



Surface Engineering

Ressourceneffizienz für die
Fertigung von Morgen

Leitfaden zur Ressourceneffizienz in der Produktion



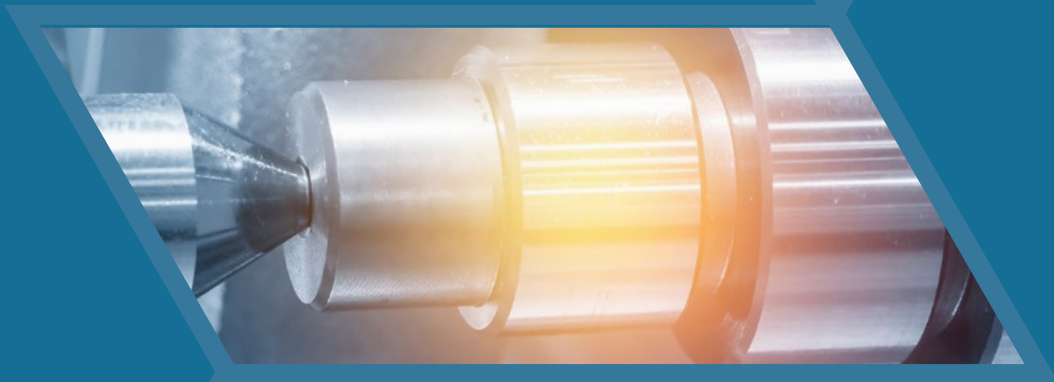
Gefördert durch:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Vorwort



Das produzierende Gewerbe bildet mit etwa einem Drittel des Bruttoinlandsprodukts Baden-Württembergs eine wesentliche Basis unseres Erfolges und Wohlstandes.

Damit stehen wir weltweit an der Spitze. Gleichzeitig muss sich unsere Industrie den großen Herausforderungen der Gesellschaft wie Klimaschutz, schonenden Umgang mit den Ressourcen und nicht zuletzt dem sich verschärfenden globalen Wettbewerb stellen. Ressourceneffiziente, umweltfreundliche und nachhaltige Prozesse und Produkte verschaffen der Industrie wesentliche Vorteile im globalen Wettbewerb und stärken langfristig ihre Marktposition. Wie die aktuelle OECD-Studie zeigt, belegt Deutschland weiterhin Spitzenplätze bei Innovationen und stabilen Rahmenbedingungen.

Um diese auch zukünftig zu sichern, hat die Landesregierung Baden-Württemberg zahlreiche Maßnahmen initiiert. Hierzu gehört der gemeinsam von Land und Industrie gegründete THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategie, in dessen Rahmen diese Broschüre entstanden ist. Der THINKTANK berät Politik und Industrie auf wissenschaftlicher Basis in den zentralen technologisch-strategischen Fragen zur Ressourceneffizienz, Ressourcennutzung und Ressourcenpolitik.

Da gerade die kleinen und mittleren Unternehmen wesentlich zum Erfolg der baden-württembergischen Industrie beitragen, richtet sich die Broschüre besonders an sie. Ein schneller Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die Industrie erhält unsere hohe Innovationsfähigkeit.

Eine zukünftige Produktion in einem hochindustrialisierten und zugleich dichtbesiedelten Gebiet wie Baden-Württemberg kann gesellschaftlich verträglich nur auf technisch höchstem Niveau effizient und effektiv produzieren, dabei die Umweltbelastung minimieren oder vermeiden und Zielkonflikte lösen. Dies hat die Landesregierung mit dem Leitbild einer ultraeffizienten Produktion im urbanen Umfeld – kurz Ultraeffizienzfabrik – zusammengefasst. Hierzu wurde beschlossen, ein Zentrum für Ultraeffizienzfabriken zu gründen. Einer der ersten Demonstratoren des Zentrums soll die in dieser Broschüre beschriebene Technologie des „Surface Engineerings“ sein. Hocheffiziente, ressourcenschonende und klimafreundliche Verfahren und Technologien sollen in dem Zentrum erprobt und vorgestellt werden. In Verbindung mit neuesten Entwicklungen der Digitalisierung werden die Demonstratoren des Zentrums zum Teil aus realen Maschinen und zum Teil aus ihren digitalen Abbildern bestehen, um so den dynamischen Technikentwicklungen Rechnung zu tragen und dem Anspruch der Ultraeffizienz zu genügen.



Christian Kühne

Geschäftsführer
THINKTANK Industrielle Ressourceneffizienz
am Karlsruher Institut für Technologie



Volker Schulze

Institutsleiter
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie

Inhalt

06 Einleitung

08 Surface Engineering.
Was ist das?

18 Angewandtes
Surface Engineering

20 Einlaufverhalten
von Lagerflächen
durch optimierte
Zerspanungsprozesse

22 Texturierung
durch Zerspa-
nungsprozesse

24 Texturierung mittels
Laserablation und
Stream Finishing

36 Zusammenfassung
und Ausblick

10 Surface Engineering.
Was bringt das?

14 Surface Engineering.
Wie geht das?

28
Kugelstrahlen
und
Warmstrahlen

30
Festwalzen
und kryogenes
Festwalzen

32
Drehwalzen

34
Komplementär-
zerspanung

38 Literaturangaben

42 Kontakt und
Impressum

Einleitung

The background features several thick, light blue geometric lines that create a sense of depth and structure. These lines form a series of interconnected shapes, including triangles and trapezoids, that appear to recede into the distance, creating a 3D effect against the solid blue background.

