

Titel

Entwicklung eines ganzheitlichen, werkstoffadaptiven Laserpolierverfahrens für Formwerkzeuge aus Gusseisen mit Kugelgraphit

LPGE

IGF-Nr.: 01IF22681N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik,
Aachen (ILT)

Forschungseinrichtung 2: Gießerei-Institut der RWTH Aachen,
Aachen (GI)



Ansprechpartner beim ILT:

Dr. Edgar Willenborg
0241 8906-213
edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de

Ansprechpartner beim GI:

Mohammadali Ebadi, M.Sc.
0241 80-92756
m.ebadi@gi.rwth-aachen.de

Danksagungen

Das IGF-Projekt „Entwicklung eines ganzheitlichen, werkstoffadaptiven Laserpolierverfahrens für Formwerkzeuge aus Gusseisen mit Kugelgraphit“ (01IF22681N) wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ausgangssituation

Im heutigen Werkzeugbau finden für urformenden Fertigungsverfahren vorwiegend Warmarbeitsstähle Anwendung. Diese Werkstofffamilie zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften und Verschleißwiderstände insbesondere bei erhöhten Einsatztemperaturen aus. Allerdings werden diese positiven Eigenschaften durch Nachteile und Schwierigkeiten vor allem bei der Fertigung der Werkzeugkomponenten begleitet. Formwerkzeuge aus Warmarbeitsstählen werden durch zerspanende Bearbeitung von teuren, primär erzeugten metallischen Halbzeugen in die gewünschte Bauteilgeometrie überführt, ihr Eigenschaftsprofil durch eine anschließende Wärmebehandlung eingestellt und falls notwendig mit einer manuellen Politur auf die geforderte Rauheit gebracht. Neben dem hohen anfallenden Materialverlust ist diese Fertigung nicht nur zeit- und somit auch kostenaufwändig, sondern darüber hinaus werden die herstellbaren Werkzeugkomponenten durch die zerspanende Bearbeitung in der realisierbaren Größe und ihrer geometrischen Komplexität eingeschränkt. Neben diesen technologischen und wirtschaftlichen Nachteilen müssen aber auch die ökologischen Aspekte unter den heutigen Gesichtspunkten von Ressourcenschonung, der prozesstechnischen Energiebilanz und dem dadurch beeinflussten CO₂-Footprint für Formwerkzeuge aus Warmarbeitsstählen betrachtet werden. So sind vor allem der hohe Materialverlust von primär und damit ressourcenintensiv erzeugten Warmarbeitsstahl und der Energiebedarf bei langen Wärmebehandlungszyklen als kritisch zu bewerten.

Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) werden fast ausschließlich im Sandguss gefertigt, wodurch eine endkonturnahe Herstellung der Werkzeugrohlinge bereits vor der mechanischen Endbearbeitung erreicht wird. Verbunden mit der exzellenten mechanischen Bearbeitbarkeit von Gusseisenwerkstoffen kann der Bearbeitungsaufwand gegenüber rein zerspanenden Fertigungsverfahren aus Vollmaterial deutlich gesenkt werden. Gekoppelt mit der Tatsache, dass Gusseisen als Recyclingwerkstoff in der Produktion einen Anteil von bis zu 90 % Stahlschrott aufweist, ergibt sich eine enorme Entlastung der benötigten Material- und Energieressourcen, was finanziell und ökologisch erstrebenswert ist. Durch die Flexibilität des Sandgusses hinsichtlich der industriell realisierbaren Stückzahlen und Bauteilgrößen könnte ein weites Spektrum an komplexen Werkzeuggeometrien in GJS abgebildet werden. Trotzdem sind GJS-Legierungen bisher fast ausschließlich im Formenbau von Tiefziehwerkzeugen und Glasformen als Werkstoff zu finden. Trotz ihrer guten Wärmeleitfähigkeit (36,2 W/K*m für GJS-400-15 bei 330 °C gegenüber zu 28,8 W/K*m für 1.2344 bei 350 °C) und der günstigen Fertigung von komplexen und großen Werkzeuggeometrien durch Gießen, bleiben sie in vielen weiteren potenziellen Werkzeugbauanwendungen weitestgehend unbeachtet. Hierfür können zwei wesentliche Gründe identifiziert werden. Im Vergleich zu Warmarbeitsstählen liegen die Verschleißigenschaften von Gusseisenlegierungen bedingt durch die geringe Werkstoffhärte auf einem niedrigeren Niveau, während gleichzeitig die Polierbarkeit des Werkstoffes durch die im Gefüge enthaltenen Graphitpartikel eingeschränkt ist.

Forschungsziel

Die im hier dargestellten Forschungsvorhaben durchgeführte Entwicklung eines werkstoffadaptierten Laserpolierverfahrens für Formwerkzeuge aus GJS adressiert diese technologischen Hürden und verfolgt das wissenschaftlich-technische Ziel ein Laserpolierverfahren zu entwickeln, welches die schnelle und kosteneffiziente Bearbeitung von GJS-Legierungen erlaubt. Hierbei stellt neben dem Erreichen der geforderten Zielrauheit vor allem die Erzeugung einer fehlerfreien und „stahlähnlichen“ gehärteten Oberfläche eine besondere Herausforderung dar, um nach der Politur eine defektfreie Oberfläche mit kleiner Rauheit zu ermöglichen. Zur Lösung wurde ein ganzheitlicher Ansatz gewählt, der die Untersuchung des Zusammenspiels von Werkstoff (Zusammensetzung und Gefüge) und Laserpolierprozess (Prozessablauf und Parameteroptimierung) umfasst.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Das Zusammenspiel von Werkstoff (Zusammensetzung und Gefüge) und Laserpolierprozess (Prozessablauf und Parameteroptimierung) wurde untersucht und in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Zunächst wurden reale Industrieproben als Referenz untersucht, um bestehende Standards sowie die in Bauteilen auftretenden Gussgefüge zu erfassen und daraus ein praxisnahes Anforderungsprofil für das Laserpolieren von GJS-Werkzeugen abzuleiten. Hierfür wurden insgesamt 15 Proben von vier Unternehmen zur Verfügung gestellt. Die Laserpolierversuche an Flachproben wurden auf der „Granit“-Anlage durchgeführt (Abbildung 1).

