonnenen Erkenntnisse werden in Form von Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

Die Fertigung komplexer Bauteilgeometrien erfolgt meist durch eine Kombination von trennenden und umformenden Verfahren, wobei mechanisches Beschneiden oft bevorzugt wird, da es kürzere Zykluszeiten ermöglicht. Bei diesem Verfahren kommen spezifische Werkzeugkomponenten wie Stempel und Matrize zum Einsatz, die den Schneidvorgang durch ihre Geometrie und Kinematik beeinflussen. Der Prozess selbst gliedert sich in mehrere Phasen, die von der Fixierung des Bleches bis zur Trennung des Materials reichen (Abbildung 2).



1. Fixieren des Blechs
2. Aufsetzen des Stempels – elastische Blechverformung
3. plastischen Blechdeformation
4. Überschreiten der werkstoff-spezifischen Schubfließgrenze
5. Durchtrennen des Bleches

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Schneidvorgangs [nach Hof 2012][1]

Die Belastungen, denen die Schneidstempel ausgesetzt sind, variieren abhängig von den Prozessparametern und den verwendeten Werkstoffen. Hohe Schneidstempelbelastungen führen häufig zu Verschleiß, der verschiedene Mechanismen wie Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung umfasst (Abbildung 3). Der Verschleiß wirkt sich direkt auf die Schnittflächenqualität aus und kann bei Überschreitung kritischer Schwellenwerte zu unzureichenden Ergebnissen führen.

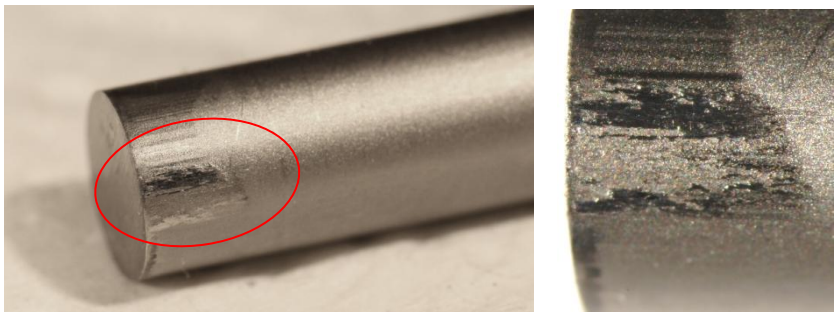


Abbildung 3: Adhäsiver Verschleiß an einem Schneidstempel

Innovative Ansätze zur Reduktion des Verschleißes beinhalten die Verwendung spezifischer Stempelgeometrien, Stempelwerkstoffe und -beschichtungen. In jüngerer Zeit wird auch die Mikrostrukturierung der Mantelflächen von Schneidstempeln untersucht, um tribologische Eigenschaften zu verbessern. Dabei zeigen erste Untersuchungen vielversprechende Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf konvex strukturierte Oberflächen, die die Schmiermittelhaltung optimieren können.

Die fortschrittlichsten Technologien zur Mikrostrukturierung umfassen den Einsatz von gepulsten Lasern, wobei zwischen Kurzpulslasern und Ultrakurzpulslasern unterschieden wird. Letztere bieten Vorteile hinsichtlich der thermischen Beeinflussung und sind zunehmend relevant für die Herstellung der gewünschten Mikrostrukturen, ohne die Materialeigenschaften negativ zu beeinflussen.

Insgesamt zeigt der aktuelle Stand der Technik, dass durch gezielte Optimierungen der Werkzeuggeometrie, Werkzeugmaterialien und -bearbeitungsverfahren signifikante Fortschritte in der Effizienz und Lebensdauer von Schneidstempeln erzielt werden können.

[1] [Hof2012] Hofmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G.: Handbuch Umformen. Carl Hanser Verlag: München, 2012.

1.5. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit mit Dritten

Innerhalb des Konsortiums arbeiten die Projektpartner eng verzahnt an der Realisierung der Arbeitsaufgabe und der Erreichung der Projektziele. Die von den Partnern übernommenen Aufgaben, entsprechen ihren in der Vergangenheit erworbenen Kompetenzen und sind auf die spezifischen technologischen und wirtschaftlichen Ziele ausgerichtet, die sie mit ihrer Beteiligung am Konsortium erreichen wollen. Die produzierenden Partner repräsentieren verschiedene Anwendungsbereiche von Schneidtechnologien. Dies demonstriert, dass die Thematik der tribologischen Optimierung von Stanzprozessen und die Erhöhung der Standmengen der verwendeten Aktivteile eine Thematik mit großer technologischer Breite sowie die Notwendigkeit darstellt, um den Industriestandort Mitteldeutschlands und Deutschland zukunftsfähig zu halten.

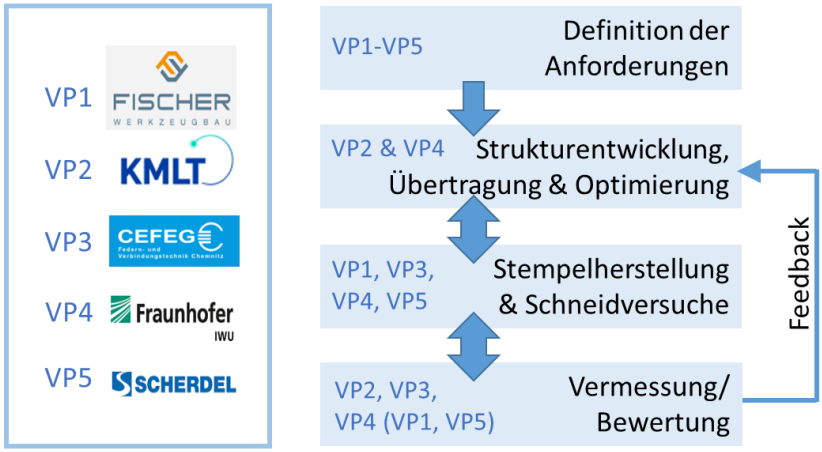


Abbildung 4: Zusammenarbeit im Verbundvorhaben (VP: Verbundpartner)

Gemäß der eigenen Produktionsausrichtung ist der Werkzeugbau Fischer für die Handlungsfelder Werkzeug- und Stempelanfertigung sowie in allen Aspekten für ihren Anteil an der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Schneidversuche im Rahmen der Praxisvalidierung zuständig. Dem Werkzeugbau Fischer obliegt zudem die Gesamtprojektleitung des Verbundprojektes.

Im Projekt ist KMLT für die Mikrostrukturierung der Schneidstempel zuständig. Dies umfasst alle Schritte von der Ermittlung der Abtragsparameter, über die Applikation auf den Schneidstempeln bis hin zur wiederholgenauen Anfertigung der mikrostrukturierten Schneidstempel für die experimentellen Untersuchungen. Gemäß dem Portfolio fällt zudem die Charakterisierung der Mikrostrukturen zu verschiedenen Zeitpunkten in den Aufgabenbereich von KMLT.

Gemäß der eigenen Produktionsausrichtung ist die CEFEG für die Handlungsfelder Werkzeug- und Stempelanfertigung für die Bearbeitung von Federwerkstoffen sowie in allen Aspekten für ihren Anteil an der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Schneidversuche im Rahmen der Praxisvalidierung zuständig. Für das Konsortium übernimmt die CEFEG Teile der Charakterisierung der Schneidstempel mit optischen Methoden.

Dem IWU obliegt die Absicherung der wissenschaftlichen Arbeitsweise. Von den technischen Arbeitsinhalten führt das IWU die fertigungsgerechte Auslegung der Mikrostrukturierung, die Schneidversuche im Labormaßstab, die Charakterisierung der Schneidstempel sowie die Versuchsauswertung durch.

Als assoziierter, nicht geförderter Partner führt die Scherdel Feinschneidtechnik GmbH eine Übertragung der Erkenntnisse aus dem Projekt auf die spezifischen technologischen Bedingungen im Bereich des Feinschneidens durch.

Die Zusammenarbeit der Konsortialpartner, deren Arbeitsteilung und Verantwortlichkeiten im Verbund, sind im Arbeitsplan detailliert dargestellt. Es sind keine Unteraufträge an Dritte geplant.

Eine Kooperationsvereinbarung wurde zwischen den Projektpartnern vorabgestimmt und mit Projektbeginn rechtskräftig abgeschlossen.

2. Ausführliche Darstellung

2.1. AP1: Anforderungskatalog / Lastenheft

UP 1.2 Anforderungskatalog an Laserstrukturierungsprozess des Schneidstempels mittels Laserablation

UP AP 1.2.1 Anforderungskatalog für die Laserbearbeitung von Rundstempeln auf einem 3-Achs-Laserzentrum

Im Rahmen der Prozessentwicklung zur Laserstrukturierung der Mantelflächen von Schneidstempeln wurde ein detaillierter Anforderungskatalog erstellt. Darin sind sämtliche prozessrelevanten Parameter spezifiziert. Die Abstimmung des Lasersystems umfasste die Auswahl geeigneter Laserquellen, die Festlegung der Wellenlänge, Pulsenergie und Repetitionsrate sowie die Definition der Fertigungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Vorschub der Drehachse. Zusätzlich wurden der Laserspotdurchmesser und die zu erzielenden Strukturdimensionen sowie die Zielwerte für die Oberflächenrauheit spezifiziert. Parallel dazu erfolgte die Festlegung standardisierter Datenaustauschformate zur Prozessintegration sowie die Definition von Qualitätskriterien zur prozesssicheren und reproduzierbaren Strukturierung. Dabei wurde das STL-Format als Datenaustauschformat gewählt, bei dem die Mikrogeometrie der Stempelmantelfläche durch eine Sammlung von Dreiecken beschrieben wird. Für die Festlegung der Qualitätskriterien werden die Ergebnisse der in AP2.3.3 untersuchten Abtragscharakterisierung mit einbezogen. Dabei gilt für die Oberflächentopografie so glatt wie möglich, ohne Aufwürfe und sichtbare Randschichtbeeinflussung.

1.3 Anforderungskatalog an Werkzeug- und Bauteilbewertung

1.3.6 Systematik zur Erfassung der Mikrostrukturgeometrie an Rundstempel

Der Anforderungskatalog an die Werkzeug- und Bauteilbewertung orientiert sich an der im Antrag beschriebenen Vermessungsstrategie. Bei dieser wird zwischen der Vermessung von Mikro- und Makrostruktur unterschieden. Die Makrostruktur für alle Stempelformen wird optisch auf einem Keyence VR6000 bei der CEFEG GmbH vermessen. Die optische Vermessung der Mikrostrukturen auf den Rundstempeln, welche durch die KMLT GmbH strukturiert wurden, erfolgte wie geplant mit einem Keyence Messmikroskop VHX-6000 der KMLT GmbH. Die Vermessungen der Mikrostrukturen auf den Formstempeln erfolgen am Fraunhofer IWU.

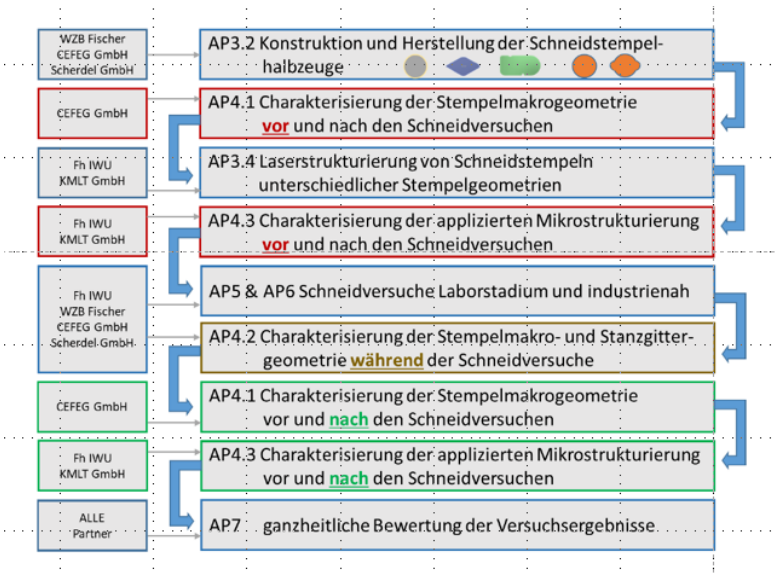


Abbildung 5: Ablauf der Projektschritte und Zuordnung zu den Verbundpartnern

Die mit den beteiligten Partnern einheitlichen Vermessungsintervalle für die Stempel für die Vermessung der Makro- und Mikrogeometrie sowie der Schneidkanten erfolgte nachfolgenden festgelegten Hubzahlen: 0, 50.000, 100.000 Hub. Um bei der Vermessung der Stempelmakrogeometrie exakt reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden vorab an definierten, strukturabhängigen Messebenen am Durchmesser der jeweiligen Schneidstempel (siehe nachfolgend Abbildung 6) Messpunkte definiert.

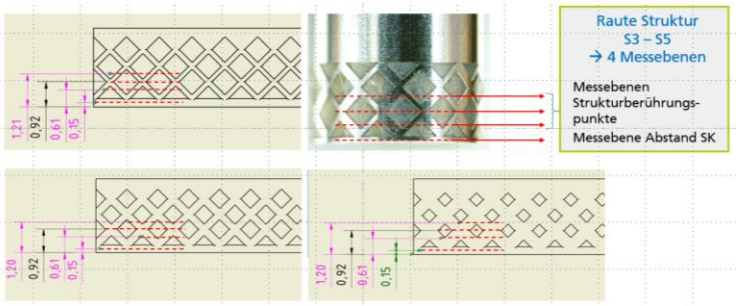


Abbildung 6: Festlegung Vermessungspositionen an Rundstempeln

Die Erfassung der Messpunkte an der der Mikrogeometrie erfolgte an festgelegten, charakteristischen Verschleißpunkten über die Versuchsdauer mit Hilfe definierter Lasermarkierungen. Für die Rundstempel wurden drei Lasermarkierung a 120° als Messposition angebracht. KMLT übernahm dabei die Herstellung und Auswertung der mikrostrukturierten Rundstempel.

2.2. AP 2: Strukturauslegung und Schaffung der Versuchsvoraussetzungen

UP 2.2 Erarbeitung und Anwendung einer Auslegungsmethodik in Abhängigkeit der Stempelgeometrie

UP 2.2.1 Erarbeitung der Auslegungsmethodik zur Strukturierung von Rundstempeln auf 3-Achs Laserzentrum

Die Festlegung und Auslegung der Strukturen erfolgte in Abstimmung mit den beteiligten Partnern auf Grundlage der zu schneidenden Blechdicke (0,8 mm) und der Eintauchtiefe des Stempels durch den Blechwerkstoff. Dabei wurde der zu strukturierende Bereich so definiert, dass dieser mit einem Abstand von 0,3 mm von der Schneidtempelunterkante festgelegt wurde:

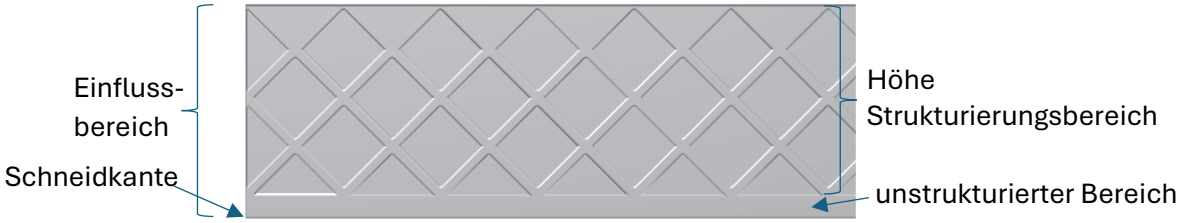


Abbildung 7: Festgelegter Strukturabstand Rundstempel

Die jeweilige Struktur wurde dabei je nach Ausführung in einem Bereich zwischen 1,8 mm und 2,9 mm erzeugt und komplett über den gesamten Umfang als geschlossene Fläche hergestellt. Je nach Art der Struktur wurde unterschiedlich viel der ursprünglichen Mantelflächen abgetragen. Am Beispiel der Rauten Struktur waren das 20%, 40% und 60%. Dabei änderte sich hierbei auch bei Abnutzung der Flächenfaktor nicht. Im Fall der Kugelstruktur wurden etwa 84% der Oberfläche reduziert. Es wurden zwei unterschiedliche, 2 und 4-reihige Strukturen erzeugt. Bei steigendem Verschleiß sank in diesen Fällen die Oberflächenreduzierung bei den kleineren Kugelkappen D1 (4-reihig) stärker als bei den Kugelkappen D3 (2-reihig). Die Abstände zwischen den Strukturen, Stegbreiten und Strukturdimensionen wurden am Fraunhofer IWU über ein dort selbst erstelltes Exceltool berechnet und mit dem in Excel integrierten Solver optimiert.