Die Herstellung metallischer Bauteile ist seit jeher ein besonders ressourcenintensiver Prozess.

In der Vergangenheit wurden die Optimierungspotentiale der Fertigungsprozesse bereits häufig untersucht und insbesondere hinsichtlich Ihres Energieeinsparpotentials weiterentwickelt (VDI ZRE 2013). Die Realisierung der Ressourceneffizienz durch den Einsatz innovativer Fertigungsverfahren zur Herstellung von Produkten mit optimierten Eigenschaften bietet in diesem Kontext eine neue, bisher nicht betrachtete Sichtweise, mit der nicht nur die Energie, sondern auch der Ressourceneinsatz und der ökologische Fußabdruck eines Produktes reduziert werden kann.

Durch den Einsatz innovativer Fertigungsprozesse zur Optimierung der Randschicht lassen sich Bauteileigenschaften, wie die Wechselfestigkeit, die Korrosionsbeständigkeit und die tribologischen Eigenschaften, optimieren. Das Resultat ist eine Erhöhung der Lebensdauer des Bauteils. Gleichzeitig können die optimierten Bauteileigenschaften auch dazu genutzt werden, die Bauteile bei gleicher Leistungsfähigkeit kleiner auszulegen. Hieraus resultieren nicht nur signifikante Gewichtseinsparungen, sondern auch umfangreiche neue konstruktive Möglichkeiten in der Produktentwicklung. Da nicht alle erzielbaren Bauteiloptimierungen unmittelbar auf andere Bauteile und Materialien übertragbar sind, wird die spezifische Expertise der ferti-

gungstechnischen Forschungseinrichtungen Baden-Württembergs in diesem Bereich in Zukunft von steigender Bedeutung sein.

Eine weitere Effizienzsteigerung wird durch innovative Kombinationsprozesse zur Verkürzung der Prozessketten und Reduzierung des Roh- und Hilfsstoffbedarfs in der Fertigung erreicht. Diese Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass mehrere Schritte einer Prozesskette in einem Prozessschritt vereint werden.

Nur durch die kombinierte Betrachtung optimierter Bauteile und innovativer Fertigungsprozesse lässt sich das volle Potential dieser neuen Technologien erfahren. Entgegen der üblichen Annahme, dass sich Ökologie und Ökonomie gegenseitig ausschließen, zeigen die aktuellen Entwicklungen in der Fertigungstechnik das Gegenteil. Die Wirtschaftlichkeit in der industriellen Produktion und die Reduzierung des Ressourceneinsatzes sowie die Vermeidung von Produktionsabfällen lässt sich, wie dieser Leitfaden zeigen soll, durchaus kombinieren und zu einer Win-Win-Situation hinsichtlich Ökologie und Ökonomie entwickeln.

Der Weg, dieses Ressourceneffizienzpotential zu nutzen, hat einen Namen: Surface Engineering.



Surface Engineering.

Was ist
das?

Surface Engineering ist die Auslegung und über Fertigungsprozesse realisierte Einstellung von Randschichtzuständen, wie bspw. der Topographie.

Wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, bedingen diese Bauteilzustände letztlich die Bauteileigenschaften, wie die Wechselfestigkeit, die tribologischen Eigenschaften oder die Korrosionsbeständigkeit. Eine Optimierung von Bauteileigenschaften ist somit indirekt über die Führung einzelner Prozesse oder die Anpassung der Fertigungsprozesskette möglich.

Die Einstellung von Bauteileigenschaften ist heutzutage nicht mehr nur Instrument der wettbewerbsführenden Unternehmen, sondern auch eine Methode zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Eine Erhöhung der Schwingfestigkeit führt entweder zu langlebigeren Produkten oder ermöglicht durch parallel erhöhte Belastbarkeit das Downsizing von Komponenten. Daraus möglicherweise resultierender Leichtbau reduziert nicht nur den erforderlichen Materialeinsatz, sondern kann auch durch die Massenreduktion von schwingenden oder rotierenden Bautei-

len den Materialeinsatz und die Energieeffizienz von (weiteren) Baugruppen entscheidend verbessern.

Die Anwendung des Surface Engineering kann je nach Strategie bereits während der Fertigung Ressourcen schonen oder aber Zusatzaufwände benötigen. Daher ist es im Kontext der Ressourceneffizienz von zentraler Bedeutung, je nach Einsatzbedingungen der zu optimierenden Bauteile etwaige Zusatzaufwände gegenüber dem Einsparpotential über die Bauteillebensdauer abzuwägen. Dabei ist grundsätzlich der verwendete Werkstoff von größter Bedeutung, da er die Möglichkeiten und Grenzen der Bearbeitbarkeit festlegt sowie die lokal und global erreichbaren Bauteileigenschaften bestimmt. Der Einsatz von Werkstoffen, Hilfsstoffen und Werkzeugen sowie die insgesamt aufgewendete Fertigungszeit und der vollständige Energieeinsatz sollten dazu auf die Prozesskette und die Bauteillebensdauer bezogen werden.