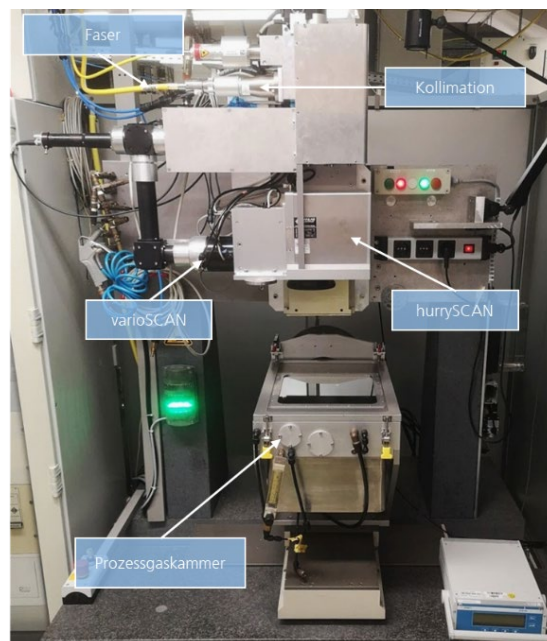


Abbildung 1: Granit-Anlage des ILTs

Als Strahlquelle kam ein kontinuierlicher Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1075–1080 nm und einer maximalen Leistung von 500 W zum Einsatz. Der Laserstrahl wurde über ein Lichtleitkabel eingekoppelt und mittels galvanometrischem Scanner über die Werkstückoberfläche geführt.

Die Bearbeitung erfolgte mit einem Laserstrahldurchmesser von $d_L = 500 \mu\text{m}$, einem Spurabstand von $d_y = 100 \mu\text{m}$ und einer Scangeschwindigkeit von $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$. CO_2 wurde als Schutzgas verwendet, wobei der Restsauerstoffgehalt im Bereich von 700 bis 1000 ppm gehalten wurde. Die Prozessparameter Laserleistung, Strahldurchmesser und Anzahl der Überfahrten wurden systematisch variiert, sodass pro Material 18 Testfelder erzeugt wurden. Die Bewertung erfolgte über Weißlichtinterferometrie zur Bestimmung der mittleren Flächenrauheit S_a sowie über metallographische Querschliffe zur Analyse der Umschmelztiefe. Für vier der fünf untersuchten Materialien konnte eine Rauheit von $S_a < 0,5 \mu\text{m}$ erzielt werden, wobei die umgeschmolzenen Randschichten frei von Rissen und weitgehend frei von Graphitpartikeln waren. Lediglich ein Material zeigte Rissbildung sowie erhöhte Rauheitswerte von $S_a > 1 \mu\text{m}$. Parallel dazu wurden die Referenzproben aus der Industrie hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung analysiert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der Einfluss der Graphitmorphologie auf die Randentkohlung und die Polierbarkeit untersucht. Hierzu wurden Proben aus EN-GJS-400-15 in drei unterschiedlichen Geometrien (YII, YIV und Zylinder) gegossen, die unterschiedliche Abkühlraten aufweisen (Abbildung 2).

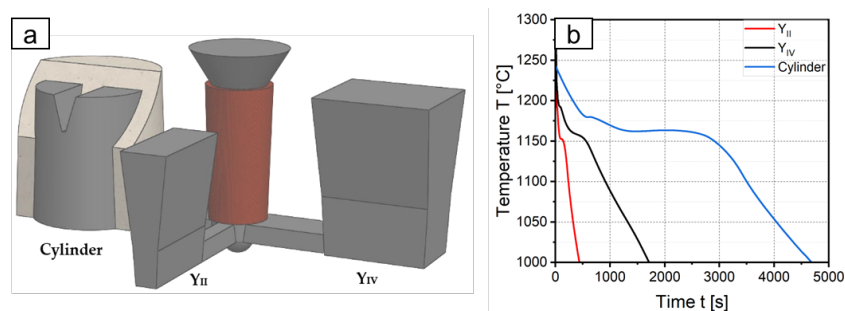


Abbildung 2: a: Schematische Darstellung der Gussgeometrien mit Anschnittsystem. b: Abkühlraten der Geometrien.

Die mikrostrukturelle Analyse zeigt, dass die Zylindergeometrie den höchsten Graphitgehalt (ca. 11,2 %) besitzt, während YII und YIV ähnliche Werte zwischen 9 % und 10 % aufweisen. Die Nodularität liegt für alle Geometrien im Bereich von 65 % bis 75 %, während sich die Kugelzahl insbesondere bei der YII-Geometrie deutlich erhöht (Abbildung 3).

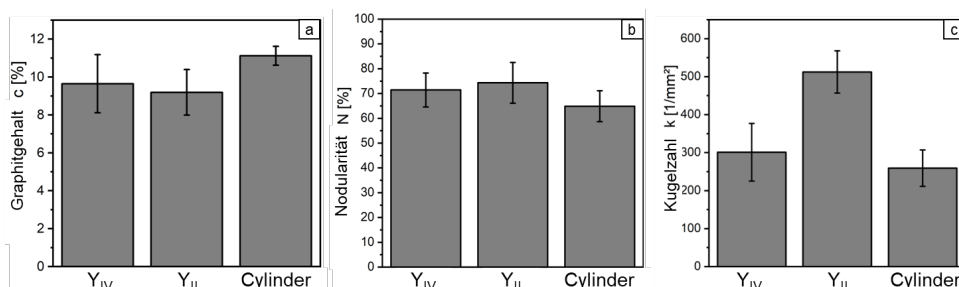


Abbildung 3: Mikrostrukturanalyse für die drei Geometrien. a: Graphitgehalt. b: Nodularität. c: Kugelzahl.