2.3 Charakterisierung des Laserabtrags an ausgewählten Stempelwerkstoffen

2.3.1 Charakterisierung des Abtragsverhaltens der Stempelwerkstoffe "S1", "S2" und "S3" mittels Ultrakurzpulslasersystems eines 3-Achs Laserzentrums

In AP1.1.1 wurde die Festlegung zu den im Projekt verwendeten Stempelwerkstoffen getroffen. Die Zuordnung der Stempelwerkstoffe zu den im Antrag genutzten Benennungen ist nachfolgend aufgeschlüsselt:

- **S1** – pulvermetallurgischer Schnellarbeitsstahl SPM23 / Vanadis 23 (STM-Stahl/Uddeholm)
- **S2** - pulvermetallurgischer Schnellarbeitsstahl S790 (Böhler)
- **S3** – Schnellarbeitsstahl CPM REX (Zapp Precision Metals GmbH)

Auf Grund von Verzögerungen beim Bau der neuen Produktionshalle verzögert sich auch die Lieferung und Inbetriebnahme des neuen UKP-Laserzentrums. Zusätzlich wurde am Fraunhofer IWU die 5-Achs Laseranlage auf ein Femtosekunden Lasersystem umgebaut. Die dabei substituierten UKP- und KP-Laserquellen wurden in eine 3-Achs Laboranlage am Fraunhofer IWU überführt. Bei der UKP-Lasersystem in der 3 Achslaboranlage handelt es sich um eine Pico-Laserquelle, welche auch für das neu Laserzentrum bei der KMLT GmbH geplant ist. Da die Bauverzögerungen die Projektlaufzeit negativ tangieren, wurde mit dem Fraunhofer IWU vereinbart die Versuche auf deren Laboranlage durchzuführen.

Die Charakterisierung des Stempelwerkstoffs S1, welcher dem SPM23 / Vanadis 23 entspricht, wurde an den Rundstempelhalbzeugen durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die variierten Parametersettings und die daraus resultierende Abtragsrate dargestellt. Als Kriterium für den optimalen Parametersatz gelten eine hohe Abtragsrate in Kombination mit geringen Rauheitswerten. Aus den in Tabelle 4 dargestellten Rauheitswerten wurde in Kombination mit den Werten der Abtragsrate Parametersatz 3 als optimaler identifiziert.

Tabelle 3: Parametersetting für die Strukturierung von Rundstempeln mittels UKP-Lasersystem

SPM23_UKP Laser											
	Laserdaten										
	Leistung [%]	Burst	Frequenz [kHz]	Vorschub [mm/s]	Linienabstand [µm]	Wiederholungen	Zeit [min]	Fläche [mm²]	Volumen [mm³]	[mm³/min]	Abtragsrate [µm/Ebene]
1	48	2	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,268	0,036	0,215
2	65	2	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,435	0,058	0,348
3	80	2	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,570	0,076	0,456
4	95	2	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,723	0,096	0,579
5	48	1	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,325	0,043	0,260
6	65	1	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,409	0,054	0,327
7	80	1	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,493	0,066	0,394
8	95	1	434,12	1302,36	3	50	7,5	25	0,574	0,077	0,459
initial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 4: Rauheitswerte für die Parametersettings für Werkstoff Vanadis23 (SPM23) auf UKP-Lasersystem

SPM23_UKP Laser									
	Rauheit [µm]						Stufenhöhe [µm]		
	X-Richtung		Y-Richtung		Mittelwert		3D Auswertung	Profil Auswertung	Mittelwert
	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra			
1	1,4410	0,2081	1,6180	0,2333	1,5295	0,2207	10,740	10,720	10,730
2	1,4330	0,1892	1,5420	0,2178	1,4875	0,2035	17,390	17,370	17,380
3	2,1460	0,2790	2,2520	0,2840	2,1990	0,2815	22,780	22,820	22,800
4	3,8090	0,4996	4,0220	0,5598	3,9155	0,5297	28,930	28,920	28,925
5	5,3800	0,6811	5,4690	0,6552	5,4245	0,6682	13,020	13,000	13,010
6	13,3900	1,6520	13,6800	1,6110	13,5350	1,6315	16,340	16,350	16,345
7	18,7700	2,3870	19,7900	2,4940	19,2800	2,4405	19,660	19,770	19,715
8	26,5900	3,6060	26,4600	3,4770	26,5250	3,5415	22,900	23,000	22,950
initial	2,2050	0,2795	2,2210	0,3111	2,2130	0,2953	-	-	-

Der **Schneidstempelwerkstoff S2** (pulvermetallurgischer Schnellarbeitsstahl S790 von Böhler) wird für die Untersuchungen im Teil C beim Feinschneiden von 4 mm starken Blechen aus 1.4462 bei der Scherdel GmbH verwendet. Bei der Analyse der Zusammensetzung der Schneidstempelwerkstoffe SPM 23 / Vanadis 23 und S790 fiel auf, dass diese bis auf die Elemente Si und Mn fast deckungsgleich ist. Die Zusammensetzung der Werkstoffe ich in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich der Zusammensetzung der pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffe Vanadis 23 und S790

Hersteller	Elemente / Werkstoff	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Uddeholm	Vanadis 23 SuperClean	1,28	-	-	4,2	5	3,1	6,4
Böhler	S790 microclean	1,29	0,6	0,3	4,2	5	3	6,3

[Quellen: https://www.uddeholm.com/germany/de/products/uddeholm-vanadis-23-superclean-fuer-kaltarbeit/
https://www.wujii.com.tw/attach/s790asp23__a_1__53.pdf]

Vor diesem Hintergrund und durch die Erkenntnisse am Fraunhofer IWU kann der Schneidstempelwerkstoff S790 mit dem gleichen Parametersatz, wie der Schneidstempelwerkstoff S1 Vanadis 23 (SPM23), effizient strukturiert werden.

Im Arbeitspaket 5.2.4 sind in der Versuchsreihe D7 Standzeitversuche an strukturierten Rundstempeln mit dem **Schneidstempelwerkstoff S3** (Schnellarbeitsstahl CPM REX 73) am Fraunhofer IWU geplant. Für die Strukturierung der Stempel wurde der Werkstoff an Rundstempelhalbzeugen, wie in Abbildung 8 dargestellt, charakterisiert.

Abbildung 8: Parametertestfelder auf Rundstempel aus CPM Rex 73

Auch für die Charakterisierung der optimalen Abtragsparameter im CPM Rex 73 wurde die gleiche Vorgehensweise, wie bei den vorangegangenen Stempelwerkstoffen, angewandt. Aus der Parametervariation in Tabelle 6 und der daraus resultierenden Rauheits- und Abtragswerte in Tabelle 7 kann der Parametersatz #33 CL+PF als optimal identifiziert werden.

Tabelle 6: Parametersetting für die Strukturierung von Rundstempeln aus CPM REX73

CPM RcX 73							
		Laserdaten					
		Burst	Frequenz [kHz]	Vorschub [mm/s]	Linienabstand [µm]	Pulsdauer [ps]	Kurzpulsenergie [µJ]
#22	n=20	8	330	2500	10	10	3,8
	CL	1	200	2500	10	10	10
	CL+PF	1	50000	3200	10	0,35	0,3
#27	n=20	8	165	2500	12	10	3,8
	CL	1	200	2500	10	10	10
	CL+PF	1	50000	3200	10	0,35	0,3
#33	n=20	8	600	2400	4	0,35	3,8
	CL	1	200	2500	10	10	10
	CL+PF	1	50000	3200	10	0,35	0,3

Legende

n – Anzahl der Überfahrten (Layer)
CL – Cleaning mit 2 Überfahrten
PF – PulsForging mit 2 Überfahrten

Tabelle 7: Rauheits- und Abtragswerte die Strukturierung von Rundstempeln aus CPM REX73

CPM RcX 73												
		Rauheit [µm]						Stufenhöhe [µm]				
		X-Richtung		Y-Richtung		Mittelwert		3D Auswertung	Profil Auswertung	Mittelwert	[mm³/min]	Abtragsrate [µm/Ebene]
		Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra					
#22	n=20	2,4910	0,3034	2,6520	0,2956	2,5715	0,2995	11,310	11,300	11,305	0,544	0,565
	CL	1,7360	0,2178	1,7610	0,2387	1,7485	0,2283	11,840	11,850	11,845	0,440	0,592
	CL+PF	2,8800	0,4475	3,0420	0,4337	2,9610	0,4406	11,880	11,880	11,880	0,356	0,594
#27	n=20	4,1150	0,3066	5,1420	0,5951	4,6285	0,4509	4,856	4,844	4,850	0,264	0,243
	CL	1,8900	0,2146	4,1010	0,5919	2,9955	0,4033	5,223	5,236	5,230	0,213	0,261
	CL+PF	3,1900	0,5116	4,4200	0,6872	3,8050	0,5994	5,387	5,391	5,389	0,174	0,269
#33	n=20	3,6160	0,5162	3,8210	0,5291	3,7185	0,5227	107,200	107,100	107,150	2,406	5,358
	CL	4,1010	0,5481	4,0810	0,5644	4,0910	0,5563	108,600	108,500	108,550	2,142	5,428
	CL+PF	2,6580	0,3677	2,4200	0,3692	2,5390	0,3685	106,600	106,500	106,550	1,867	5,328

2.3.2 Charakterisierung des Abtragsverhaltens der Stempelwerkstoffe "S1" und "S2" mittels Kurzpulslasersystems eines 3-Achs Laserzentrums

Für diese Versuchsreihen wurde das vorhandene SPI-Faserlasersystem (SP-020P-A-EP-Z-B-Y) ausgewählt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Technische Daten für SPI-Faserlasersystem (SP-020P-A-EP-Z-B-Y)

Durchschnittsleistung:	20 Watt	Strahlqualität M²:	1,4
Max. Pulsenergie:	1 mJ	Divergenz:	11,4 mrad
Pulsstabilität:	0,63%	Wellenlänge:	1061 nm
Max. Pulsspitzenleistung:	16,15 kW	Bandbreite:	5,7 nm
Pulsdauer:	31ns	Brennweite Objektiv:	160 mm

Für die ersten Materialtests und um sich mit dem Stempelmaterial vertraut zu machen, wurden Teststrukturen in diverse, uns durch die CEFEG GmbH zur Verfügung gestellten Reststücke (Abbildung 9) desselben Materials wie der späteren Rundstempel gelasert.

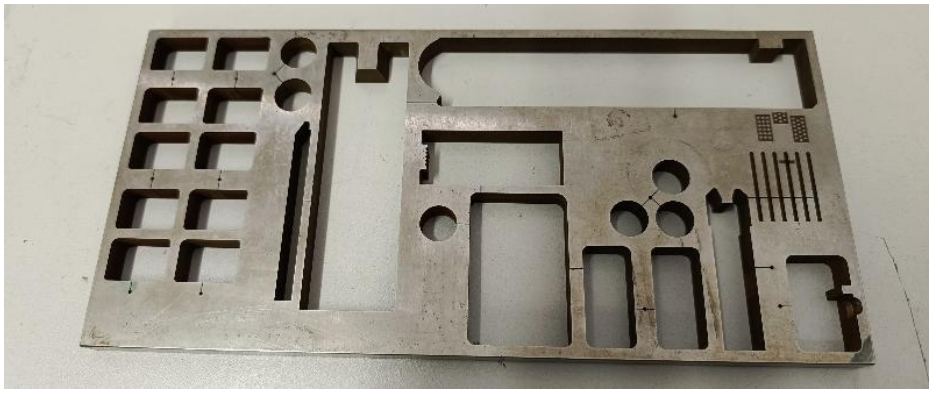


Abbildung 9: Teststück mit Versuchen zur grundsätzlichen Bearbeitung des Werkstoffs mit dem Laser

Nach den erfolgversprechenden Vorversuchen wurden die als Orientierungsgrößen ermittelten Ausgangsparameter für die ersten Vorversuche an Rundstempeln verwendet. Es wurde dazu, zur Charakterisierung des Werkstoffs ASP23, eine Parameterdatenbank aufgebaut, um die ersten Stempel für eine Vorversuchsreihe herzustellen, siehe hierzu auch AP 5.2.

Als variable Parameter zur Charakterisierung flossen dabei Laserleistung, Pulsfrequenz, Pulsdauer, Vorschub, Linienabstand und Wiederholungen ein. Die Auswahl der optimalen Bearbeitungsparameter erfolgte mit dem Ziel, eine hohe Abtragrate bei geringstmöglicher Oberflächenrauheit zu erzielen. In Abbildung 10 sind die Parametervariationen sowie resultierenden Abtragsergebnisse aufgelistet.

Pos.	Leistung / %	Pulsdauer / ns	Frequenz / kHz	Vorschub / mm/s	Linienabstand / mm	Wiederholungen	Zeit / s	Tiefe / µl	Fläche / mm²	Volumen / mm³	Abtrag pro Schicht / µm	Abtragszeit für 1mm³ / s
1	80	3	715	1000	0,01	50	25	15	4	0,06	***0,3***	***417***
2	80	3	715	1000	0,01	100	51	27	4	0,108	***0,27***	***472***
3	80	5	500	1000	0,01	100	51	45	4	0,18	***0,45***	***283***
4	80	10	290	1000	0,01	100	51	59	4	0,236	***0,59***	***216***
5	60	3	715	1000	0,005	100	101	12	4	0,048	***0,12***	***2.104***
6	60	5	500	1000	0,005	100	101	22	4	0,088	***0,22***	***1.148***
7	60	10	290	1000	0,005	100	101	56	4	0,224	***0,56***	***451***
8	40	3	715	500	0,005	50	90	8	4	0,032	***0,16***	***2.813***
9	40	5	500	500	0,005	50	90	5	4	0,02	***0,1***	***4.500***
10	40	10	290	500	0,005	50	90	5	4	0,02	***0,1***	***4.500***
11	40	3	715	200	0,002	30	316	30	4	0,12	***1***	***2.633***
12	40	5	500	200	0,002	20	210	25	4	0,1	***1,25***	***2.100***
13	40	10	290	200	0,002	20	210	30	4	0,12	***1,5***	***1.750***
14	60	3	715	500	0,005	50	90	20	4	0,08	***0,4***	***1.125***
15	60	5	500	500	0,005	50	90	25	4	0,1	***0,5***	***900***
16	60	10	290	500	0,005	50	90	47	4	0,188	***0,94***	***479***
17	40	20	150	500	0,005	50	90	37	4	0,148	***0,74***	***608***
18	40	40	70	500	0,005	50	90	89	4	0,356	***1,78***	***253***
19	80	3	715	1000	0,005	50	51	23	4	0,092	***0,46***	***554***
20	80	5	500	1000	0,005	50	51	40	4	0,16	***0,8***	***319***
21	80	10	290	1000	0,005	50	51	47	4	0,188	***0,94***	***271***

Abbildung 10: Parametervariationen mit den ermittelten Abtragergebnissen

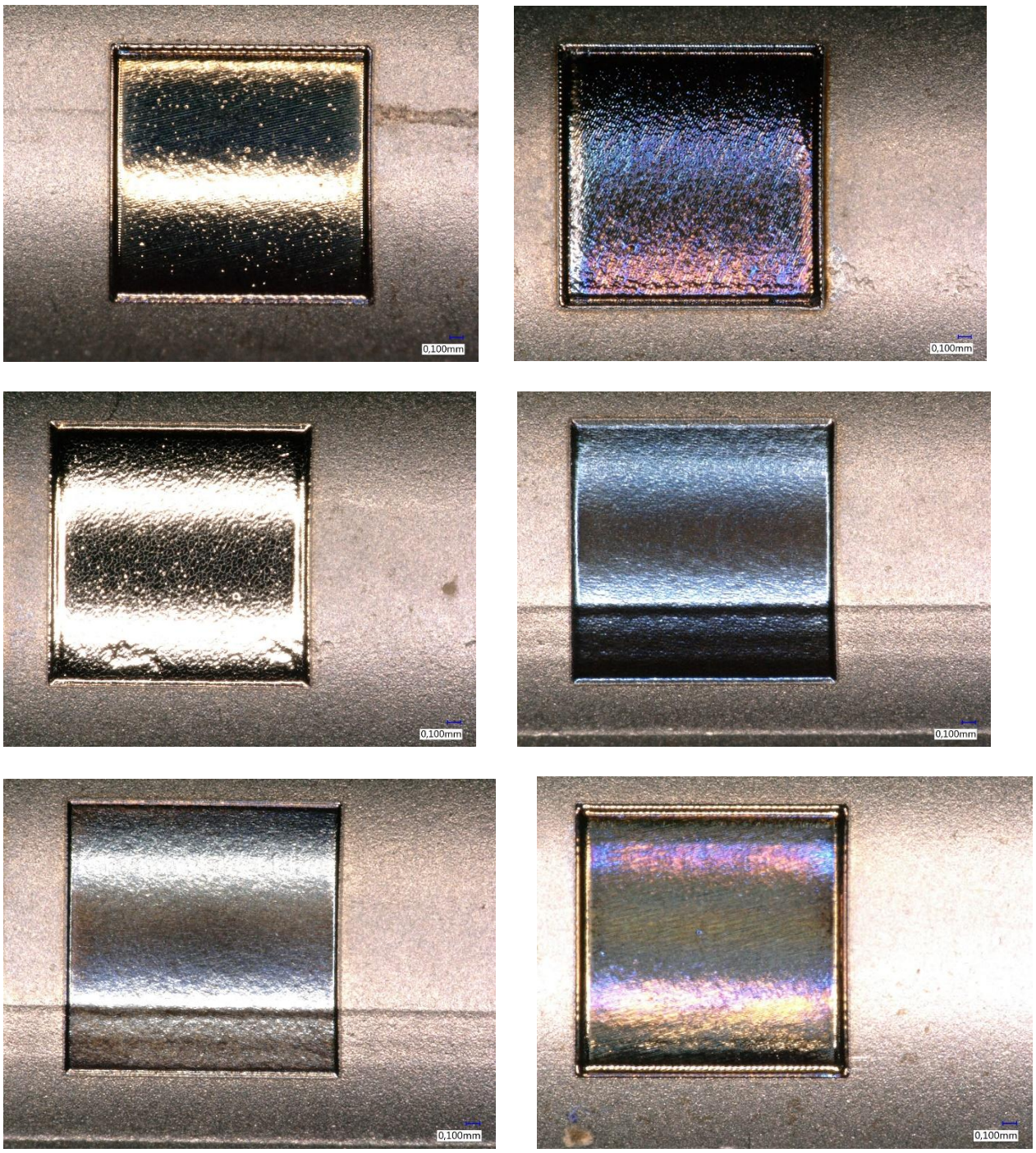


Abbildung 11: Verschiedene Beispiele für Testgravuren auf Ausschuss-Rundstempeln mit unterschiedlichen Parametern

In Abbildung 11 wurde ausgewählte Parametertestfelder dargestellt, bei denen optisch Varianzen in der Oberflächentopografie erkennbar sind. Nachfolgend wird in Abbildung 12 auf die Bewertung der Abtragscharakterisierung, mittels Stufenmessung, eingegangen. Das Ergebnis der ersten Strukturierungsvorversuche ist in Abbildung 13 dargestellt.