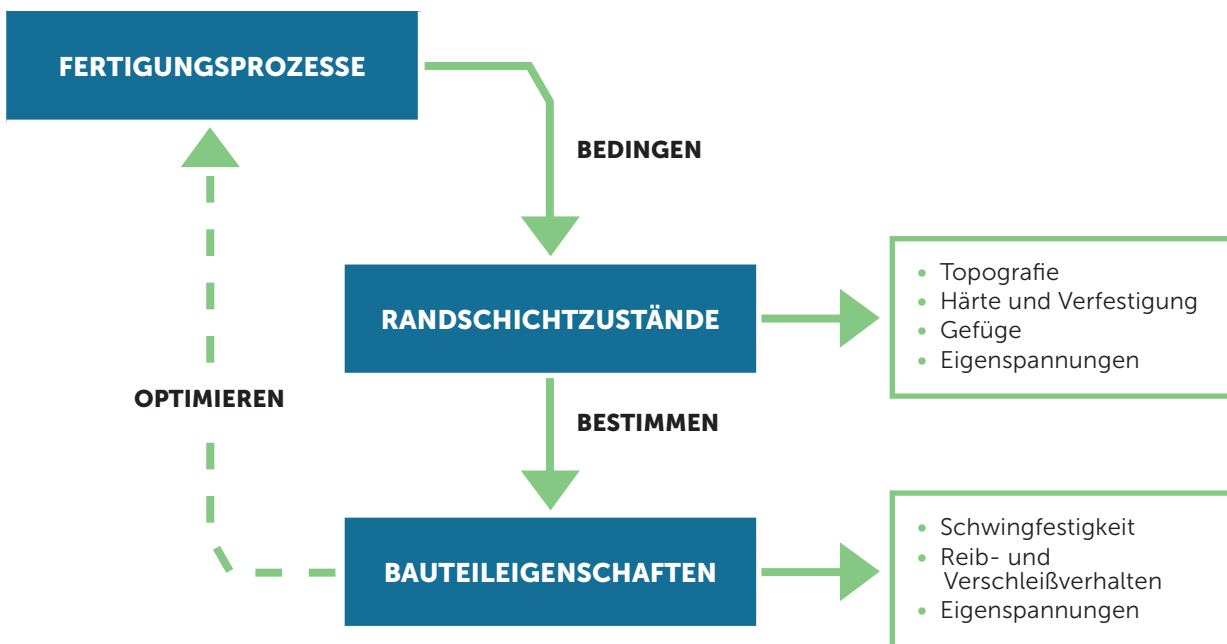


Abb. 1: Surface Engineering in der Fertigung, schematische Darstellung.

Surface Engineering.

Was bringt
das?

Je nach verwendetem Werkstoff und Fertigungsprozess ergeben sich größtenteils bekannte Zusammenhänge zwischen metallphysikalischen Mechanismen und Bauteileigenschaften wie der Schwingfestigkeit, dem Reib- und Verschleißverhalten und der Korrosionsbeständigkeit.

Die **Schwingfestigkeit** eines Bauteils zu verbessern, ist eines der Hauptanwendungsfelder des Surface Engineering. Zum einen lassen sich durch die Glättung der Topographie Stellen mit hoher Kerbwirkung vermeiden, zum anderen kann das Einbringen von Druckeigenstress, Verfestigung durch Kaltverformung und eine mit Verformung einhergehende Feinkornbildung das Versagen zeitlich zu höheren Lastspielzahlen und örtlich in das Bauteilinnere verschieben (vgl. Abbildung 2). Eine korrekte Auslegung und Einstellung der Randschichtzustände bietet im Hinblick auf die Schwingfestigkeit auch das Potential bei gleicher Anwendung auf ressourcenschonender bearbeitbare Werkstoffe zu wechseln. Zudem lassen sich je nach Anwendung Lebensdauern erhöhen, oder Dimensionen verkleinern, um langfristig ressourceneffizient zu arbeiten.

Das **Reib- und Verschleißverhalten** von Kontaktflächen ist nicht nur eine Funktion aus Last und Relativbewegung, sondern auch abhängig von den Randschichtzuständen Topographie, Härte und Verfestigung sowie des Gefüges. Die Kombination aus den Topographien, die sich im Kontakt befinden, bestimmt die tatsächliche Kontaktfläche und dadurch die tatsächlichen Kontaktdrücke. Die Härte und Verfestigung definiert die maximalen Reibspannungen, die die Kontaktpunkte ertragen können, ohne zu versagen. Das Gefüge ist gleichzeitig ein das Reib- und Verschleißverhalten beeinflussender Faktor und auch einer kontaktbedingten Evolution ausgesetzt. Die Wirksamkeit von Eigenspannungen im Kontext des Reib- und Verschleißverhaltens ist nicht abschließend geklärt, wobei eine plausible Haltung ist, dass Eigenspannungen dann effektiv sind, wenn sie die Kontaktspannungen reduzieren. So sind Eigenspannungen, insbesondere bei glatten Oberflächen mit entsprechend großen Kontaktflächen, von Vorteil.