Nach der mechanischen Vorbearbeitung der Proben durch Sägen und Planfräsen (Abbildung 4) wurden verschiedene Konzepte zur Randentkohlung untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz von CO_2 als Schutzgas bei einem Restsauerstoffgehalt

von ≤ 2000 ppm entscheidend für eine defektfreie Laserpolitur ist, während Zwischenschritte mit gepulster Laserstrahlung keinen signifikanten Einfluss auf die Rauheit zeigen.

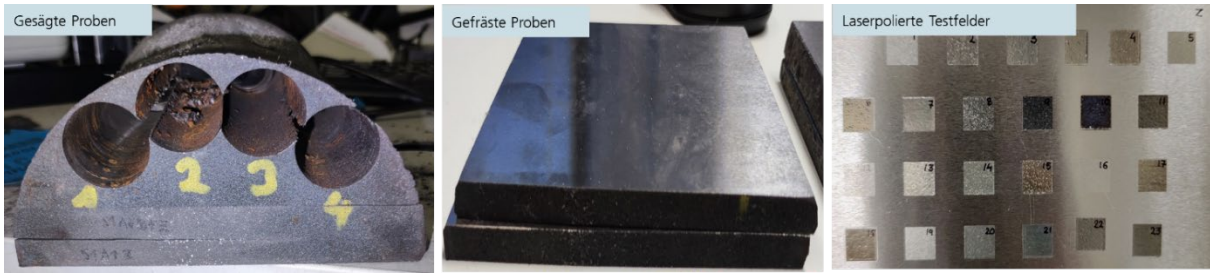


Abbildung 4: Gussproben nach jedem Präparationsschritt

Im nächsten Schritt wurde die Wechselwirkung zwischen Graphitmorphologie und Laserpolieren analysiert. Hierbei wurden Laserleistung und Anzahl der Überfahrten systematisch variiert. Es zeigt sich, dass bei einer einzelnen Überfahrt die Rauheit mit steigender Laserleistung zunimmt, während bei vier Überfahrten für alle Geometrien Rauheitswerte von $Sa < 1 \mu\text{m}$ erreicht werden (Abbildung 5). Die geringere Rauheit ist darauf zurückzuführen, dass nach mehreren Überfahrten keine Graphitpartikel mehr auf der Oberfläche vorhanden sind (Abbildung 6).

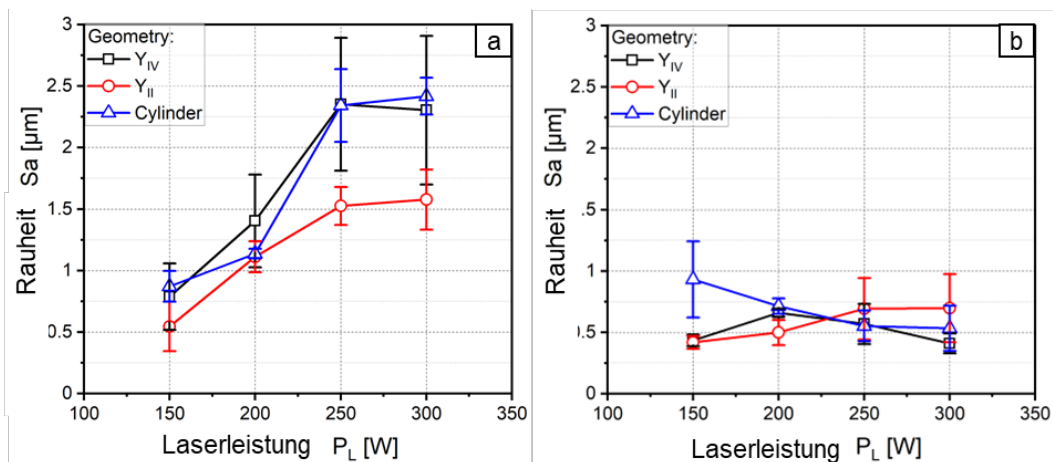


Abbildung 5: Rauheit als Funktion der Laserleistung für laserpolierte Testfelder auf den drei untersuchten Geometrien. a: Anzahl der Überfahrten $n = 1$. b: Anzahl der Überfahrten $n = 4$. Mit $dL = 500 \mu\text{m}$, $vscan = 50 \text{ mm/s}$, $dy = 100 \mu\text{m}$.

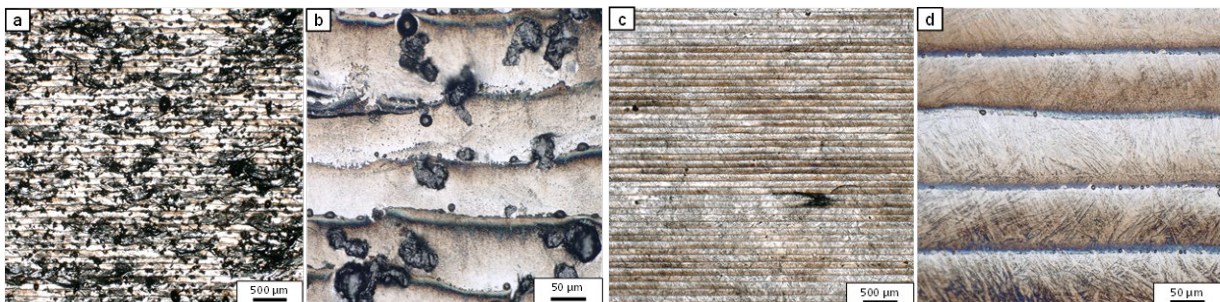


Abbildung 6: Lichtmikroskopische Aufnahmen von laserpolierten Testfeldern auf einer Probe der Y_{IV}-Geometrie. a, b: Anzahl der Überfahrten $n = 1$. c, d: Anzahl der Überfahrten $n = 4$. Mit $PL = 300 \text{ W}$, $dL = 500 \mu\text{m}$, $vscan = 50 \text{ mm/s}$, $dy = 100 \mu\text{m}$.

Die Umschmelztiefe steigt mit zunehmender Laserleistung und zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geometrien (Abbildung 7). Die mikrostrukturelle Analyse zeigt die Ausbildung einer austenitischen Randschicht mit

einer martensitischen Übergangszone, wobei die umgeschmolzene Schicht weitgehend frei von Graphit ist (Abbildung 8).