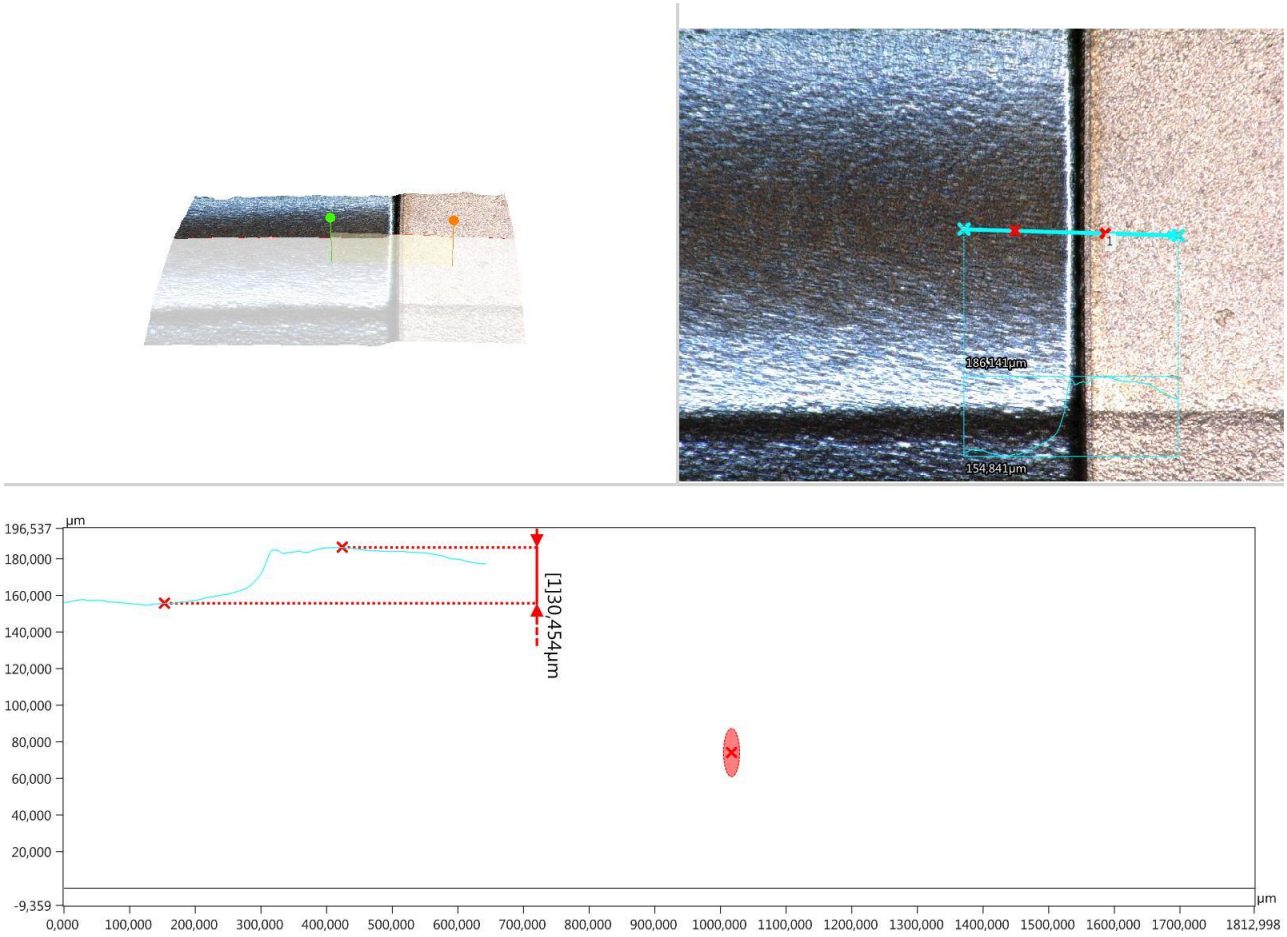


Abbildung 12: Beispiel zur Bewertung der Abtragtiefe einer Testgravur

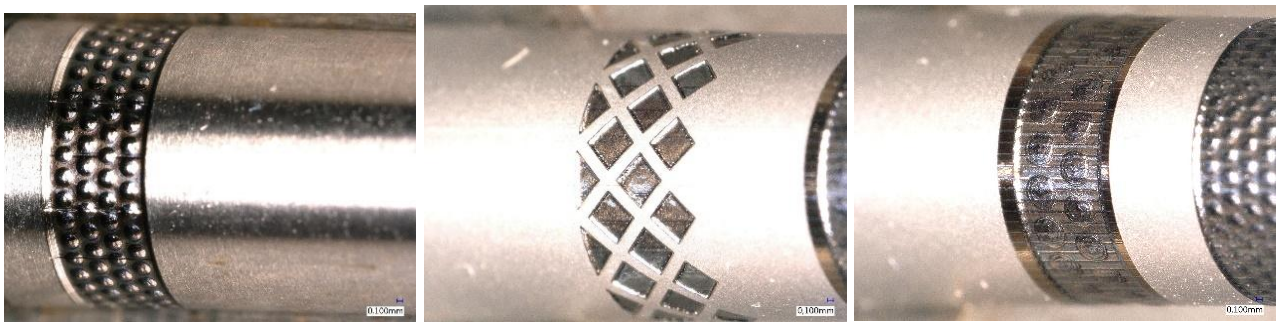


Abbildung 13: Strukturierungsvorversuche an Ausschuss-Rundstempeln mit den ermittelten Abtragparametern

Durch Auswertung der Abtragsrate und Durchführung einer optischen Bewertung der Gravurergebnisse wurden folgende Parameter für die Durchführung der Gravuren ausgewählt:

- Laserleistung: 40% (8 Watt)
- Pulsdauer: 3 ns
- Pulswiederfrequenz: 715 kHz
- Markiergeschwindigkeit: 200 mm/s
- Linienabstand: 0,002 mm
- Abtrag pro Schicht: ca. 1,0 µm

Die Abtragstests wurden für die Werkstoffe S790 und CPM Rex 73 wiederholt. Auch diese Ergebnisse wurden optisch bewertet, sowie in der Tiefe vermessen. Bei beiden Werkstoffen konnten die ermittelten Ergebnisse bestätigt werden. Die Ergebnisse der Vermessung sind nachfolgend in Abbildung 14 und in Abbildung 15 dargestellt.

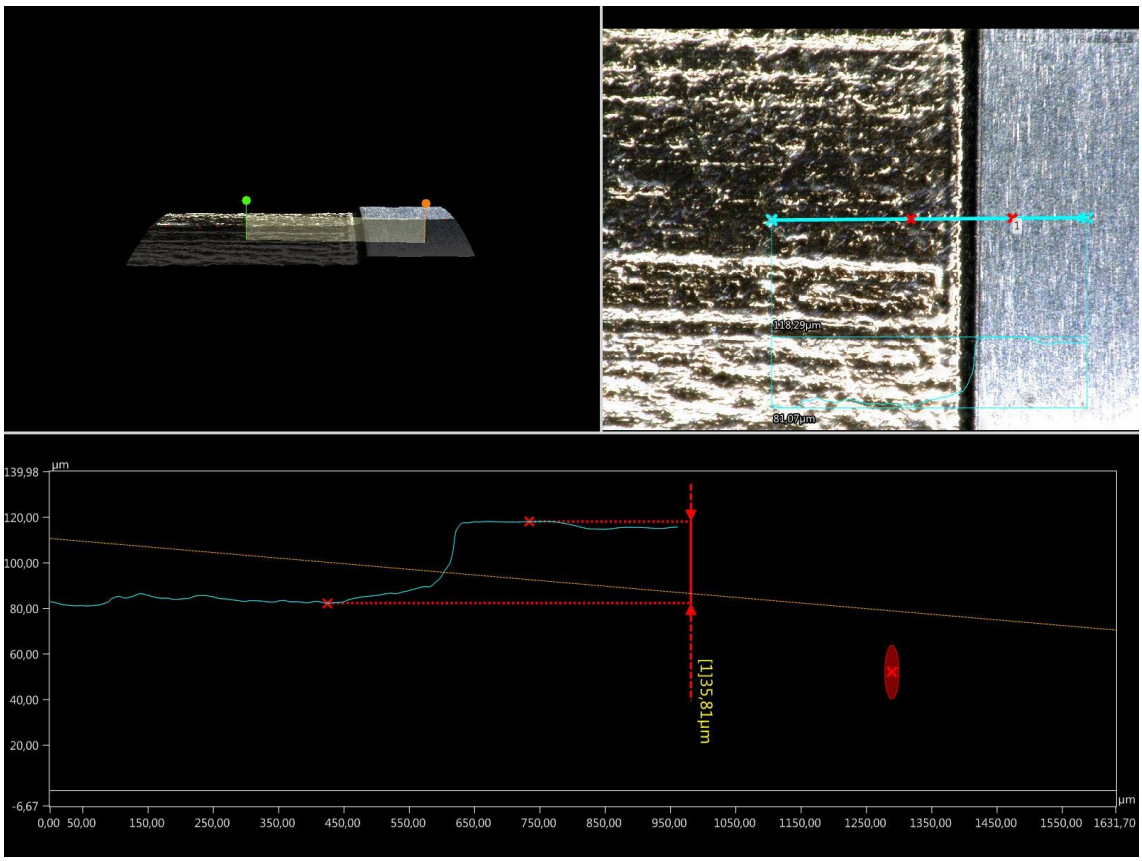


Abbildung 14: Vermessung der Gravur des Werkstoffs S790

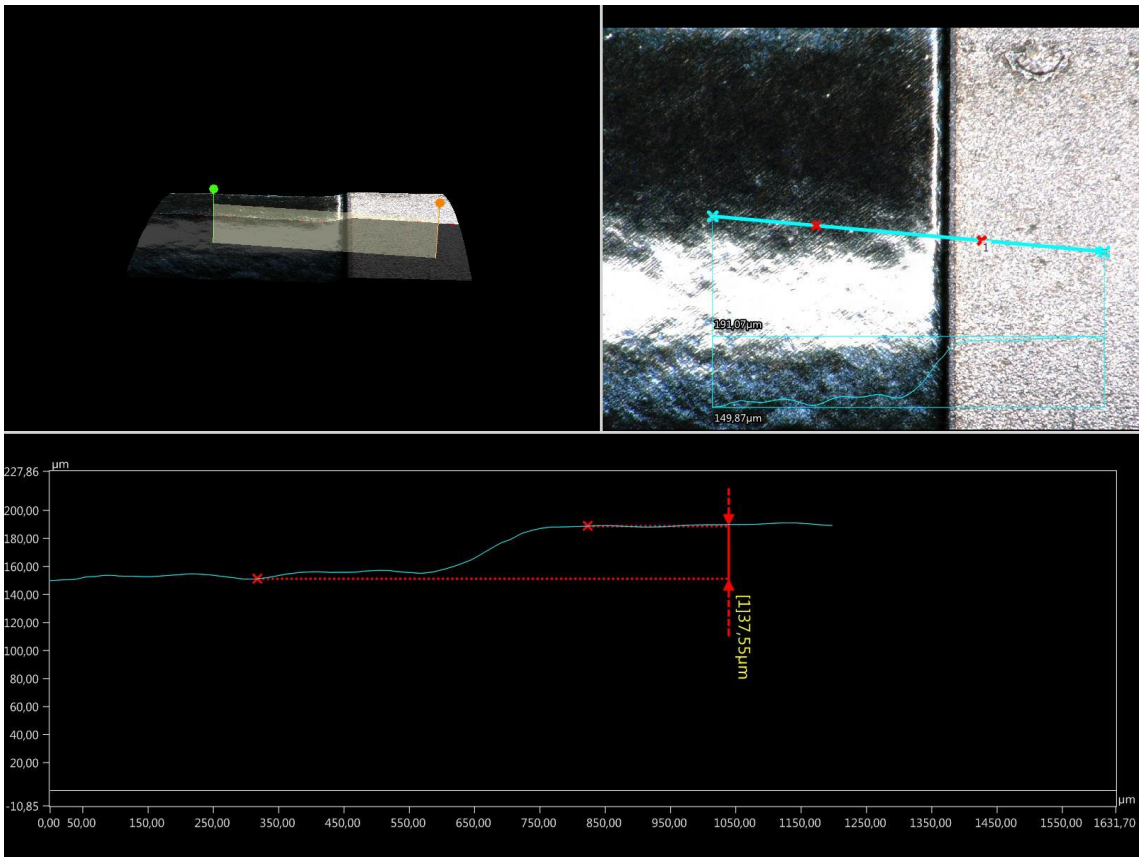


Abbildung 15: Vermessung der Gravur des Werkstoffs CPM Rex 73

Versuchsaufbau:

Der Aufbau wurde an einer Laseranlage der (ACSYS Lasertechnik GmbH) realisiert (Modell Barracuda). Für die Lasergravur wurden die Stempel dazu in einer motorischen Drehachse im Dreibackenfutter fest fixiert aufgenommen (Abbildung 16).

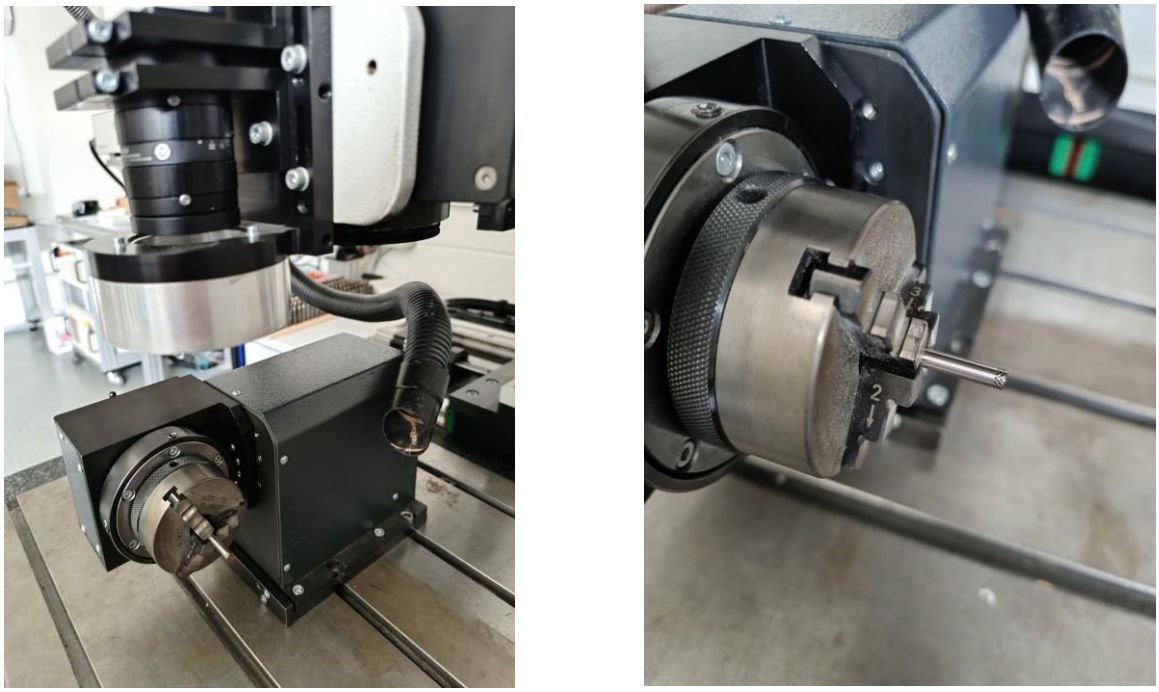


Abbildung 16: Versuchsaufbau für die Stempelgravuren

Die Abarbeitung erfolgte dabei schrittweise, d.h., es wurde immer nur eine bestimmte, vordefinierte Teilfläche graviert, ohne zusätzliche radiale Bewegung des Stempels, also ohne Drehbewegung des Drehapparates. Nach Fertigstellung des Segments erfolgte eine automatische Drehbewegung der motorischen Drehachse um eine vordefinierte Gradzahl. Die im Laserprogramm festgelegte Struktur wurde anschließend fortgesetzt, so, dass eine nahtlose Gravurgeometrie entstanden ist.