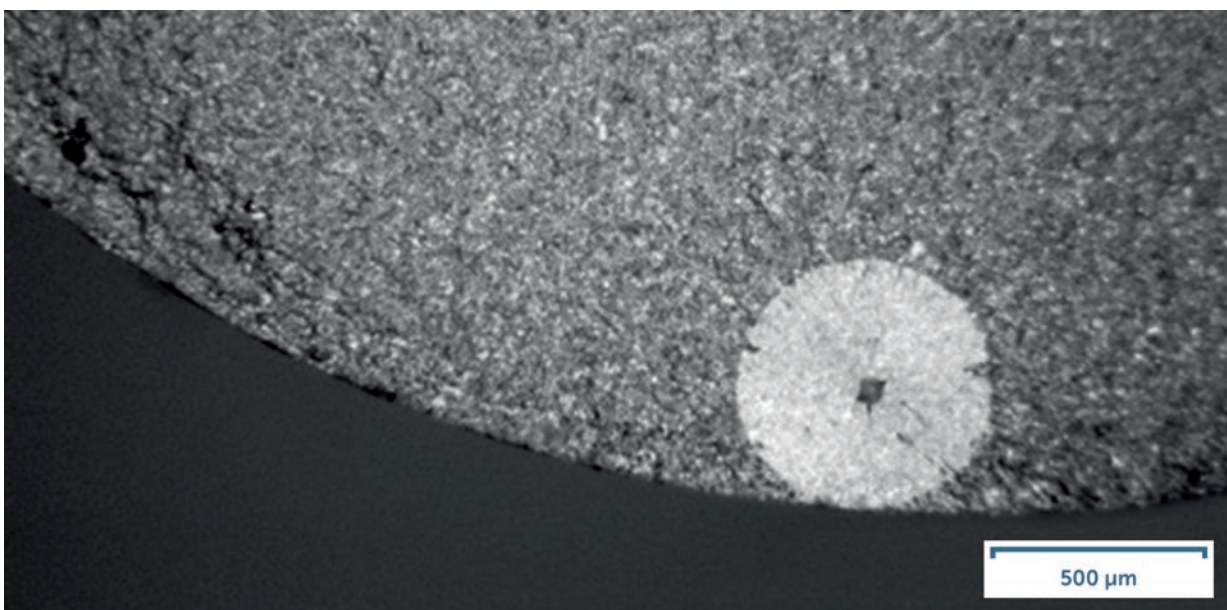


Abb. 2: Makroskopische Aufnahme der Bruchfläche einer auf Schwingfestigkeit geprüften, gebrochenen Probe (Lienert 2017).



Bild: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

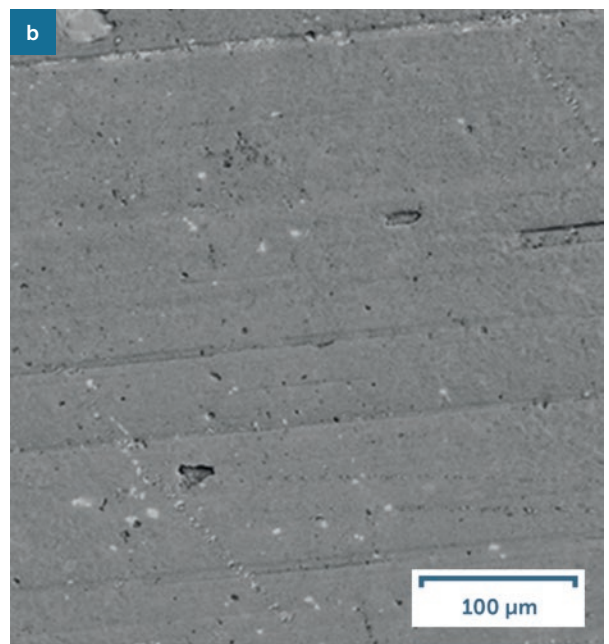
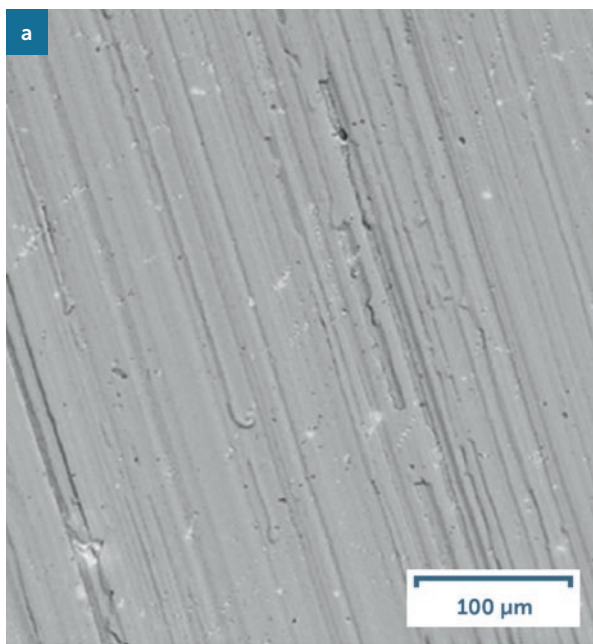


Abb. 3: Verschleiß an einer metallischen Oberfläche (a) vor und (b) nach der Nutzung (Gonçalves, Mello & Costa 2019).