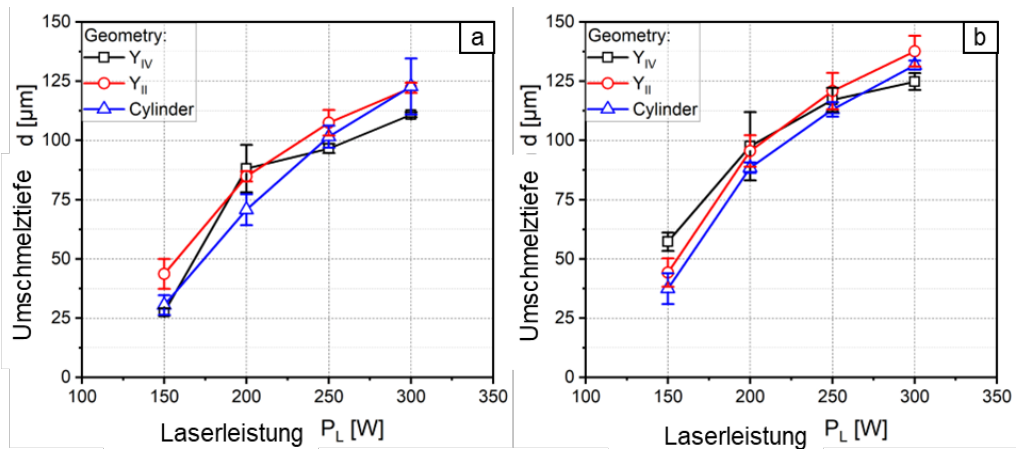


Abbildung 5: Umschmelztiefe als Funktion der Laserleistung für laserpolierte Testfelder auf den drei untersuchten Geometrien. a: Anzahl der Überfahrten $n = 1$. b: Anzahl der Überfahrten $n = 4$. Mit $d_L = 500 \mu\text{m}$, $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$, $dy = 100 \mu\text{m}$.

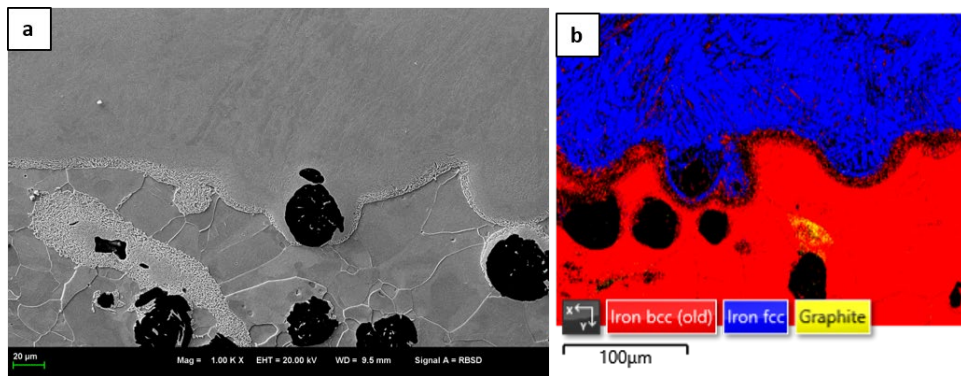


Abbildung 8: a: REM-Bild b: EBSD-Analyse. Beschleunigungsspannung: 20.00 kV, Probenkipfung (Grad): 70.00 °, Trefferquote: 80.31 %, Aufnahmegeschwindigkeit: 12.02 Hz.

Darauf aufbauend wurde der Einfluss von Legierungselementen auf die Rissbildung untersucht. Ein besonderer Fokus lag auf dem Siliziumgehalt, da dieser in allen GJS-Legierungen enthalten ist. Proben mit hohem Siliziumgehalt zeigen nach dem Laserpolieren Rissbildung sowie verbleibende Graphitpartikel in der Umschmelzschicht (Abbildung 9 und Abbildung 10).

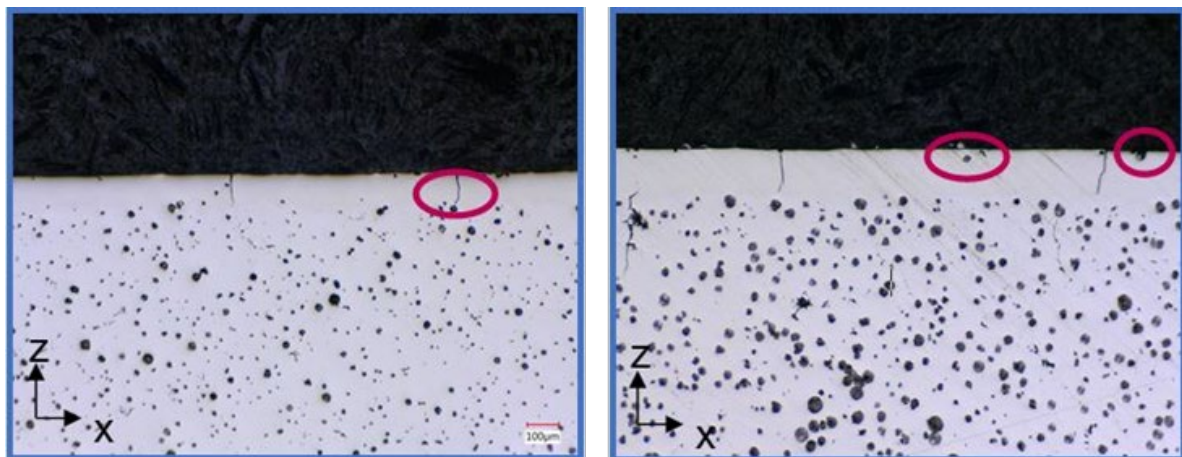


Abbildung 9 links: Hoch Si., Laserleistung $PL = 200 \text{ W}$, $n=1$; rechts: Hoch Si., Laserleistung $PL = 300 \text{ W}$, $n=1$