2.4 Bewertungskonzept zum Ergebnisvergleich zwischen Kurzpuls- und Ultrakurzpulslasersystem

Aufgrund von externen Faktoren (nationalen und internationalen Umstände), kann es letztendlich bei KMLT GmbH zu einer Verzögerung der Gesamtinvestition (Bau einer neuen Lagerhalle zur Freisetzung von Fertigungsflächen für neue Maschinen, für Laseranlagen und den UKP-Laser) am Standort Neukirch von etwa 2 Jahren. Dadurch bedingt wurden die Versuche für Strukturierung der Rundstempel unter Mitwirkung von KMLT an der UKP-Laborlaseranlage in Chemnitz mit einem Pico-Sekunden-Lasersystem durchgeführt.

Das Ursprüngliche Ziel im Antrag war, einen Vergleich zwischen einem Kurzpuls-Lasersystem (Faserlaser) und einem Ultrakurzpulslasersystem (Pico-Sekunden-Lasersystem) darzustellen. Rein ökonomisch betrachtet hat es sich schon bei den Vorversuchen abgezeichnet, dass sich bereits mit Kurzpulslasern deutlich schneller und dadurch kostengünstiger bereits die erwarteten Effekte erzielen ließen. Prinzipiell ist die Verfahrensweise von UKP- (Pico-Sekunden-Lasersystem) und KP-Lasersystemen (Faserlaser) sehr ähnlich. Bei beiden Verfahren wird das Strukturieren durch Verdampfen von punktuellen Materialmengen erzielt. Der wesentliche Unterschied besteht bei den beiden Systemen darin, dass unterschiedliche thermische Einflüsse bei der Bearbeitung entstehen. Beim UKP werden nur kleinste Partikel nahezu ohne thermische Beeinflussung des Grundwerkstoffes freigesetzt. Das ist der Hauptvorteil dieses Verfahrens. Allerdings erhöht sich die Bearbeitungszeit dadurch enorm und dürfte daher nur bei hochkomplexen Anwendungen zum Tragen kommen, wo Kosten eher eine untergeordnete Rolle spielen. Auf Grund des Umbaus der Laseranlage am Fraunhofer IWU auf das Femtosekunden-Lasersystem (welches auch zu den UKP-Lasersystemen gehört), waren die ursprünglichen Ziele im Antrag nicht mehr haltbar. Das Femtosekunden-Lasersystem zeichnet sich durch einen präzisen, materialschonenden und schnellen Abtrag aus. Auf Grund der Verfügbarkeit des KP-Lasersystems (Faserlaser) zur Strukturierung der Rundstempel bei der KMLT GmbH und des UKP-Lasersystems (Femtosekunden-Lasersystem) zur Strukturierung der Formstempel am Fraunhofer IWU wurde ein vergleichende Bewertungskonzept gewählt. Dieses sieht vor, dass die auf die Rund- und

Formstempel applizierten Strukturgeometrien vor und nach den Versuchen bewertet werden, um vor den Versuchen die Präzision des Abtrags (Strukturtreue) darzustellen und nach den Versuchen den Verschleißzustand zu bewerten. Im Falle einer Randschichtbeeinflussung durch das KP-Lasersystem müsste der Verschleiß an den Mikrostrukturen höher ausfallen. Als weiteren Bewertungspunkt steht die Strukturierungszeit im Fokus, welchen einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzt.

2.3. AP 3: Schneidwerkzeug und Strukturierung von Schneidstempeln

3.3 Übertragung von Strukturvorgaben auf Stempelformen sowie Ableitung von Maschinenprogrammen

3.3.1 Ableitung der Maschinenprogrammierung für Rundstempel auf einem 3-Achs- Laserbearbeitungszentrum für Labor- und Praxisversuche auf Basis der berechneten Strukturvorgaben

Die Bearbeitung der Rundstempel erfolgte auch hier in einer Aufnahme im motorischen Drehapparat mit einem 3-Backenfutter. Mit Hilfe einer integrierten Kamera wurden u.a. Position und Fokus exakt ermittelt und ins Laserprogramm übertragen. Die Errechnung der Struktur erfolgte so, dass es ein in-sich geschlossenes, am Umfang abgewickeltes Bild ergibt. Für die Abarbeitung der Strukturierungsaufgabe werden die Negativstrukturen mit dem Laser herausgearbeitet, wie auch beim KP-Laser.

Die 3D-Mikrostrukturinformationen wurden als STL-File vom Fraunhofer IWU zur Verfügung gestellt und bei KMLT GmbH in die Maschinensoftware integriert. Dabei erfolgte die Abarbeitung schichtweise, d.h. mit den in AP2.3 ermittelten Abtragsparametern. In Vorversuchen wurden anschließend Bearbeitungen durchgeführt, um die Parameter und die daraus resultierende Qualität zu bestätigen.

3.4 Laserstrukturierung von Schneidstempeln unterschiedlicher Stempelformen

3.4.1 Laserstrukturierung der Rundstempel für Labor- und Praxisversuche

Die Rundstempel wurden mit dem in AP 2.3.2 beschriebenen Faserlaser von SPI strukturiert (KP-Lasersystem). Für die Laborversuche mit Rundstempeln beim Fraunhofer IWU wurden die nachfolgend dargestellten Stempel hergestellt.

Rundstempel (Teilprojekt 4)

Stempel für Vorversuche Teil A:	21 Stück (Werkstofffalschlieferung ASP23)
Versuchsteil A - Stempelwerkstoff Vanadis 23:	39 Stück
Versuchsteil B - Stempelwerkstoff Vanadis 23:	32 Stück
Versuchsteil D1 - Stempelwerkstoff Vanadis 23:	3 Stück
Versuchsteil D7 - Stempelwerkstoff CPM Rex 73:	3 Stück

Für die Versuche bei der Scherdel GmbH wurden die nachfolgend dargestellten Stempel bereitgestellt.

Scherdel (assoziierter Partner)

Versuchsteil C - Stempelwerkstoff S790:	4 Stück

Nachfolgend werden in Abbildung 17 bis Abbildung 22 die 6 verschiedenen Designvarianten dargestellt, welche im Versuchsteil A am Fraunhofer IWU untersucht wurden.

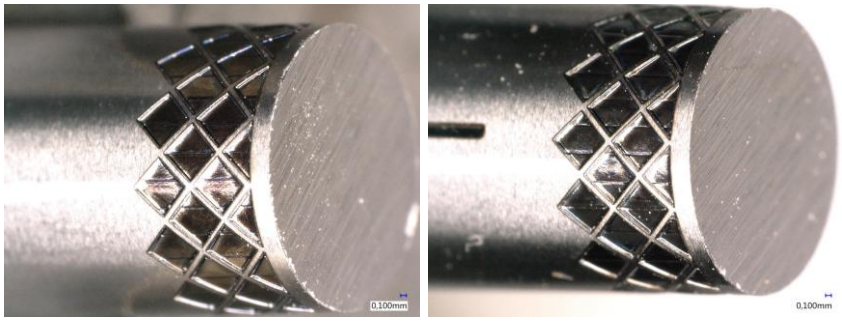


Abbildung 17: Gravuren mit Raute – 60% reduziert – Abstand Gravur zur Schneidkante 0,3mm

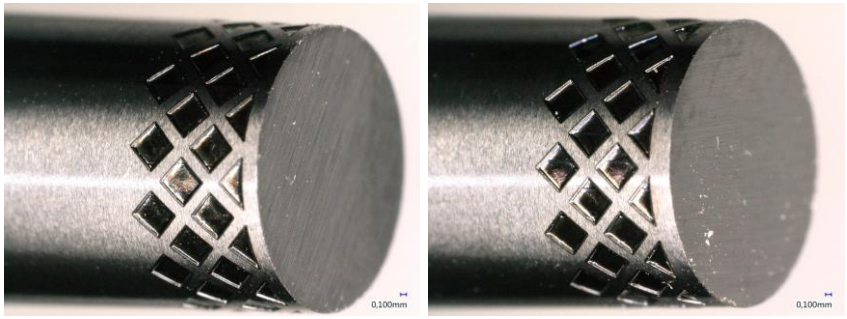


Abbildung 18: Gravuren mit Raute – 40% reduziert, rechts: Bildposition 1, links: Bildposition 2

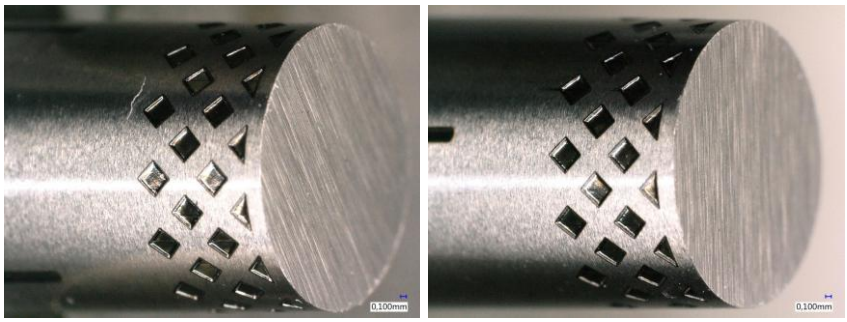


Abbildung 19: Gravuren mit Raute – 20% reduziert, rechts: Bildposition 1, links: Bildposition 2

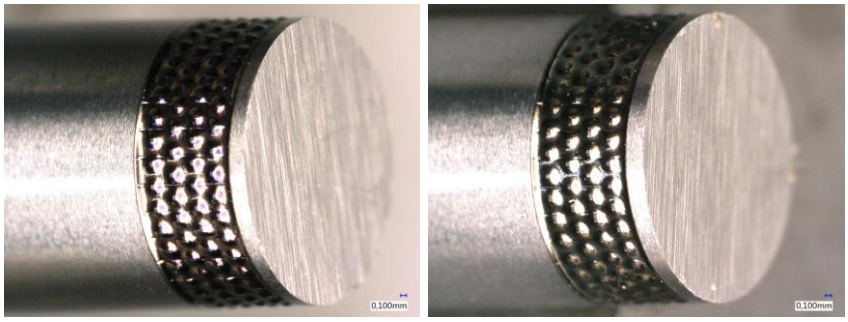


Abbildung 20: Gravuren mit Kugelkappe – D1, rechts: Bildposition 1, links: Bildposition 2

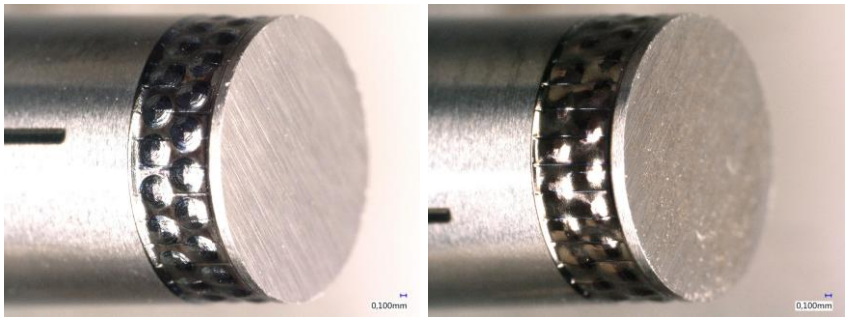


Abbildung 21: Gravuren mit Kugelkappe – D3, rechts: Bildposition 1, links: Bildposition 2

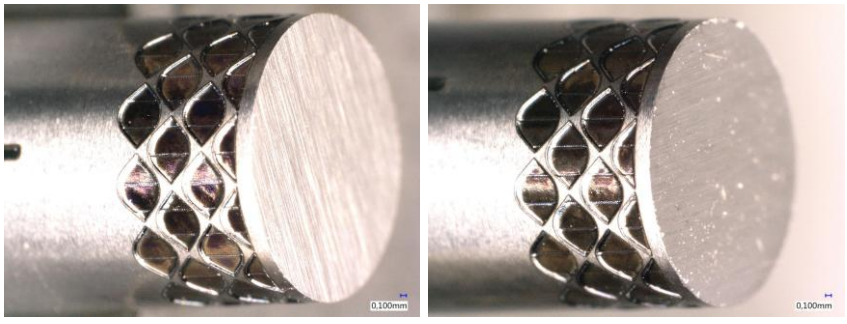


Abbildung 22: Gravuren mit Raute rund – 60% reduziert, rechts: Bildposition 1, links: Bildposition 2

Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt die umgesetzten Mikrostrukturen für den Versuchsteil A-B2, wo der Einfluss des Abstands der Struktur von der Schneidkante untersucht wurde. Die Stempelgravuren wurden an Rundstempeln mit drei verschiedenen Designs, mit den Abständen von 0,15 mm, 0,3 mm und 0,45 mm zwischen Gravur und Schneidkante ausgeführt.

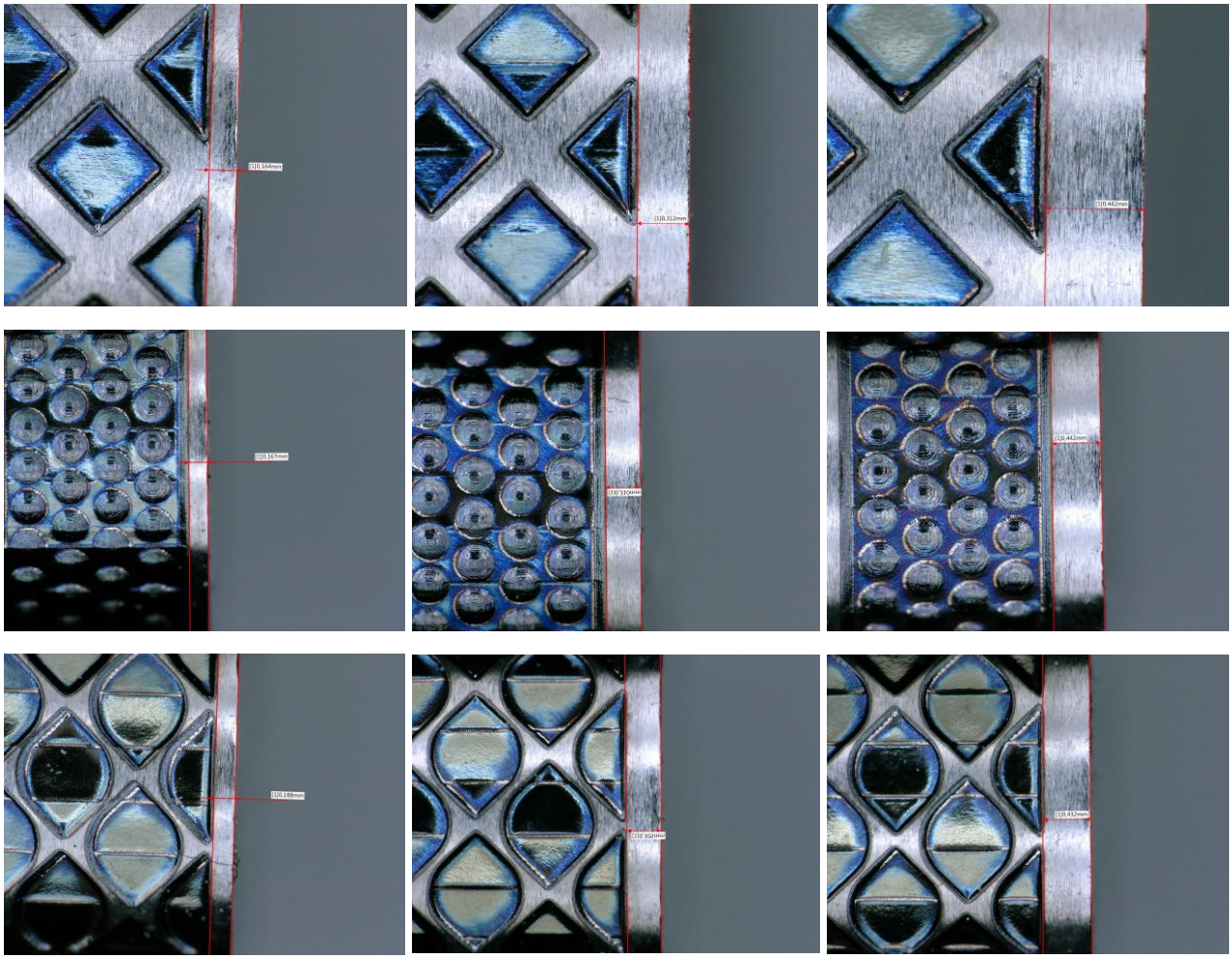


Abbildung 23: Gravuren in 3 Designs mit variablem Abstand zur Kante

Die Vermessung der Gravuren nach dem Laserprozess erfolgten mit dem Messmikroskop Keyence VHX-600. Dabei wurde maßgenblich die Strukturtiefe der erzeugten Gravuren ermittelt und ausgewertet (Abbildung 24 bis Abbildung 26).