Die **Korrosionsbeständigkeit** von Bauteilen ist in vielen Anwendungsgebieten eine kritische Größe. Es ist bekannt, dass die Korrosionsbeständigkeit von Oberflächen maßgeblich von den Randschichtzuständen Topographie, Härte und Verfestigung aber auch den vorliegenden Eigenspannungen beeinflusst wird. Neben dem Glätten der Topographie führen hohe Härte und Verfestigung sowie Druckeigenspannungen in

der Regel zu einer Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit. Weiterhin kann ein bestimmtes Gefüge von Vorteil sein. Ob dieses fein- oder grobkörnig ist, und welche Phasen von Vorteil sind, hängt stark vom verwendeten Werkstoff und dem Belastungskollektiv ab. Einen umfassenden Überblick über Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet haben Ralston & Birbilis (2010) angefertigt.

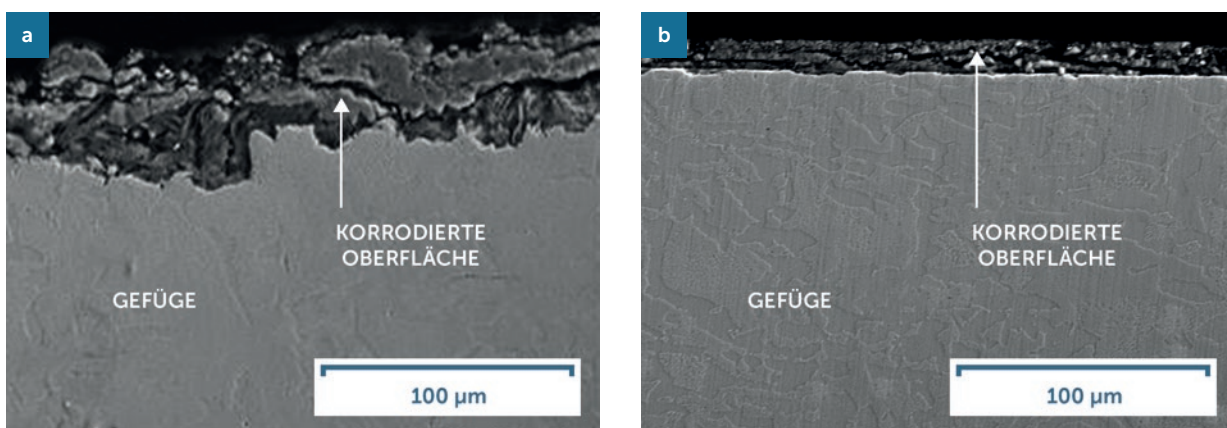


Abb. 4: SEM Aufnahmen des Querschnitts korrodierter Proben mit (a) unbehauelter Oberfläche und (b) ultrasonic surface rolling processing (USRP) behandelte Oberfläche (Wang et al. 2017).

Surface Engineering.

Wie geht
das?

Jeder Fertigungsprozess beeinflusst infolge wirkender thermomechanischer Belastungen die Bauteilrandschicht.

So induziert im Fall einer mechanischen Bearbeitung von metallischen Bauteilen eine elastisch-plastische Verformung die randschichtnahen Bauteilzustände **Topographie, Härte und Verfestigung, Gefüge** sowie **Eigenstressungen**. Jedwede Auswirkung dieser Randschichtnahen Bauteilzustände ist nur so lange wirksam, wie sich der Zustand im Gebrauch nicht nachteilig verändert. Die Stabilität von Bauteilzuständen muss also für effektives Surface Engineering berücksichtigt werden.

Auch nichtmetallische Werkstoffe können von Surface Engineering profitieren. Hier ist vor allem die Topographie von Kunststoffbauteilen und Keramiken zu nennen. Für letztere sind auch aus Nachbearbeitungen hervorgehende Eigenstressungen in der Randschicht von Interesse.

Die **Topographie** eines Bauteils, d.h. Rauheit bzw. Oberflächentextur, ist bei jedem formgebenden Fertigungsverfahren der unmittelbar beeinflusste Bauteilzustand. So bildet sich oftmals bereits kinematisch bedingt die Werkzeuggeometrie auf der entstehenden Bauteiloberfläche ab. Diese kann durch weitere Prozessstellgrößen, wie bspw. der Bearbeitungsgeschwindigkeit, gezielt hinsichtlich der Anforderungen beeinflusst werden. Unterschieden werden kann in eine kontrollierte, stochastische oder deterministische Prozessführung, was sich unmittelbar auf die eingestellte Topographie auswirkt. Während bei einer kontrollierten Prozessführung gezielt lokal Texturen in die Bauteiloberfläche eingebracht werden können, ergibt sich bei einer deterministischen Prozessführung eine Rauheit auf dem gesamten Bauteil. Im Fall einer stochastischen Prozessführung können je nach Anwendung und gewählten Prozessstellgrößen lokal Texturen oder Oberflächen mit einer speziellen Rauheit eingestellt werden.

Die prozessbedingte Topographie von Bauteilen kann häufig durch analytische oder halbanalytische Modelle

vorhergesagt werden. Insbesondere in der Zerspaltung wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt, welche beispielsweise von Bernardos & Vosniakos (2002) zusammengefasst wurden. Prozessabhängig finden sich Lösungen auf analytischem Wege, durch die Verwendung neuronaler Netze oder auch empirische Formeln basierend auf den Methoden der Versuchsplanung wie dem Design of Experiments.