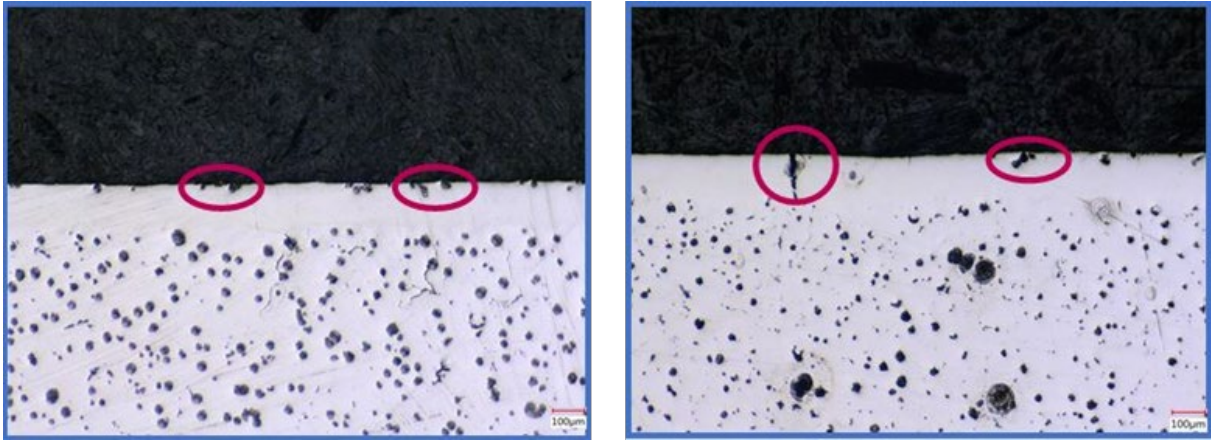


Abbildung 6 links Hoch Si., Laserleistung PL = 300 W, n=2; rechts: Hoch Si., Laserleistung PL = 300 W, n=4

Im Gegensatz dazu treten bei mittleren und niedrigen Siliziumgehalten keine Risse auf (Abbildung 11), sodass der Siliziumgehalt als kritischer Parameter identifiziert wird und $\leq 3,5$ wt% betragen sollte.

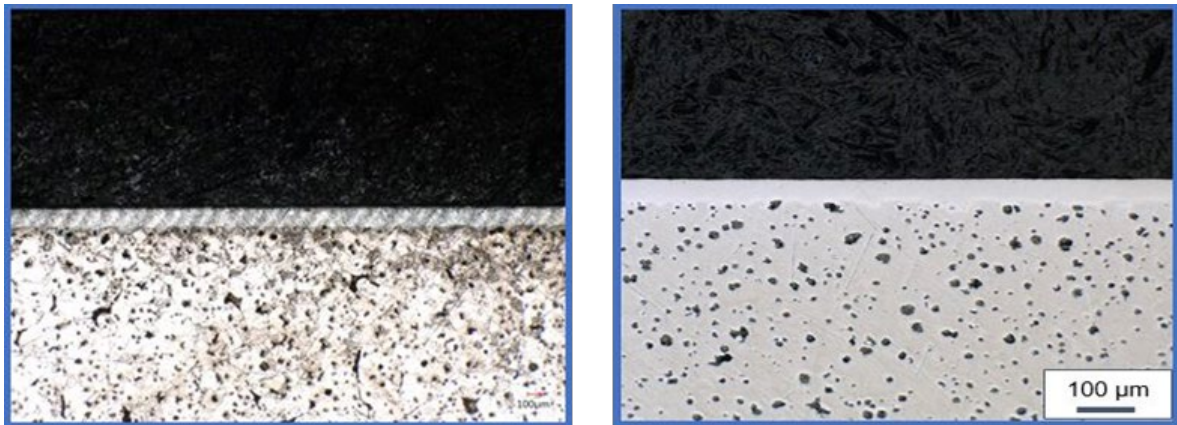


Abbildung 7 links: Mittlerer Si-Gehalt, Laserleistung PL = 300 W, n=4; rechts: 8Niedriger Si., Laserleistung PL = 300 W, n=4

Zusätzlich wurden typische Perlitbildner wie Cu, Mn, Sn, Ni und Mo untersucht. Dabei zeigen Cu- und Sn-legierte Werkstoffe eine vollständig perlitischer Mikrostruktur, während Ni- und Mo-legierte Werkstoffe nur teilweise perlitischer sind. Cu führt zu hoher Festigkeit bei moderater Duktilität, während Sn aufgrund von Segregationseffekten eine geringere Duktilität aufweist. Ni und Mo reduzieren die Festigkeit, erhöhen jedoch die Duktilität durch Stabilisierung der ferritischen Matrix. Mn wirkt als Perlitstabilisator und erhöht mit steigendem Gehalt sowohl den Perlitanteil als auch die Festigkeit, während die Dehnung abnimmt. Weiterhin wurden Karbidbildner untersucht. Die Zugabe von Cr führt zur Bildung von Karbiden, die die Festigkeit erhöhen, jedoch die Duktilität reduzieren (Abbildung 12). Im Gegensatz dazu führt Ti zur Bildung von TiC, wodurch die Graphitmorphologie verschlechtert und eine ferritische Matrix ausgebildet wird, was zu geringerer Festigkeit bei erhöhter Dehnung führt (Abbildung 13).