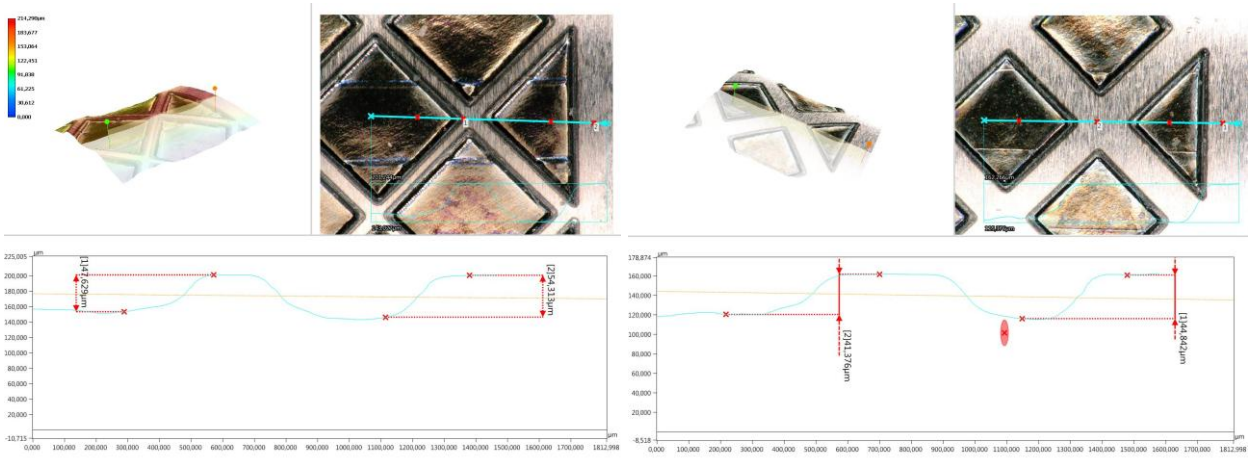


Abbildung 24: Vermessung der Gravur nach dem Laserprozess

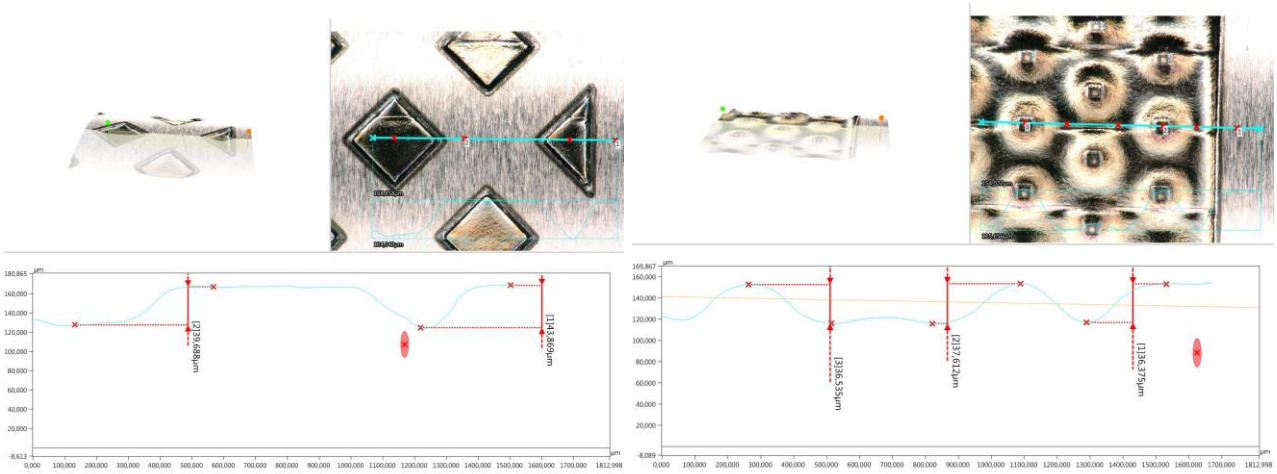


Abbildung 25: Vermessung der Gravur nach dem Laserprozess

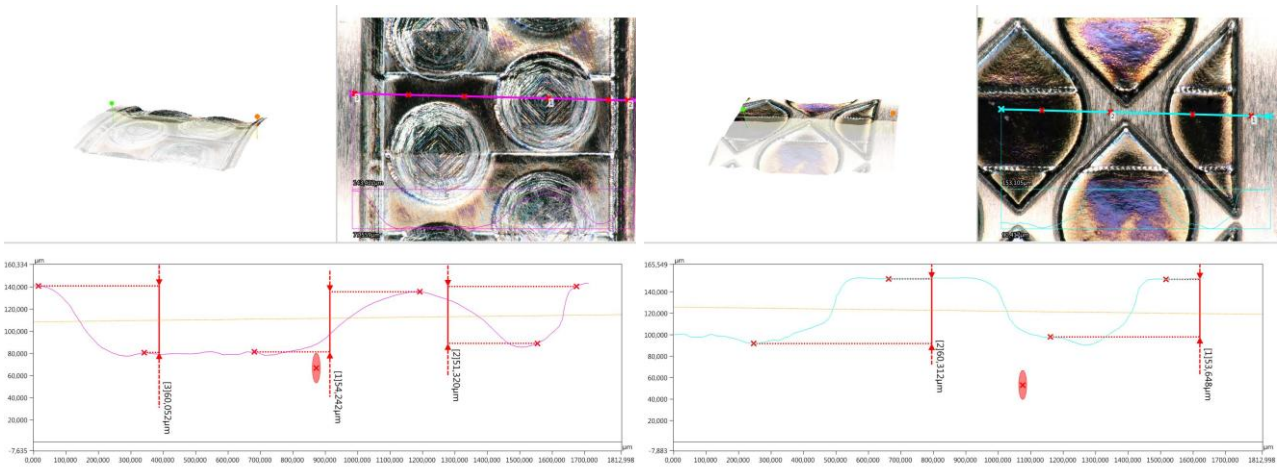


Abbildung 26: Vermessung der Gravur nach dem Laserprozess

Im Versuchsteil B wurden nochmals Rundstempel in 3 ausgewählten Layouts (siehe Abbildung 27) strukturiert. Die Stempel sind für Versuche in unterschiedlichen Blechwerkstoffen zum Einsatz gekommen. Der Abstand der Struktur zur Schneidkante beträgt 0,3mm.

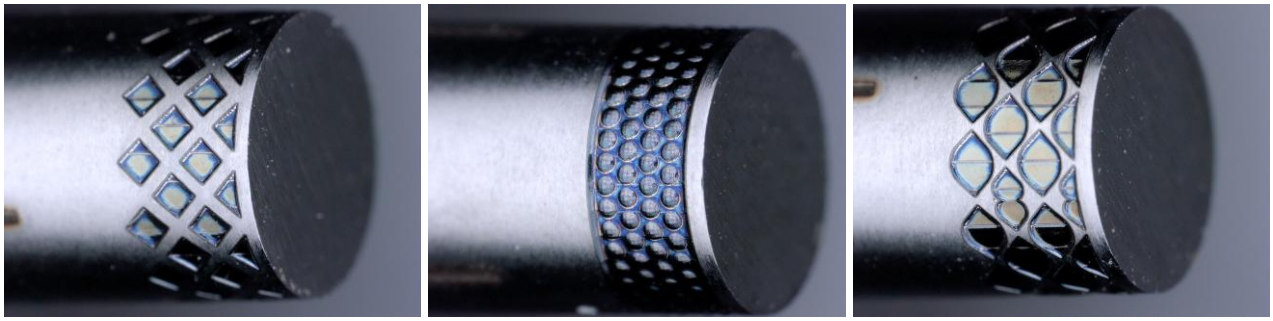
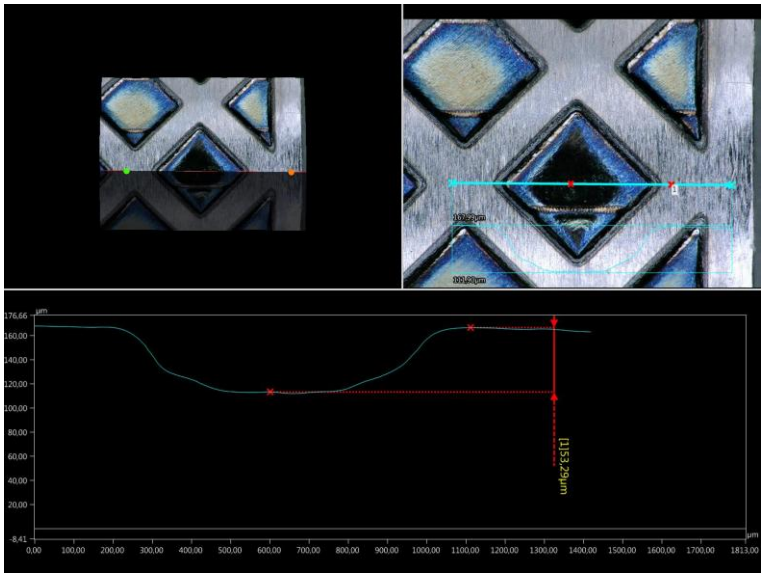
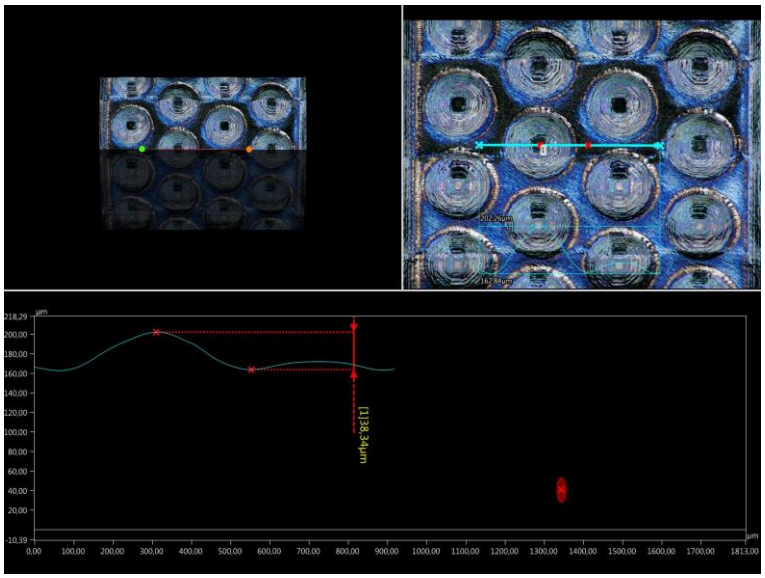


Abbildung 27: strukturierte Rundstempel Layouts für Versuchsteil B – Einsatz im Bandwerkstoff DC04 und 1.4310

Auch diese Stempel wurden direkt nach der Strukturierung mit dem Mikroskop VHX-600 vermessen.





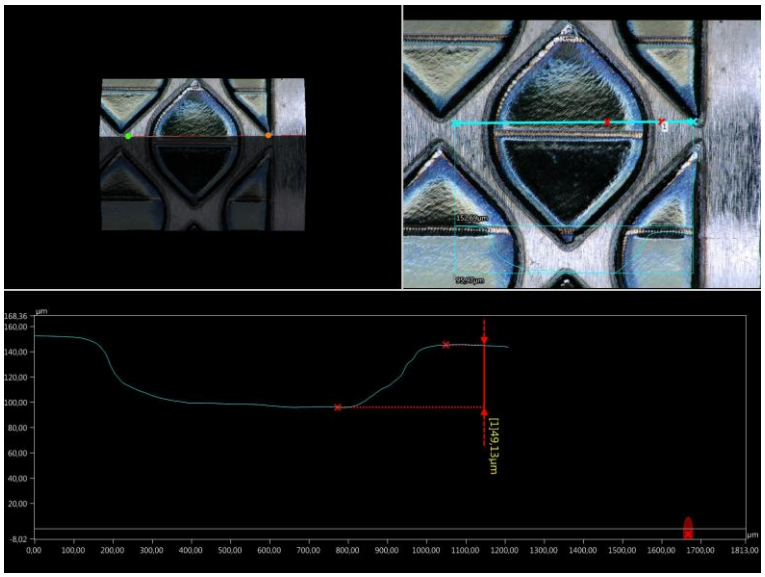


Abbildung 28: Vermessung der Stempelgravur nach dem Laserprozess für Versuchsteil B

2.4. AP 4: Bauteil- und Schneidwerkzeugcharakterisierung

4.3 Charakterisierung der applizierten Mikrostrukturierung vor und nach den Schneidversuchen

4.3.1 Charakterisierung der Stempeleigenschaften und der Mikrostrukturierung für Rundstempel der Laborversuche vor und nach den Schneidversuchen

Aufgrund der bereits oben angesprochenen Verzögerungen, die sich u.a. durch die Lieferung falscher Stempel ergaben, begannen die Schneidversuche später als geplant und somit auch die Ermittlung der Strukturveränderungen. Diese erfolgten direkt nach dem Strukturierungsprozess, nach 50.000 Hub, nach 100.000 Hub bzw. 200.000 Hub. Vermessen und optisch bewertet wurden die Rundstempel jeweils mit dem Digitalmikroskop VHX-6000. Nachfolgend sind die Strukturveränderungen für die Kugelkappe D1 in Abbildung 29 bis Abbildung 31 dargestellt.