Unabhängig von ihrem Entstehungsweg ändert sich die Topographie einer Oberfläche in der Regel im Einsatz. Beispielsweise sind im Reibkontakt Einlaufvorgänge beobachtbar, welche die Rauheit plastisch glätten, was das Reibverhalten nach dem Einlauf signifikant verbessern kann. Viele dieser Effekte wurden von Scherge (2018) bezogen auf Tribokontakte mit niedrigem Verschleiß in Überblickform zusammengefasst (Scherge 2018). Im Fall von texturierten Oberflächen ist die Wirksamkeit nur so lange gewährleistet, wie die Textur weder durch Zusetzen von Negativformen, noch durch Abtragen von Positivformen ausgeglichen wird (Ripoll et al. 2013; Bhaduri et al. 2017). Grundsätzlich ist die Lebenserwartung texturierter Oberflächen stark von dem vorherrschenden tribologischen System abhängig. Hier sind besonders die Materialpaarung, Vorbehandlung und chemische Zusammensetzung zu nennen (Moravčíková et al. 2018). Bei harten Materialien ist die Lebenserwartung der Textur höher, wenn ein weicherer Gegenkörper verwendet wird. Hierbei kann es aber zu Ablagerungen in den Texturen kommen, welche vom Gegenkörper abgetragen wurden (Bhaduri et al. 2017). Generell kann es zur Auffüllung der Texturen durch Abrieb kommen, hierbei kann dieser auch von der texturierten Oberfläche selbst stammen (Ripoll et al. 2013). Der Bericht von Conradi, Drnovšek & Gregorčič (2018) zeigt zudem, dass die Texturen auch bei tribologischer Belastung (ineinander) verschmieren können. Dieser Effekt kann verstärkt bei trockener Belastung sichtbar werden.

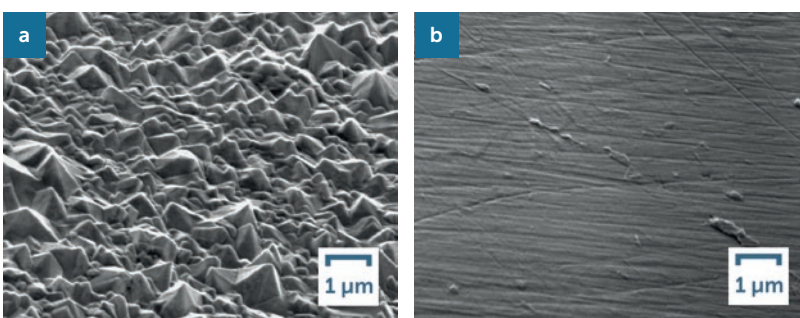


Abb. 5: Oberflächentopographien unterschiedlicher CVD Beschichtungen: (a) unbearbeitete und (b) polierte Oberfläche (Fallqvist et al. 2013).

Die **Härte bzw. Verfestigung** ist ein weit verbreiteter Bauteilzustand, der zur Bewertung metallischer Bauteile herangezogen werden kann. Viele Prozesse führen zu Gradienten innerhalb der Bauteile. Dies liegt daran, dass eine mechanische Bearbeitung zu einer Änderung der Versetzungsanordnung im Gefüge und einer ggf. damit einhergehenden Verfestigung kommt. Eine Verfestigung führt letztlich zu einer geänderten Härte in der Bauteilrandschicht. Während die Härte metallographisch mittels gängiger Verfahren wie bspw. der Vickersprüfung bestimmt wird, werden für die Bestimmung der Verfestigung röntgenographische Messverfahren, wie sie zur Eigenspannungsmessung zum Einsatz kommen, genutzt.

Durch die hohe Interdependenz von Härte und Verfestigung sowie dem Gefüge werden die betreffenden Mechanismen und ihre Stabilität im Kontext des Gefüges behandelt.

Das **Gefüge** eines Bauteils, vereinfacht bestehend aus Kornstruktur, Phasenverteilung und Versetzungsdichte sowie –anordnung, basiert auf dem Fertigungsweg, den der Werkstoff durchlaufen hat. Die meisten thermischen, mechanischen und thermomechanischen Prozesse beeinflussen das Gefüge lokal oder ganzheitlich. Dabei führt eine hohe Temperatur eher zu einer Kornvergrößerung und plastische Deformation in der Regel zu einer Kornfeinung. Interaktionen verschiedener metallphysikalischer Vorgänge können jedoch auch das Gegenteil bewirken, etwa, wenn plastisch induzierte Kornkeimstellen, durch thermische Energie aktiviert, zu einer Kornfeinung führen. Gemäß der Hall-Petch Beziehung zwischen Festigkeit und Korngröße (Hall 1951; Petch 1953) lässt sich eine Festigkeitssteigerung des Bauteiles anhand der vorliegenden Korngrößen abschätzen. Grundsätzlich führt dabei ein feineres Korn zu einer höheren Festigkeit. Allerdings kann sich dieser Trend bei besonders feinen Körnern ($d < 1 \mu\text{m}$) werkstoffabhängig umkehren (Chokshi et al. 1989; Song, Guo & Hu 1999). Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist zunehmendes, interkristallines, diffusives Kriechen in mikro- und nanokristallinen Strukturen, wobei dieses nur abhängig von der Herstellungsrouten des Gefüges (Weertmann 1993) oder der Belastungsart auftritt. Beispielsweise wurde Superplastizität in Scherbelastung durch nichtnewtonsches Fluid-Verhalten aufgrund des großen Anteils von Korngrenzen am Gesamtvolumen beobachtet (Shakhvorostov, Poehlmann & Scherge 2006). Phasenumwandlungen oder Ausscheidungen finden in aller Regel nur durch bestimmte Temperaturverläufe und ggf. bei anliegenden mechanischen Spannungen statt. Rein mechanisch spannungsinduzierte Phasenumwandlungen treten werkstoffabhängig ebenfalls auf. Da Phasenumwandlungen eine

Änderung der Dichte mit sich bringen können, kann es durch sie zu Verzügen von Bauteilen, oder auch dem Abplatzen von oberflächennahen Schichten kommen. In der Regel geht auch eine Änderung des Eigenspannungsfeldes mit einer Phasenumwandlung einher.