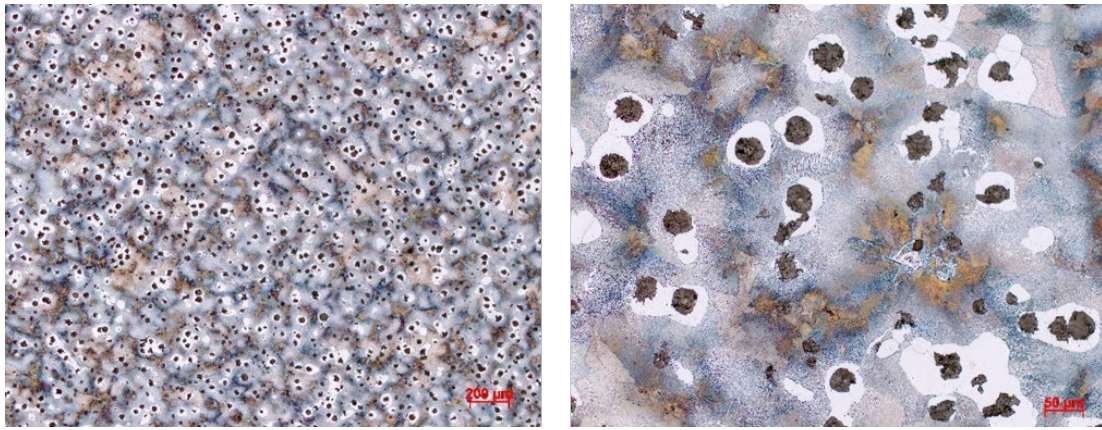


Abbildung 12: Mikrostruktur nach dem Ätzen (Cr-Zusatz in Geometrie YIV)

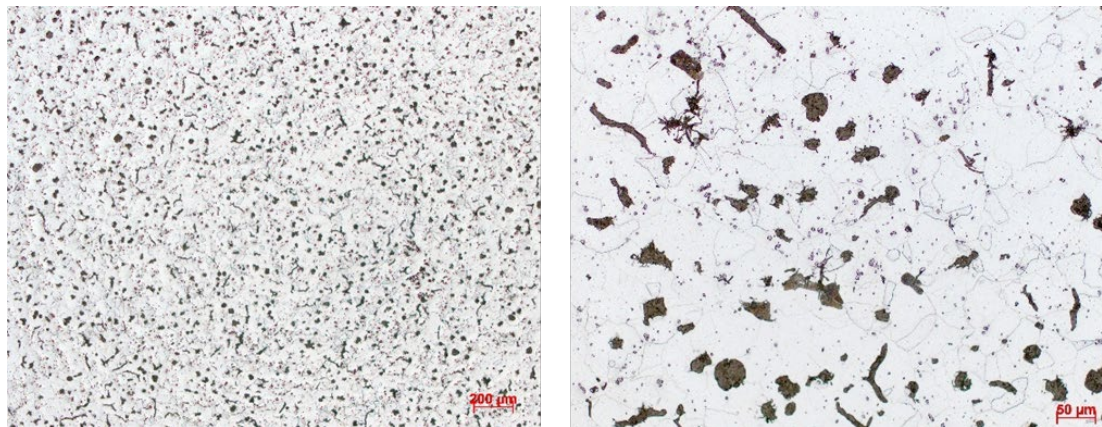


Abbildung 13: Mikrostruktur nach dem Ätzen (Ti-Zusatz in Geometrie YIV)

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde der Einfluss der Legierungselemente auf die Laserpolierbarkeit systematisch untersucht. Für Materialien mit niedrigem und mittlerem Siliziumgehalt werden Rauheitswerte von etwa $Sa \approx 0,5 \mu\text{m}$ erreicht, während bei hohem Siliziumgehalt deutlich höhere Rauheiten ($Sa > 1,5 \mu\text{m}$) auftreten, bedingt durch Rissbildung und verbleibende Graphitpartikel (Abbildung 14 und Abbildung 15).

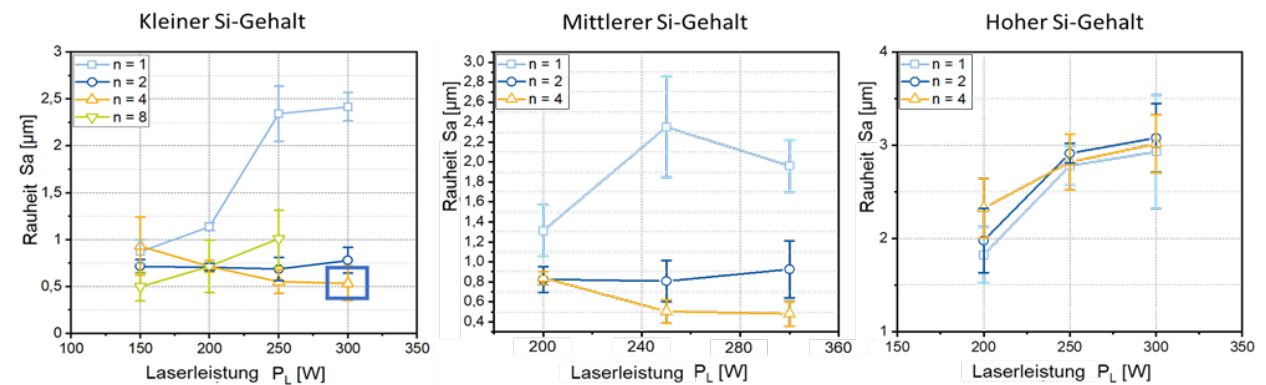


Abbildung 14: Rauheit als Funktion der Laserleistung für laserpolierte Testfelder auf den drei untersuchten Materialien. Mit $d_L = 500 \mu\text{m}$, $v_{scan} = 50 \text{ mm/s}$