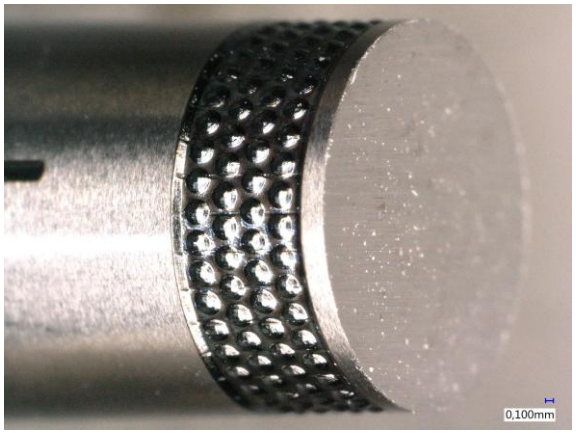


Abbildung 29: Strukturierung direkt nach dem Laserprozess

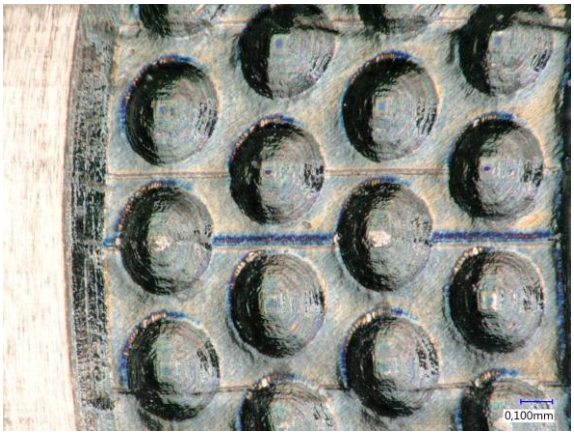
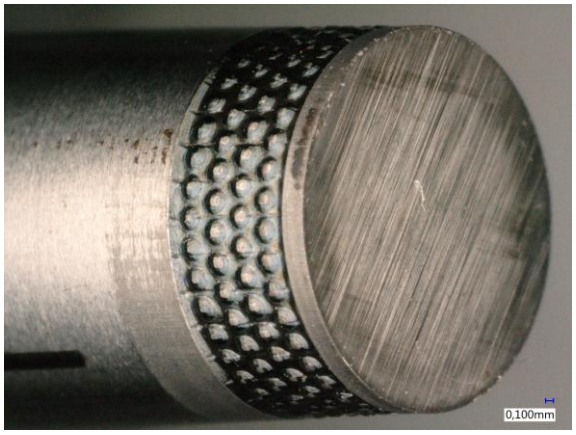


Abbildung 30: Strukturierung nach 50.000 Hub



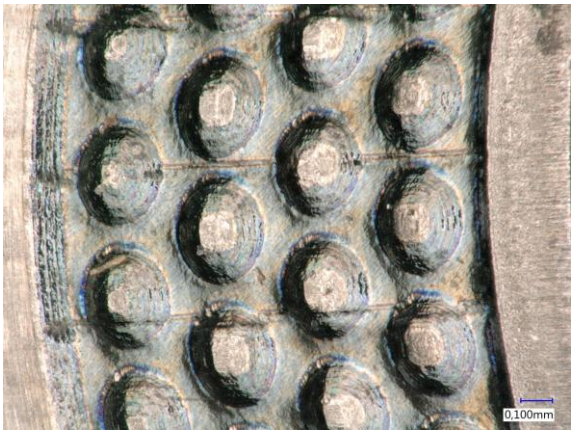


Abbildung 31: Strukturierung nach 100.000 Hub

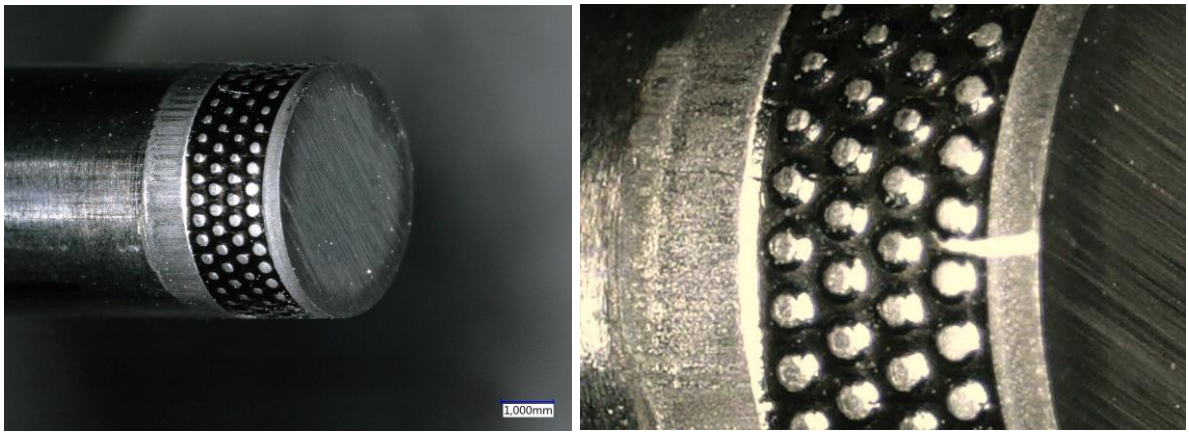


Abbildung 32: Strukturierung nach 200.000 Hub

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Struktur grundsätzlich erhalten bleibt, jedoch ein Verschleiß vorhanden ist. Die Kugelkappen in obiger Abbildung 31 bei 100.000 Hub und Abbildung 32 bei 200.000 Hub sind an der Oberkante abgeflacht. Auch sind teilweise Materialrückstände (vermutlich Materialabrieb) innerhalb der Strukturen vorhanden.

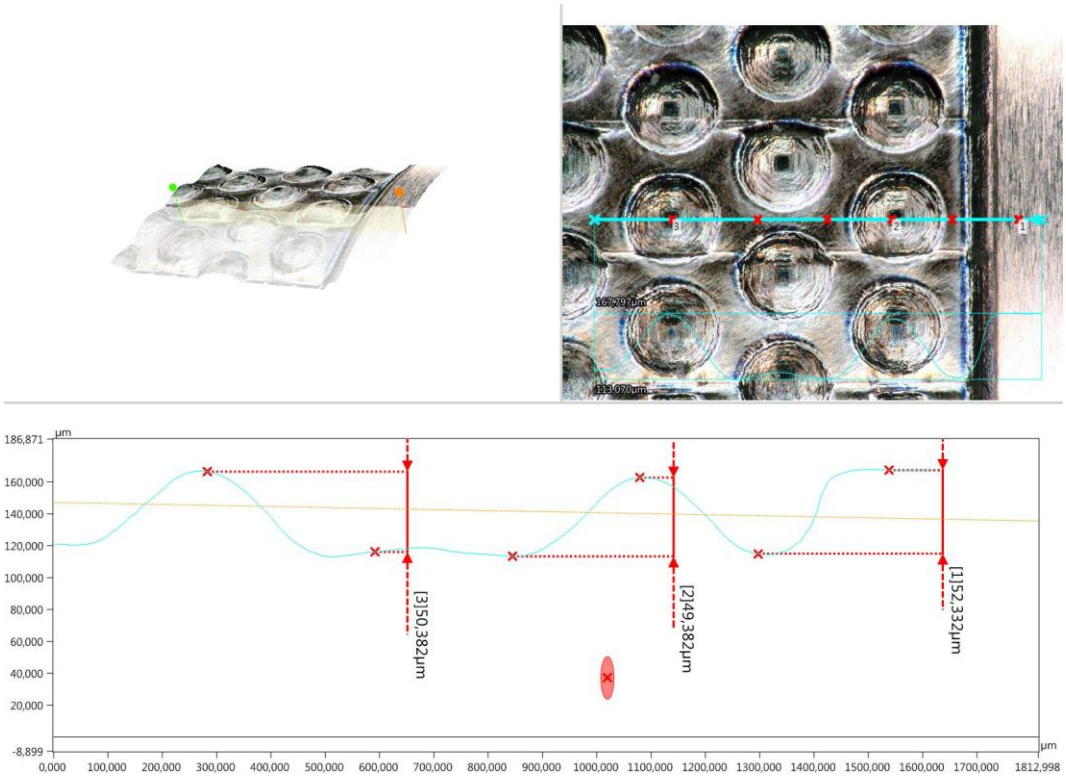


Abbildung 33: Vermessung der Kugelkappenstruktur D1 direkt nach der Laserbearbeitung

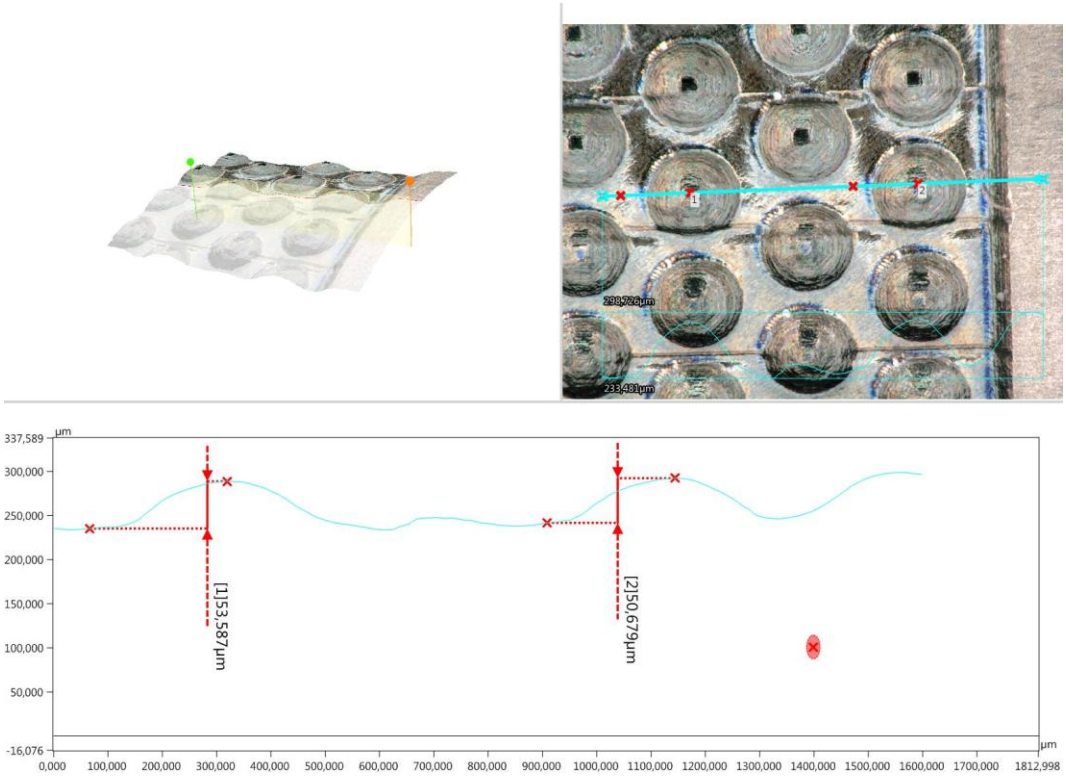


Abbildung 34: Vermessung der Kugelkappenstruktur D1 nach 50.000 Hub

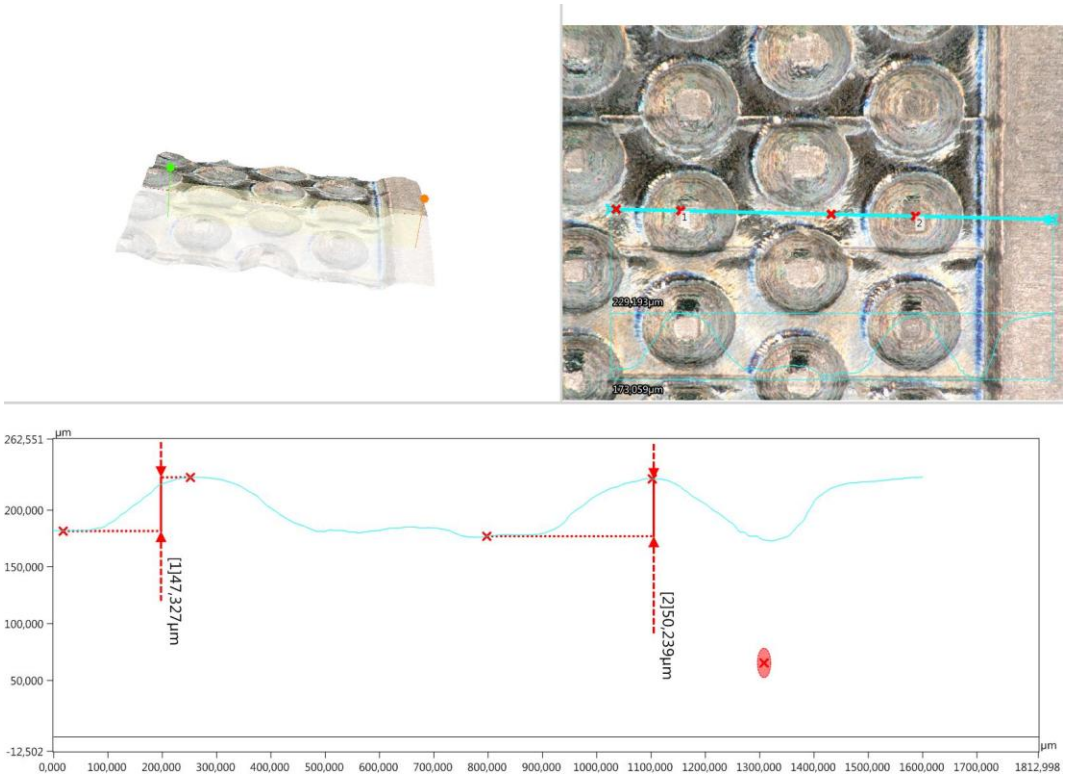


Abbildung 35: Vermessung der Kugelkappenstruktur D1 nach 100.000 Hub

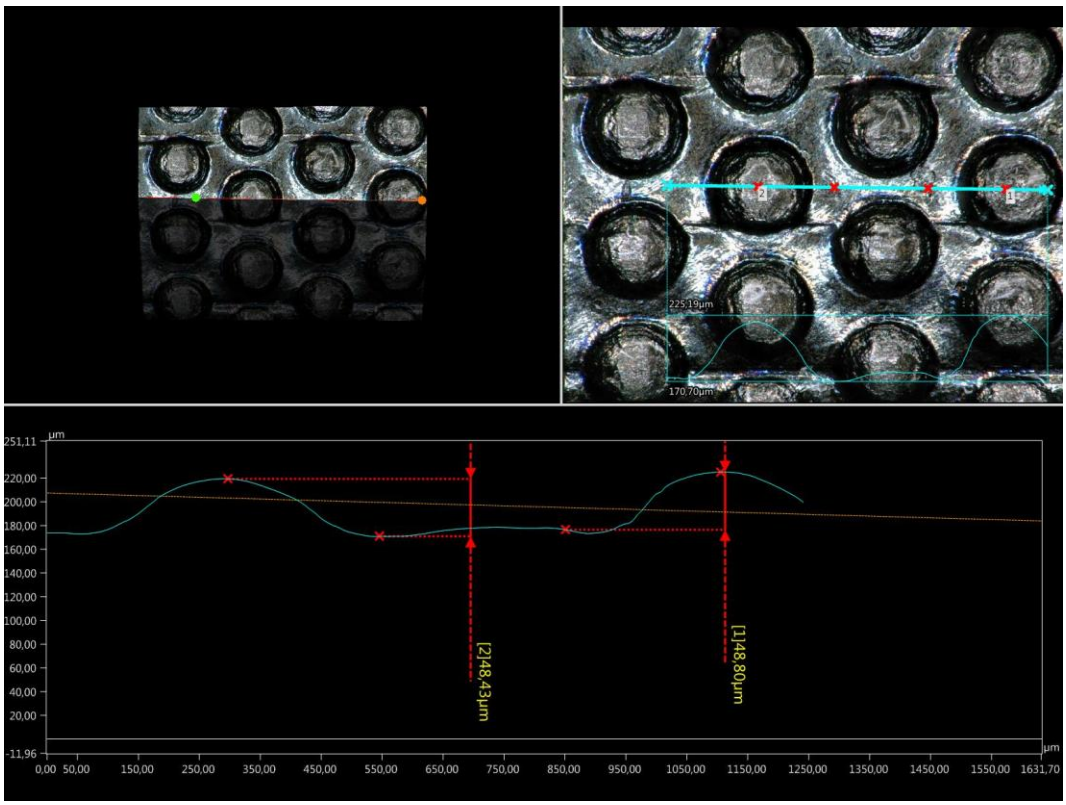


Abbildung 36: Vermessung der Kugelkappenstruktur D1 nach 200.000 Hub

Bei der Auswertung der Mikrostrukturhöhen fällt auf, dass ausgehend von Abbildung 33 bis Abbildung 36 kein hoher Verschleiß an der Kugelkappenstruktur detektiert werden kann. Auch die Vermessung der in Abbildung 37 dargestellten Strukturen zeigte, dass kein Verschleiß innerhalb der Strukturierung zu erkennen ist. Nach 50.000, 100.000 Hub bzw. 200.000 Hub sind keine signifikanten Veränderungen an der Gravurtiefe bzw. Struktur zu verzeichnen.