Im Kontext der **Härte bzw. Verfestigung** spielt das **Gefüge** eine besondere Rolle. So ändert sich neben der Kornstruktur bei Verformung auch die Versetzungsdichte. Eine höhere Versetzungsdichte führt durch die Interaktion der Versetzungen zu einem erhöhten Widerstand gegen Verformung. Dieser Effekt wird auch Kaltverfestigung genannt. Gezielte Kaltverfestigung kann durch das Einbinden von mechanischer Oberflächenbehandlung, wie dem Kugelstrahlen oder Festwalzen, in eine Prozesskette integriert werden. Bei bestimmten Werkstoffen sind auch Ausscheidungshärtungen durch eine Wärmebehandlung möglich. Ausscheidungsphasen behindern die weitere Bewegung von Versetzungen und steigern dadurch die Festigkeit des Werkstoffes. Auch können sie durch das Beeinflussen der Rissausbreitung für eine größere Sicherheit der Bauteile sorgen. Die Phasenzusammensetzung sowie deren Kontrolle ist über feinste Ausscheidungsphasen hinaus ein wichtiger Faktor für das Surface Engineering. Beispielsweise lässt sich die Leistungsfähigkeit von Komponenten je nach Anwendung und Werkstoff durch Randschichthärtung stark verbessern. Das Verhalten und die chemische Zusammensetzung des jeweiligen Werkstoffes bestimmen dabei den möglichen Rahmen, und die anwendbaren Prozesse bzw. Prozessfolgen. Im Verlauf der Bauteilnutzung kann sich das Gefüge ändern. Zu nennen sind Änderungen durch den Einlauf oder bei Überlast, sowie thermomechanisch induzierte Phasenwechsel. Durch von Stapelfehlerenergie und Diffusionsprozessen abhängige Kriechvorgänge kann sich das Gefüge bzw. der Versetzungszustand ebenfalls ändern. Bei niedrigen Temperaturen laufen diese Mechanismen langsam ab, höhere Temperaturen und Spannungen beschleunigen die Vorgänge. Durch die Konsolidierung von Versetzungen können sich so über lange Zeit Rissinitiationsstellen bilden. Die Interdependenz von Diffusionsverhalten und dem Gefüge ermöglicht so die Beeinflussung dieses Verhaltens. Dabei stellt die Stapelfehlerenergie einen werkstoffspezifischen Kennwert dar. Weiterhin führen statische (in der Regel thermisch aktiviert) oder dynamische (in der Regel durch Deformation aktiviert) Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge zu einer zeitabhängigen, lokalen Entfestigung während der Bauteilnutzung. Versetzungen ordnen sich bei diesen Vorgängen in energetisch günstigere Lagen um oder löschen einander aus. Durch energiegetriebene Verschiebung oder Neubildung von Korngrenzen ändert zudem die Korngrößenverteilung. Diese Vorgänge sind während