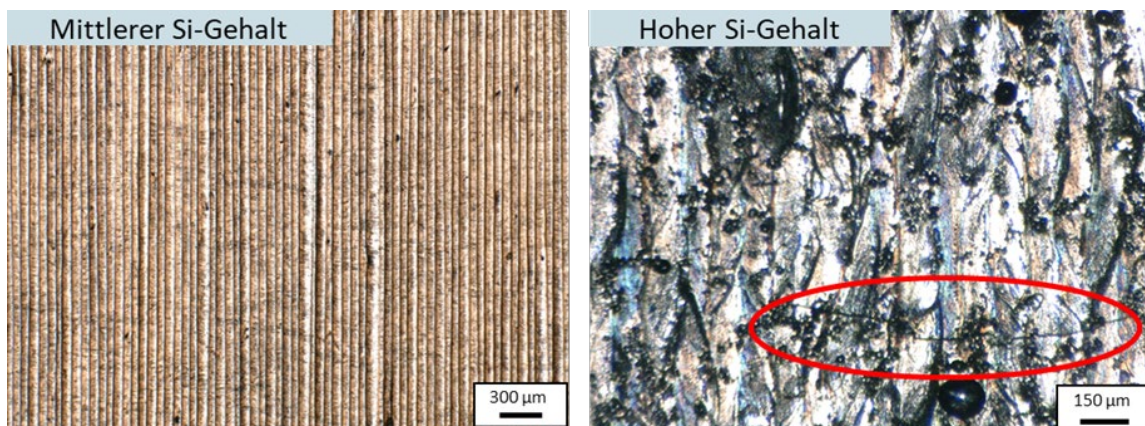


Abbildung 15: Lichtmikroskopische Aufnahmen von laserpolierten Testfeldern auf Proben mit mittlerem und hohem Si-Gehalt mit $n = 4$, $P_L = 300 \text{ W}$, $d_L = 500 \mu\text{m}$, $v_{scan} = 50 \text{ mm/s}$, $dy = 100 \mu\text{m}$.

Die Analyse verschiedener Legierungskonzepte zeigt, dass die erreichbare Rauheit sowie das Auftreten von Defekten stark von der chemischen Zusammensetzung abhängen. Ti-legierte Proben weisen aufgrund stabiler TiC-Partikel und gestörter Graphitmorphologie eine deutlich erhöhte Rauheit auf, während Cr-legierte Proben trotz Karbidbildung gute Oberflächenqualitäten erreichen (Abbildung 16). Für Mo-legierte Proben treten teilweise Graphitreste und Risse auf, wobei die Rauheit bei geeigneten Parametern reduziert werden kann.

Feld Nr.	P_L [W]	n	Rauheit Sa [μm]
Ausgangszustand	-	-	1.722
4	200	1	1.582
8	200	2	1.788
12	200	4	1.251

Feld Nr.	P_L [W]	n	Rauheit Sa [μm]
Ausgangszustand	-	-	1.178
7	150	2	0.661
11	150	4	0.623
4	200	1	0.888
8	200	2	0.565
12	200	4	0.405

Abbildung 16: Rauheitswerte [μm] für ausgewählte Testflächen.
links: mit Ti-Zusatz; rechts: mit Cr-Zusatz

Es zeigt sich weiterhin, dass eine Laserleistung von 200 W in Kombination mit vier Überfahrten die besten Ergebnisse liefert, da mit steigender Energiedichte die Anzahl der Graphitkugeln auf der Oberfläche reduziert wird (Abbildung 17).

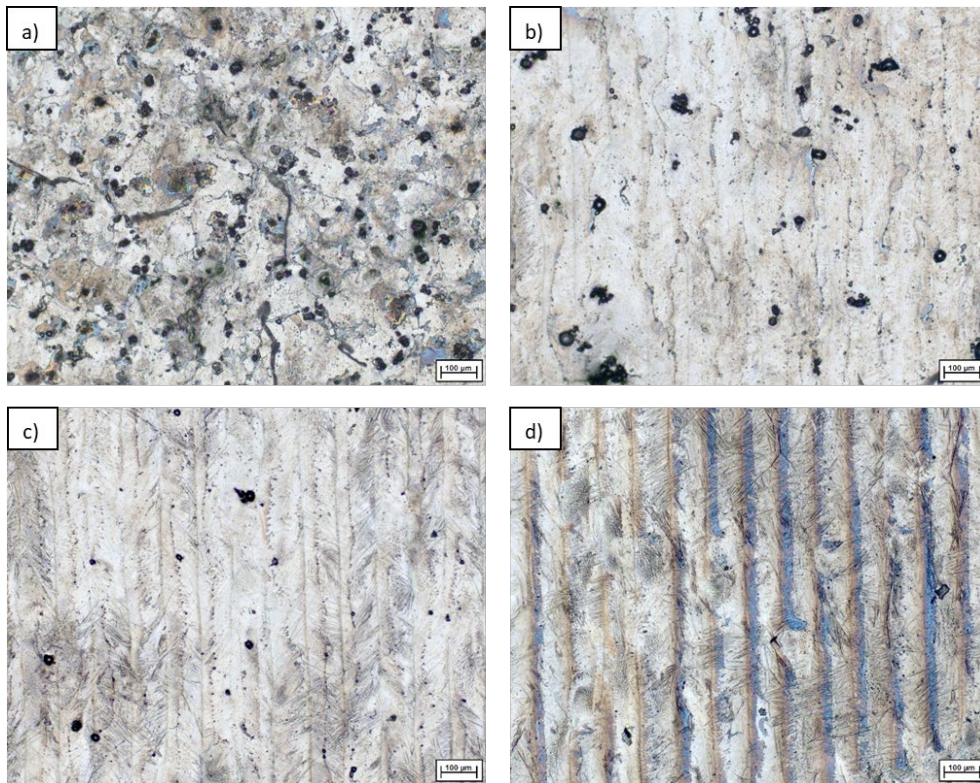


Abbildung 17: Oberflächenstruktur der laserpolierten Proben der Cu-legierten Legierung unter dem optischen Mikroskop bei a) 100 W, b) 125 W, c) 150 W und d) 200 W Laserenergiedichte, jeweils bei 4 Durchgängen des Laserprozesses.

Die metallographischen Untersuchungen zeigen, dass sich nach dem Laserpolieren drei charakteristische Zonen ausbilden: eine aufgeschmolzene, austenitische und graphitfreie Oberflächenschicht, darunter eine wärmebeeinflusste Zone mit martensitischer Mikrostruktur sowie das unveränderte Substrat (Abbildung 18). Die Dicke der aufgeschmolzenen Zone und der HAZ hängt dabei von den Legierungselementen ab. Cu und Sn fördern eine größere Umschmelztiefe, während Ni die Schichtdicke reduziert. Mo führt zu einer inhomogenen Martensitverteilung, Mn beeinflusst die Härtebarkeit und damit die Ausbildung der HAZ, während Cr eine dichte martensitische Struktur erzeugt. Ti hingegen unterdrückt Phasenumwandlungen in der HAZ aufgrund der starken Karbidbildung.