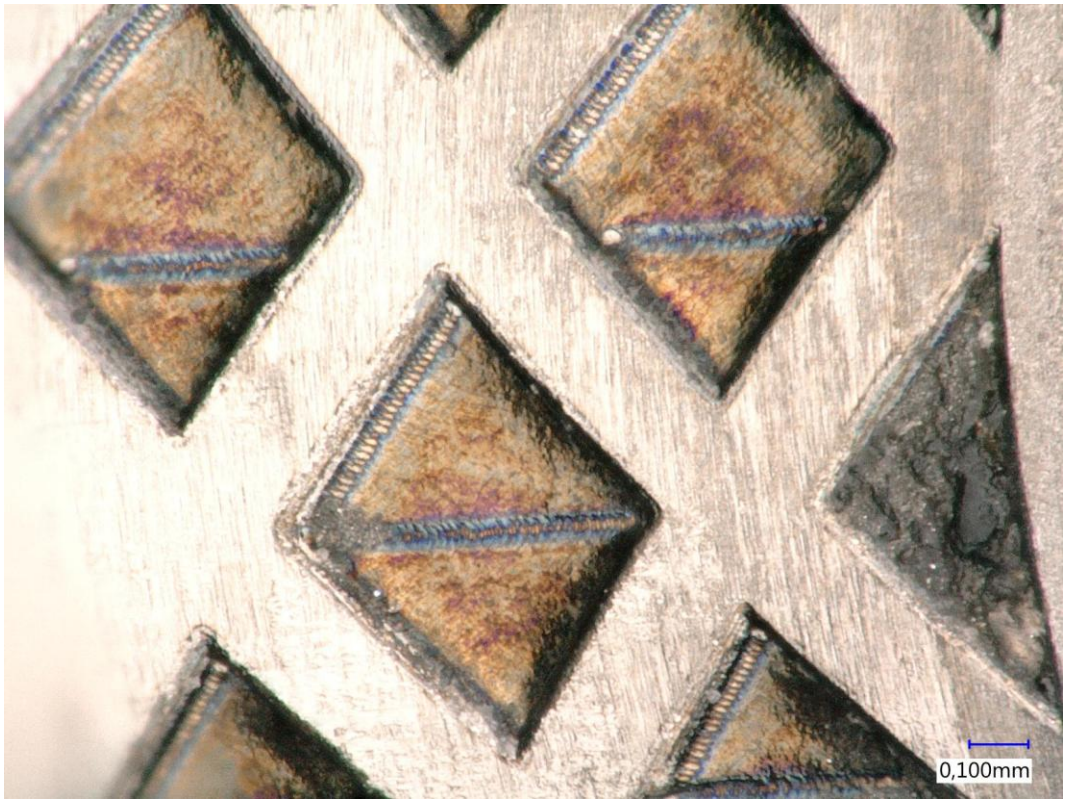


Abbildung 37: Materialrückstände innerhalb der Strukturgeometrie

2.5. AP 7: Ganzheitliche Bewertung der Versuchsergebnisse

7.5 Analyse Strukturierungen der mit Kurzpuls- und Ultrakurzpulslaser hergestellten Schneidstempeln

7.5.2 Bewertung mittels 3-Achs Laserzentrum hergestellten Strukturvarianten

Die Bewertung der erzeugten Mikrostrukturgeometrie erfolgte vor und nach der Versuchsdurchführung und wird im Bericht für ausgewählte Strukturgeometrien nachfolgend dargestellt. Zur Bewertung der Strukturtreue bzw. der Strukturausprägung einer Strukturvarianten erfolgte ein Vergleich der Strukturtiefe zwischen den drei Messstellen, welche am Stempelumfang über die Versuchsdauer erfasst wurden. Ausgewertet werden die Schwankungsbreite, der Mittelwert der gemessenen Strukturtiefe sowie deren Quotient, woraus die prozentuale Abweichung der gemessenen Strukturtiefe abgeleitet wird. Des Weiteren wurde versucht, einen Verschleißverlauf für jede Messstelle, ausgehend vom NEU Zustand bis zu 100.000 Hub darzustellen. Diese Vorgehensweise wurde für jede Mantelflächenstruktur durchgeführt und die Ergebnisse über die drei eingesetzten Stempel gemittelt. Das Ergebnis der Analysen ist nachfolgend in Tabelle 9 bis Tabelle 11 dargestellt. Bezogen auf die Kugelkappenstruktur liegen die Schwankungen der Strukturtiefe im Neuzustand zwischen ca. 5,8% und ca. 18,7 %, was zu keinen gravierenden Nachteilen führt, da die Strukturtiefe in erster Linie nicht funktionsrelevant ist. Die Streubreite der Strukturtiefe zeigt, welche qualitativen Möglichkeiten der Kurzpulslaser bei der Strukturumsetzung bietet. Im Bericht des Fraunhofer IWU wurde der Vergleich zwischen dem hier verwendeten Faserlaser (Kurzpulslaser) und einem Femtosekunden Lasersystem (Ultra-Kurzpulslaser) erstellt. Das Femtosekunden Lasersystem gewann diesen Vergleich bedingt durch die höhere Präzision und Geschwindigkeit.

Tabelle 9: Strukturtreuebewertung - **Kugelkappenstruktur** auf Rundstempeln – KP-Laser bearbeitet [KMLT]

Werte in [mm]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Schwank-ungsbreite	Mittelwert	prozentuale Abweichung
Rundstempel I4_1 **NEU**	0,03654	0,03411	0,03366	0,00288	0,03477	8,28%
Rundstempel I4_1 **50T**	0,02932	0,02996	0,03018	0,00086	0,02982	2,88%
Rundstempel I4_1 **100T**	0,02800	0,03039	0,03546	0,00746	0,03128	23,86%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,00854	-0,00372	0,00181			
Rundstempel I4_2 **NEU**	0,04358	0,03780	0,04573	0,00793	0,04237	18,72%
Rundstempel I4_2 **50T**	0,04000	0,03699	0,04591	0,00892	0,04097	21,78%
Rundstempel I4_2 **100T**	0,04055	0,04799	0,04299	0,00744	0,04385	16,98%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,00303	0,01019	-0,00274			
Rundstempel I4_3 **NEU**	0,05038	0,04752	0,04991	0,00287	0,04927	5,82%
Rundstempel I4_3 **50T**	0,05068	0,05238	0,04839	0,00399	0,05049	7,90%
Rundstempel I4_3 **100T**	0,05024	0,04310	0,03933	0,01091	0,04422	24,67%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,00014	-0,00441	-0,01058			
Mittelwert Abweichung NEU-100T Hub	**-0,00390**	**0,00069**	**-0,00384**			

Die in dieser Auswertung betrachteten Schneidstempel wurden im Bandwerkstoff 1.4462 mit einer Dicke von 0,8 mm Dicke eingesetzt. Bei der Auswertung der Verschleißwerte fällt auf, dass diese teilweise in die positive Richtung, also mehr Material, sich entwickeln. Dafür kann es verschiedene Gründe geben. Zum einen kann ein tatsächlicher Materialübertrag stattgefunden haben oder Ablagerungen (Schmutz…) haben sich auf der Strukturgeometrie abgelagert, wodurch die Strukturtiefe vergrößert wird. Zum anderen kann es sein, dass trotz sorgfältiger Auswahl nicht die gleiche Struktur vermessen wurde und daraus eine vergrößerte Strukturtiefe resultiert. Im Mittel wurden bei der Kugelkappenstruktur ca. 4 µm Verschleiß gemessen, im Maximum lag der Verschleiß bei ca. 10,6 µm. Diese Verschleißwerte zeigen, dass eine negative Randschichtbeeinflussung durch den Laser nicht stattgefunden hat.

In Abbildung 38 sind die vorstehend beschriebenen möglichen Einflüsse, durch Materialübertrag bzw. Ablagerungen, auf das Messergebnis abgebildet. Nur die Ablagerungen könnten durch Reinigen des Stempels als Messfehler vermieden werden.

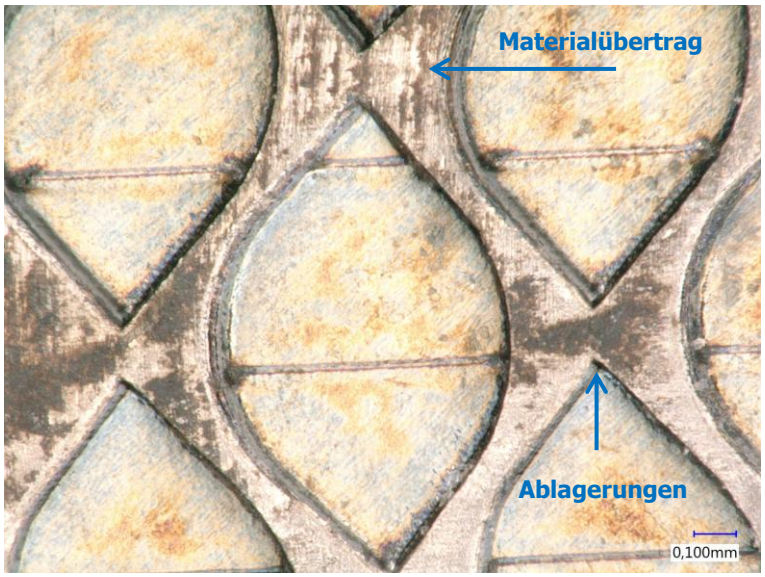


Abbildung 38: Materialübertrag bzw. Ablagerungen auf strukturierter Mantelfläche

Bei der Analyse der mit der Struktur Raute-rund 60% strukturierten Stempel fallen die Schwankungen der Strukturtiefe im Neuzustand von ca. 7,6% bis etwa 25,5 % auf. Auch hier kann die Streubreite auf den Einsatz des Kurzpulslasers sowie die möglichen Abweichungen bei der Vermessung zurückgeführt werden. Im Mittel wurden bei der Struktur Raute-rund 60% ca. 5 µm Verschleiß gemessen, im Maximum lag der Verschleiß bei ca. 11,8 µm.

Tabelle 10: Strukturtreuebewertung - **Raute-rund 60%** Struktur auf Rundstempeln – KP-Laser bearbeitet [KMLT]

Werte in [mm]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Schwank-ungsbreite	Mittelwert	prozentuale Abweichung
Rundstempel I6_1 **NEU**	0,06312	0,04926	0,05078	0,01386	0,05439	25,48%
Rundstempel I6_1 **50T**	0,04576	0,05674	0,04880	0,01098	0,05043	21,77%
Rundstempel I6_1 **100T**	0,05892	0,05691	0,04389	0,01503	0,05324	28,24%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,00420	0,00764	-0,00689			
Rundstempel I6_2 **NEU**	0,06002	0,05698	0,05564	0,00439	0,05755	7,62%
Rundstempel I6_2 **50T**	0,06286	0,05379	0,05258	0,01029	0,05641	18,24%
Rundstempel I6_2 **100T**	0,06183	0,06318	0,04382	0,01936	0,05627	34,39%
Abweichung **NEU-100T** Hub	0,00181	0,00619	-0,01182			
Rundstempel I6_3 **NEU**	0,03841	0,04091	0,04415	0,00574	0,04116	13,96%
Rundstempel I6_3 **50T**	0,04346	0,03212	0,04728	0,01516	0,04096	37,01%
Rundstempel I6_3 **100T**	0,04142	0,04201	0,04638	0,00495	0,04327	11,44%
Abweichung **NEU-100T** Hub	0,00301	0,00110	0,00222			
Mittelwert Abweichung NEU-100T Hub	**0,00021**	**0,00498**	**-0,00550**			

Insgesamt liegen die Verschleißwerte auch bei dieser Strukturvariante in einem sehr niedrigen Bereich. Im Gegensatz zur Kugelkappenstruktur fällt die Flächenreduzierung mit 60 % geringer aus, wodurch das Risiko des Mantelflächenverschleißes durch Verschmutzungen und Materialübertrag steigt.

Die Verschleißanfälligkeit der Mantelfläche mit zunehmender Fläche kann auch bei der in Abbildung 39 dargestellten Mikrostruktur Raute 40 % beobachten. In der Abbildung ist der Materialübertrag deutlich erkennbar.

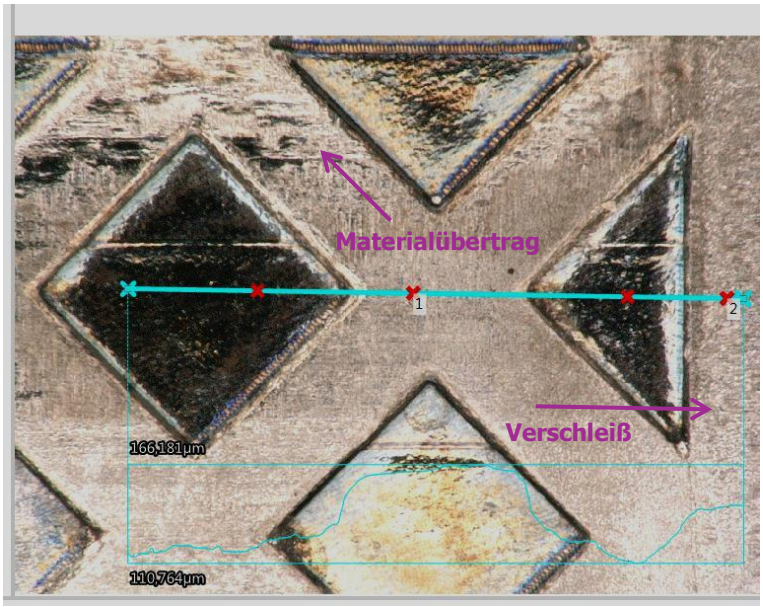


Abbildung 39: Materialübertrag und Verschleiß - Raute 40 % strukturierte Mantelfläche

Die Schwankungen der Strukturtiefe im Neuzustand, bei den mit der Struktur Raute 40% strukturierten Stempeln, fallen mit ca. 8,1% bis etwa 13,4 % am geringsten, bei den drei betrachteten Strukturen, aus. Im Mittel wurden bei der Struktur Raute 40% ca. 7,3 µm Verschleiß gemessen, im Maximum lag der Verschleiß bei ca. 14,1 µm. Es fällt auf, dass durch die Zunahme der aktiven Mantelfläche es zur Erhöhung des Mantelflächenverschleißes kommt.

Tabelle 11: Strukturtreuebewertung – **Raute 40 %** Struktur auf Rundstempeln – KP-Laser bearbeitet [KMLT]

Werte in [mm]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Schwank-ungsbreite	Mittelwert	prozentuale Abweichung
Rundstempel I2_1 **NEU**	0,04138	0,04600	0,04738	0,00600	0,04492	13,36%
Rundstempel I2_1 **50T**	0,04104	0,03887	0,04903	0,01016	0,04298	23,63%
Rundstempel I2_1 **100T**	0,02917	0,03924	0,03796	0,01007	0,03546	28,40%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,01221	-0,00677	-0,00942			
Rundstempel I2_2 **NEU**	0,04951	0,05099	0,05363	0,00412	0,05138	8,03%
Rundstempel I2_2 **50T**	0,04796	0,05233	0,05798	0,01002	0,05276	18,98%
Rundstempel I2_2 **100T**	0,04411	0,04468	0,04996	0,00585	0,04625	12,66%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,00540	-0,00631	-0,00367			
Rundstempel I2_3 **NEU**	0,04457	0,04828	0,04498	0,00372	0,04594	8,09%
Rundstempel I2_3 **50T**	0,04602	0,04684	0,05220	0,00618	0,04835	12,79%
Rundstempel I2_3 **100T**	0,03043	0,04716	0,03862	0,01673	0,03874	43,18%
Abweichung **NEU-100T** Hub	-0,01413	-0,00112	-0,00636			
Mittelwert Abweichung NEU-100T Hub	**-0,01058**	**-0,00473**	**-0,00648**			

Der Vergleich zur Strukturtreue zwischen KP- und UKP-Lasersystem wurde im Bericht vom Fraunhofer IWU abgehandelt. Im Ergebnis sind die UKP-Lasersysteme, insbesondere der Femtosekunden-Laser, dem KP-Laser bei der Strukturtreue und Strukturierungsgeschwindigkeit überlegen. Es konnte jedoch bei den Versuchen mit den Schneidstempeln, die mit dem KP-Laser strukturiert wurden, kein Nachteil im Einsatzverhalten gefunden werden.

2.6. AP 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

8.5 Effizienzvergleich eingesetzter Lasersysteme in Abhängigkeit der zu strukturierenden Stempelform

8.5.1 Bewertung Fertigungsaufwand für die Mikrostrukturierung der Rundstempel

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde der Fertigungsaufwand für die Mikrostrukturierung von Rundstempeln analysiert. Ziel war es, die Effizienz unterschiedlicher Lasersysteme – in diesem Projekt Ultrakurzpuls-(UKP) und Kurzpuls-(KP) Laser – in Bezug auf die spezifischen Anforderungen der Stempelform zu bewerten. Die Betrachtung erfolgt anhand folgender Teilaspekte:

1. *Aufwand zur Charakterisierung des Stempelwerkstoffs*

Die Charakterisierung des eingesetzten Werkstoffs war essenziell für die Auswahl geeigneter Prozessparameter. Hierzu zählen beispielweise:

- Ermittlung der thermischen und optischen Eigenschaften
- Analyse der Mikrostruktur und Oberflächenbeschaffenheit
- Bewertung der Laser-Material-Wechselwirkung mit verschiedenen Laserparametern

2. *Aufwand zur Ableitung der Strukturverteilung und Programmierung der Laseranlage*

Die Strukturverteilung muss auf die Geometrie des Rundstempels abgestimmt werden. Der Aufwand umfasste:

- CAD-basierte Modellierung der Mikrostruktur in enger Abstimmung mit dem IWU um vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten
- Simulation der Laserbahnen, Ermittlung und Optimierung der Pulsfolge sowie weiterer, projektentscheidender Laserparameter
- Einrichtung und Kalibrierung der Steuerungssoftware

3. *Aufwand zur Strukturherstellung mit einer* ***UKP-Laseranlage***

UKP-Laser ermöglichen hochpräzise Materialbearbeitung mit minimaler thermischer Beeinflussung. Der Aufwand beinhaltete:

- Einrichtung der Anlage für die spezifische Stempelformen
- Durchführung von Testläufen zur Parameteroptimierung
- Anpassung der Prozessparameter an die Materialeigenschaften der unterschiedlichen Stempelwerkstoffe
- Bewertung der erreichbaren Strukturqualität und Bearbeitungsgeschwindigkeit
- Serienstrukturierung mit Fokus auf Qualität und Reproduzierbarkeit für anspruchsvollere Anwendungen

4. *Aufwand zur Strukturherstellung mit* ***KP-Laseranlage***

KP-Laser bieten eine wirtschaftlichere Alternative aufgrund einer deutlich effektiveren und preiswerteren Herstellung ähnlich komplexer Strukturen. Der Aufwand umfasste ähnlich wie oben auch hier:

- Einrichtung der Anlage für die spezifische Stempelformen
- Durchführung von Testläufen zur Parameteroptimierung
- Ermittlung und Anpassung der Prozessparameter an die Materialeigenschaften
- Bewertung der erreichbaren Strukturqualität und Bearbeitungsgeschwindigkeit
- Serienstrukturierung mit Fokus auf Qualität, Reproduzierbarkeit und erwarteter Wirtschaftlichkeit

Tabelle 12: Bewertungskriterien für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zwischen UKP- und KP-Lasersystemen

Kriterium	**UKP-Laser**	**KP-Laser**
Präzision	sehr hoch	mittel
Thermische Beeinflussung	minimal	höher
Programmieraufwand	hoch	mittel
Anschaffungskosten	sehr hoch	mittel
Unterhaltskosten	sehr hoch	gering bis mittel
Wirtschaftlichkeit	gering bei komplexen Strukturen	hoch bei einfachen Strukturen

Die Bewertung in Tabelle 12 zeigt, dass der Fertigungsaufwand stark von der Komplexität der Struktur, der Materialeigenschaften und der Präzisionsanforderungen abhängt. UKP-Laser bieten Vorteile bei hochpräzisen Anwendungen, während KP-Laser bei einfacheren bis mittleren Strukturen deutlich wirtschaftlicher sind. Die Wahl des Lasersystems sollte sich an Strukturkomplexität, Materialanforderungen und Produktionsvolumen orientieren. Eine differenzierte Betrachtung ermöglicht eine fundierte Entscheidung über den optimalen Technologieeinsatz.