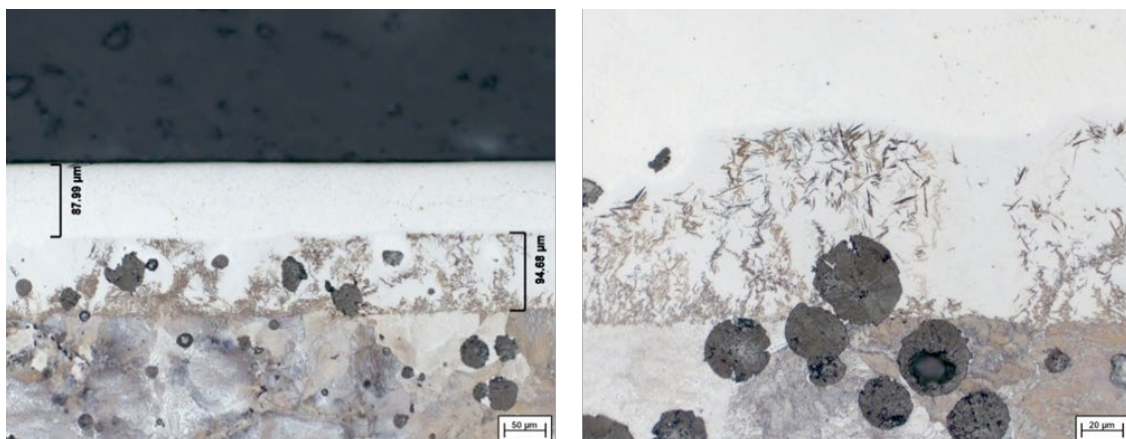


Abbildung 18: Querschnittsmetallographie der Cu-legierten Probe

Die erzielte Oberflächenrauheit nach vier Überfahrten bei 200 W liegt für die meisten Legierungen im Bereich von 0,39 bis 0,56 μm . Die besten Ergebnisse werden für Ni- und Mn-legierte Werkstoffe erzielt (ca. 0,39–0,40 μm), während Cu- und Sn-legierte Werkstoffe leicht höhere Rauheiten aufweisen. Mo zeigt moderate Werte, während Ti aufgrund der beschriebenen Effekte eine deutlich erhöhte Rauheit von etwa 1,25 μm aufweist. Insgesamt wird deutlich, dass die Legierungselemente über ihren Einfluss auf Schmelzbadstabilität, Wärmeleitung und Phasenumwandlungen die Laserpolierbarkeit maßgeblich bestimmen.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Laserpolierbarkeit von GJS-Werkstoffen systematisch untersucht, wobei sowohl industrielle Referenzproben als auch gezielt hergestellte Modelllegierungen betrachtet wurden. Ziel war es, den Einfluss von Graphitmorphologie, Legierungszusammensetzung und Prozessparametern auf die erreichbare Oberflächenqualität sowie die Defektbildung zu bestimmen.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine CO₂-basierte Schutzgasatmosphäre mit niedrigem Restsauerstoffgehalt eine effektive Randentkohlung ermöglicht und somit eine wesentliche Voraussetzung für eine defektfreie Laserpolitur darstellt. Mehrfache Überfahrten des Laserstrahls sind entscheidend, um oberflächennahe Graphitpartikel zu entfernen und die Rauheit signifikant zu reduzieren. Dabei führt eine Erhöhung der Laserleistung und der Anzahl der Überfahrten zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität, wobei optimale Ergebnisse bei einer Laserleistung von etwa 200 W und mehreren Durchgängen erzielt werden.

Ein zentraler Einflussfaktor ist die Graphitmorphologie, die durch die Abkühlbedingungen während des Gießprozesses bestimmt wird. Unterschiede in Kugelzahl und Graphitverteilung wirken sich direkt auf die Polierbarkeit aus, insbesondere durch die Persistenz von Graphitpartikeln in der umgeschmolzenen Randschicht. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der Siliziumgehalt eine kritische Rolle spielt. Hohe Si-Gehalte führen zu Rissbildung und erhöhter Rauheit, während bei Si-Gehalten $\leq 3,5$ wt% eine weitgehend defektfreie Politur möglich ist. Neben Silizium beeinflussen weitere Legierungselemente die Laserpolierbarkeit maßgeblich. Perlitbildner wie Cu und Sn erhöhen die Festigkeit, führen jedoch zu unterschiedlichen Duktilitätsverhalten, während Ni und Mo die Duktilität verbessern, jedoch die Festigkeit reduzieren. Mn wirkt als Perlitstabilisator und beeinflusst sowohl Mikrostruktur als auch Härtebarkeit. Karbidbildner zeigen hingegen ein deutlich differenziertes Verhalten: Cr führt zur Bildung harter, spröder Mikrostrukturen mit erhöhter Festigkeit, während Ti durch extensive TiC-Bildung die Graphitmorphologie verschlechtert und die Polierbarkeit stark beeinträchtigt.

Die Laserbearbeitung bewirkt eine charakteristische Schichtstruktur aus einer austenitischen, graphitfreien Umschmelzzone, einer martensitisch geprägten Wärmeeinflusszone und dem unveränderten Substrat. Die Dicke und Ausprägung dieser Zonen werden wesentlich durch die Legierungszusammensetzung bestimmt, insbesondere durch deren Einfluss auf Wärmeleitung, Schmelzverhalten und Phasenumwandlungskinetik.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Laserpolierbarkeit von GJS-Werkstoffen nicht allein durch die Prozessparameter bestimmt wird, sondern maßgeblich durch die Wechselwirkung zwischen Legierungszusammensetzung, Graphitmorphologie und thermophysikalischen Eigenschaften. Eine gezielte Anpassung des Siliziumgehalts sowie geeignete Legierungskonzepte, insbesondere unter Vermeidung ungünstiger Karbidbildner wie Ti, ermöglichen eine signifikante Verbesserung der Oberflächenqualität und die Herstellung nahezu defektfreier Randschichten.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr. Edgar Willenborg unter 0241-8906.213.