Der Aufwand zur Charakterisierung des Stempelwerkstoffs fällt einmalig an und kann deutlich reduziert werden, sofern bereits Laserparameter für einen Werkstoff mit vergleichbarer Zusammensetzung vorliegen. So lassen sich nach den erfolgten Vorversuchen für die Strukturierung der Werkstoffe Vanadis 23 (SPM23) und CPM Rex 73 nahezu identische Abtragsparameter verwenden.

Der Hauptaufwand liegt in der Bewertung der Abtragsleistung in Verbindung mit der resultierenden Oberflächenrauheit. Da es sich um einen einmaligen Aufwand handelt, wird dieser in die Gesamtkalkulation für die Ableitung der Strukturverteilung und die Programmierung der Laseranlage integriert.

Die Ableitung der Strukturverteilung sowie die Programmierung der Laseranlage hängen maßgeblich von der Komplexität des Schneidstempels ab. Wie in Arbeitspaket 7.7 beschrieben, kann eine Teilstrukturierung zur Kostenoptimierung beitragen. Unter idealen Bedingungen – bei vollständiger Verfügbarkeit aller Berechnungshilfen und Vorlagen – lässt sich der Workflow für Strukturverteilung und Maschinenprogrammierung innerhalb von ca. 3 Stunden abschließen. Dies entspricht einem einmaligen Aufwand von etwa € 300,00, ein Stundensatz für Applikationen am KP-Laser von € 100,00 zugrunde gelegt.

Die Einrichtungskosten der Laseranlage pro Strukturvariante werden an der KP-Laseranlage mit rund € 60,00 veranschlagt. Die reine Strukturierungszeit beträgt für einen Rundstempel je nach Variante zwischen 18 und 25 Minuten. Bei einem überschläglich angenommen Stundensatz von € 90,00 für solche Applikationen ergibt sich beispielsweise folgender Kostenaufwand für die Herstellung von Rundstempel mit individuell erstellter Rhombusstruktur, die im Wiederholungsfall nicht erneut als Kostenfaktor mit einfließt:

- **Herstellzeit pro Stück**: 18 Minuten
- **fiktiver Stundensatz**: € 90,00
- **Einmalige Kosten**: € 300,00 (Programmierung) + € 60,00 (Einrichtung) = € 360,00

Tabelle 13: Kostenentwicklung für die Strukturierung von Rundstempeln D = 5 mm mittels KP-Lasersystem

Stückzahl	**Preis pro Stück (€)**	**Gesamtkosten (€)**
10	63.00	630.00
20	46.50	930.00
30	40.00	1200.00
50	35.40	1770.00
100	30.60	3060.00

Erklärung:

- Die Bearbeitungskosten pro Stück liegen bei € 27,00 (18 min × € 90,00 / h).
- Die Fixkosten von € 360,00€ verteilen sich auf die Stückzahl und senken den Stückpreis bei höheren Mengen deutlich. Bei identischen Nachfertigungen belaufen sich die Fixkosten dann nur noch auf € 60,00.

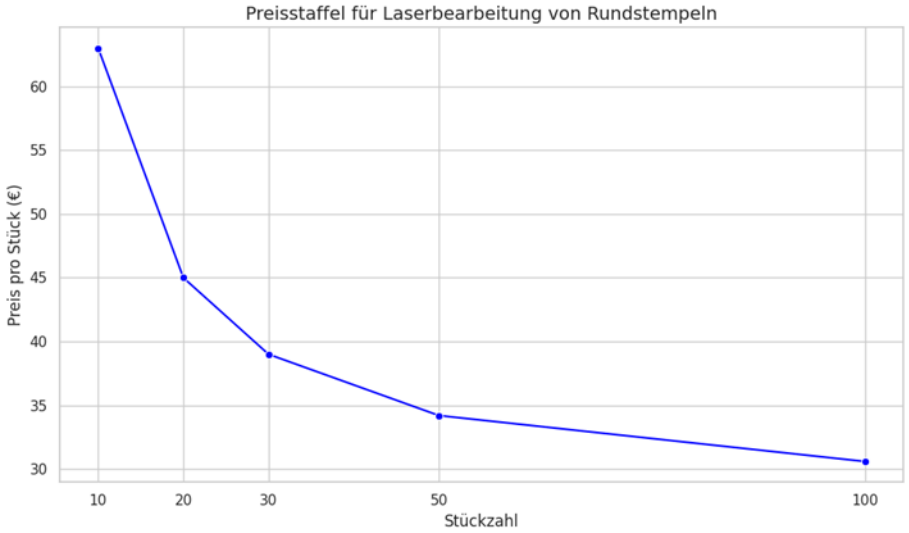


Abbildung 40: grafische Darstellung der Kostenentwicklung für die Strukturierung von Rundstempeln D = 5 mm mittels KP-Lasersystem

Die genannten Kosten beziehen sich auf den Einsatz des verwendeten KP-Lasersystems vom Typ ACSYS. Im Vergleich zum Ultrakurzpulslasersystem liegt die Bearbeitungsgeschwindigkeit auf etwas niedrigerem Niveau, auch bietet der Femtosekunden Laser eine deutlich höhere Präzision und Strukturtreue. Der Kurzpulslaser kann seine Geschwindigkeitsvorteile nicht ausspielen, da dies zulasten der Qualität der Mikrostrukturen ginge. Daher erfolgt die Bearbeitung mit reduzierter Leistung und längerer Bearbeitungsdauer.

3. Verwendung der Zuwendung / Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind nachfolgend in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Kostenart	**Kosten**
Lohnkosten gesamt	€ 99.128,27

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren in ihrem Umfang für das Erreichen der Projektziele angemessen und notwendig. Die im Projekt geplanten und realisierten Arbeitspakte beinhalteten komplexe, interdisziplinäre Zusammenarbeit. Hierfür war eine enge Kooperation zwischen den beteiligten Projektleitern und -mitarbeitern notwendig, um die in der jeweiligen Disziplin vorhandene Expertise zu verknüpfen. Für die KMLT GmbH beinhaltet dies insbesondere die fachübergreifende Kooperation mit dem Fraunhofer IWU bezogen auf die Strukturierung und die Vermessung der Mikrostrukturgeometrie der Rundstempel, sowie die Kooperation mit der Werkzeugbau Fischer GmbH bezogen auf den Bezug der Rundstempelhalbzeuge. Durch die Abwandlung der bisher erreichten Projekterkenntnisse lassen sich Synergien bei der Übertragung auf technologisch ähnliche Prozesse nutzen, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen weiter gestärkt werden kann. Für die KMLT GmbH bedeutet dies, dass durch das Verbundvorhaben und dem damit verbundenen Kompetenzgewinn ein neues Anwendungsgebiet erschlossen werden kann. Mittelfristig kann dies am Anlagenstandort in Neukirch/Lausitz, welcher in einer strukturschwachen Region liegt, zu einer deutlichen Aufwertung des Auftragsvolumens führen.

5. Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Projektlaufzeit diente dem Aufbau von Expertise zur Auslegung und Anfertigung tribologisch optimierter Schneidstempel. Ein Nachweis der prinzipiellen Zielerreichung, d. h., einer wirtschaftlichen Verbesserung der Schneidprozesse und Schnittergebnisse durch den Einsatz mikrostrukturierter Schneidstempel, wurde von den beteiligten Verbundpartnern erbracht. Die Projektpartner erarbeiteten sich das Alleinstellungsmerkmal, in dem sie als Konsortium, bestehend aus Werkzeugbauer und Strukturapplikateur, die Fertigung mikrostrukturierter Schneidstempel als Dienstleistung für Dritte anbieten können. In Summe dient das Projekt der Absicherung Mitteldeutschlands als wertschöpfender sowie energie- und ressourceneffizienter Produktionsstandort.

Die Optimierung der tribologischen Bedingungen beim Schneiden und damit einhergehend der Verringerung des adhäsiven Verschleißes an den Schneidstempeln führte zu einer Standmengenerhöhung bzw. einer Verschiebung der Prozessgrenzen. Es können dadurch kostenintensive Rüst- und Stillstandszeiten verringert werden. Effekte zeigten sich weiterhin durch eine Reduktion von Ausschussteilen / Ausschuss durch verringerten Verschleiß der Schneidstempel und einhergehend eine längere Gewährleistung gleichbleibender Schnittflächenqualität.

Für die produzierenden Projektpartner diente das Projekt der Identifizierung von Möglichkeiten bei der Mantelflächenfunktionalisierung zur Verlängerung der Standmenge und somit zur Steigerung der Effizienz im Schneidprozess. Die KMLT GmbH erarbeitete sich im Projekt die Kompetenzen zur gezielten Einbringung von Mikrostrukturen auf Mantelflächen von Schneidwerkzeugen. Als Laserdienstleister konnte KMLT seine Erfahrungen aus der Bearbeitung von Prägewerkzeugen einbringen. Der Laser als universelles Werkzeug hat sich hier neben dem Erodieren fest etabliert. Stanzwerkzeuge zu strukturieren ist somit eine optimale Erweiterung des Leistungsportfolios der KMLT GmbH. Da die Härte des Materials für die Laserbearbeitung eine untergeordnete Rolle spielt, können besonders teure Werkzeuge bzw. schwer bearbeitbare Werkzeugmaterialien durch eine Strukturierung aufgewertet oder einsatzfähig gemacht werden. Die Strukturierung von Stempeln und perspektivisch von Matrizen könnte zukünftig zu einer nachhaltigen Umsatzsteigerung führen, welche durch begleitende Publikationen in den entsprechenden Fachmedien, Messen und über die öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen des Gravomer-Netzwerks beworben werden sollen.

Potenzielle Nutzer der Technologie sind sämtliche metallverarbeitenden Gewerbe, bei denen Bauteile mechanisch ausgeschnitten bzw. beschnitten werden. So kann die Nutzung perspektivisch auf eine Vielzahl, der beispielsweise in der Automobilbranche und im Maschinenbau tätigen Unternehmen übertragen werden.

6. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Am PtU Darmstadt wurde im Rahmen eines IGF-Vorhabens „Mikrostrukturierte Schneidstempel" der Forschungsvereinigung EFB e. V. (AiF 21560 N) eine Mikrostrukturierung von Schneidstempeln durch maschinelles Oberflächenhämmern untersucht. Dabei handelt es sich um einen inkrementellen Umformprozess, bei dem die Mikrostrukturierung durch einen polierten Hartmetallkopf mit einer Frequenz von bis zu 300 Hz auf die zu bearbeitenden Flächen aufgebracht wird. Neben dem Glätten von Rauheitsspitzen wurde die Werkzeugoberfläche so modifiziert, dass auf diese Schmierstofftaschen und Verschleißpartikelspeicher entstanden. Die Wirksamkeit wurde in Dauerschneidversuchen bis 13.000 Hub untersucht.

[1] P. Schumann, P. Groche: Ressourceneffiziente Prozesse durch modifizierte Werkzeugoberflächen. Mittels Mikrostrukturierung durch maschinelles Oberflächenhämmern zur nachhaltigen Produktion, in: ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 119 (2024), Heft 1-2, S. 75-78.

[2] P. Schumann, P. Groche: Tribologische Optimierung von Schneidstempeln durch Mikrostrukturierung mittels maschinellem Oberflächenhämmern, EFB-Forschungsbericht Nr. 606, Hannover 2023. ISBN 978-3-86776-675-3

7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse des Projektes wurden bisher auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- Postervortrag Gravomer-Netzwerktreffen 13.6.2024 in Leipzig
- Vorstellung bei Versuchsfeldrundgang in Rahmen des EFB-Arbeitskreises am 25.6.2024 am Fraunhofer IWU
- Vorstellung bei Versuchsfeldrundgang auf der Fachtagung Stanzen am 31.1.2025 am Fraunhofer IWU

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projekts werden vordergründig zur Verbesserung der eigenen betrieblichen Wettbewerbsfähigkeit genutzt. Auf Grundlage der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse kann der Vorteil einer Strukturierung dargestellt und angeboten werden. Die KMLT GmbH plant im Rahmen der nächsten Messen Z und Intec in Leipzig die Ergebnisse zu präsentieren. Möglich ist jedoch eine Veröffentlichung der Gesamtergebnisse im Rahmen des Gravomer-Netzwerks mit den Partnern des Projektkonsortiums. Darüber hinaus plant das Fraunhofer IWU eine bzw. mehrere Veröffentlichungen der im Projekt erzielten Ergebnisse unter Einbindung der Partner. Weitere Veröffentlichungen sind im Konsortium abzustimmen.

Anhang:

Tabelle 15: Überblick der geplanten Versuchsteile A bis D

	Versuchsteil A: **Strukturdesign & Stempelgeometrie**			**Versuchsteil B:** **Werkstofffestigkeit**			**Versuchsteil C:** **Banddicke**	**Versuchsteil D:** **Stempelwerkstoff & Randschichtbeeinflussung**			
Stempel-Geometrie	Rund	Rhombus	Rechteck	Rund			Rund- & Form	Rund	Rhombus	Rechteck	R & Form
Stempel-Werkstoff	„S1“	„S1“	„S1“	„S1“			„S2“	„S1/S4“	„S1/S3“	„S1“	„S2“S1“
Bandwerkstoff-Festigkeit	mittel W1	niedrig W2	hoch W3	mittel W1	niedrig W2	hoch W3	mittel W1	„mittel“ W1	„niedrig“ W2	„hoch“ W3	„mittel“ W1
Banddicke	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	4,0 mm / 8,0 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	4,0 mm
Variations-parameter	Variation des Mikrostrukturdesigns: - Kontaktflächenreduzierung /Bedeckungsgrad - Strukturabstand von der Schneidkante/-ecke - Variation der Strukturform			Variation des Bandwerkstoffs - Werkstofffestigkeit / Einfluss der Legierungselemente des Bandwerkstoffs			Variation der Bandwerkstoffdicke - Steigerung der Dicke des Bandwerkstoffs im Vergleich zu den Untersuchungen in Versuchsteil B	Variation Schneidstempelwerkstoff und Randschichtbeeinflussung - Stempelwerkstoffsubstitution günstiger/teurer - Randschichtbeeinflussung durch Laserabtragsverfahren			
Prognostizierte Wirkeffekte	Wirkung des Mikrostruktur-designs auf Rückzugskräfte/ Mantelflächenverschleiß/ Stempelstandzeit in Abhängigkeit vom Bandwerkstoff und der Stempelgeometrie			Wirkung der Stempelstrukturierung bei steigender Werkstofffestigkeit und konstanter Banddicke.			Wirkung der Banddickensteigerung auf den Werkzeugverschleiß und die Schnittqualität bei konstanter Werkstofffestigkeit	Änderung der Verschleißrate am substituierten Stempelwerkstoff; Auswirkung der Randschicht-beeinflussung auf den Werkzeug-verschleiß.			
Zielkriterium	Erarbeitung optimaler Mikrostrukturen für den Stempel			Steigerung Verschleißfestigkeit / Standzeit / Qualität			Steigerung Verschleißfestigkeit / Standzeit / Qualität - Feinschneiden	Steigerung Kosteneffizienz / Standzeit / Qualität			