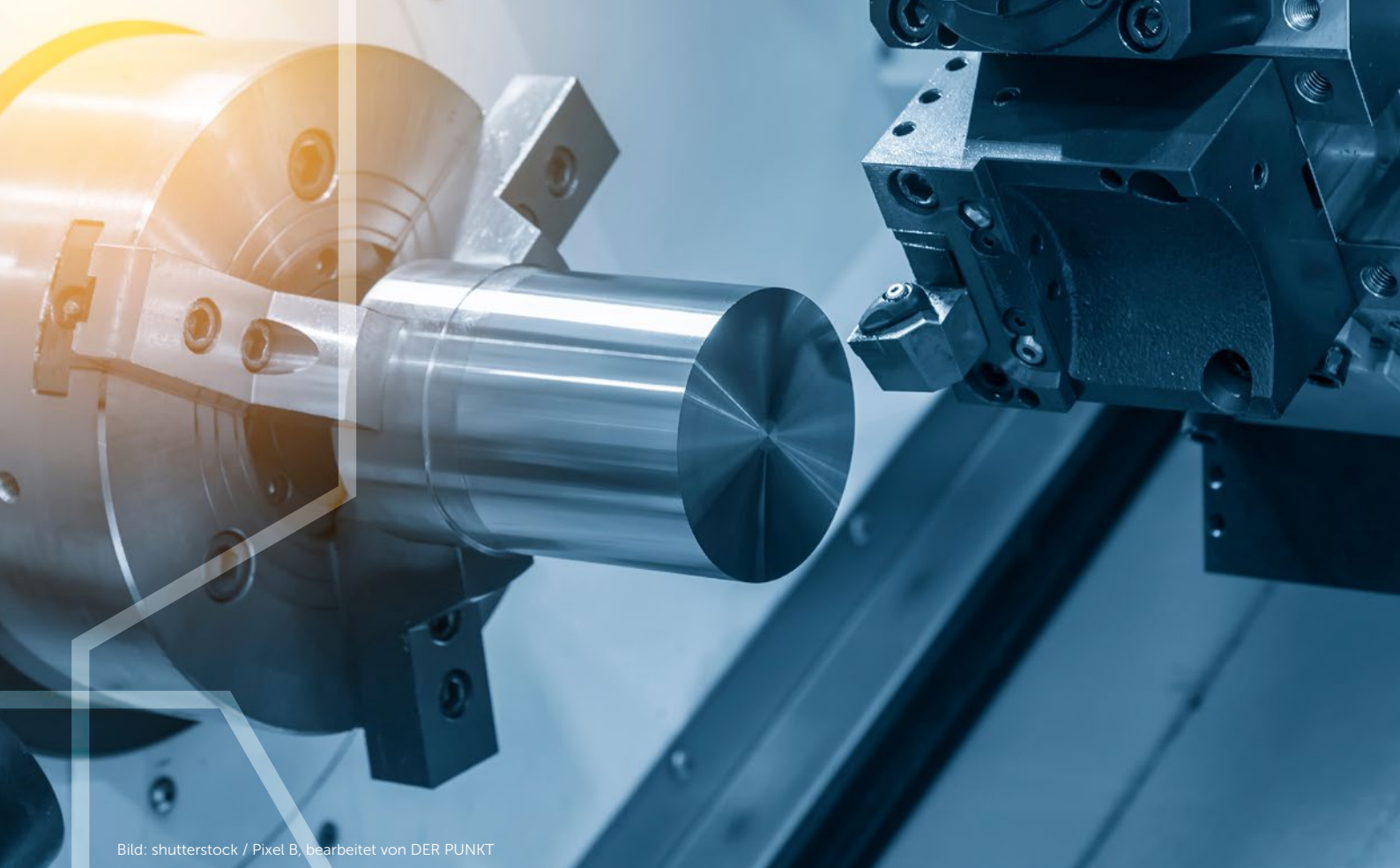


Bild: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

des Betriebes meist nicht erwünscht, laufen jedoch belastungsabhängig lokalisiert, zumeist in der Randschicht, dennoch ab.

Eigenspannungen sind nach der Fertigung im Bauteil verbleibende, gerichtete, elastische Spannungen. Nahezu jede Änderung am Bauteil, ob subtraktiv, additiv, thermisch oder mechanisch, kann den Eigenspannungszustand beeinflussen.

Mit Hilfe eines sogenannten Haigh-Diagramms lässt sich der Einfluss des Eigenspannungszustandes auf die Wechselfestigkeit einschätzen. Hierbei stellt die Goodman-Beziehung den Zusammenhang zwischen Lastspannungsamplitude und Mittelspannung dar und beschreibt die Abnahme der Ermüdungslebensdauer bei zunehmender Mittelspannung für ein bestimmtes Niveau an Lastspannung.

Da der Eigenspannungszustand ein Gleichgewichtszustand ist, liegen Zug- und Druckeigenspannungen immer gemeinsam, wenn auch örtlich getrennt, vor. Je nachdem, wie die Eigenspannungen entstehen, sind Zug- oder Druckeigenspannungen zu erwarten. So führt Hertz'sche Pressung (Eindruck einer Kugel in eine Ebene) ohne Interaktion mit erhöhter Temperatur in der Regel zu Druckeigenspannungen, welche ihr Maximum unterhalb der Oberfläche erreichen. Rühren die

Eigenspannungen dagegen von plastischer Streckung unmittelbar an der Oberfläche, so findet sich das Maximum der Druckeigenspannungen direkt an der Oberfläche. Bei erhöhter Temperatur können je nachdem, ob die Temperatur durch Reduktion der Fließspannung zu verstärkter Streckung, oder zu plastischer Stauchung führt, Druck- bzw. Zugspannungen in der Randschicht verbleiben (Scholtes & Macherauch 1986). Zugeigenspannungen an der Oberfläche sind meist zu vermeiden, während Druckeigenspannungen sowohl das Korrosions- als auch das Wechselfestigkeitsverhalten positiv beeinflussen (Okorokov et al. 2018). Zudem ist der Eigenspannungszustand abhängig von der Tiefe. Durch das Konzept der lokalen Dauerfestigkeit lässt sich die Wechselfestigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Bauteiloberfläche abschätzen. In diese Abschätzung fließen neben dem Eigenspannungszustand auch der Verfestigungszustand und die Beanspruchungsart, die Topographie, Rauheit, Kerbformzahl, Oberflächen- und lokale Härte, der Spannungsgradient sowie die Wechselfestigkeit im eigenspannungsfreien Zustand mit ein.

Eigenspannungen im Bauteil werden über den Einsatz häufig abgebaut. Insbesondere bei Wechselbelastung sind verschiedene Mechanismen des Eigenspannungsabbaus bekannt und experimentell erschlossen (Macherauch & Wohlfahrt 1985).

Angewandtes Surface Engineering

The background is a solid dark blue color. Overlaid on this are several thick, light blue lines that form a complex, abstract geometric pattern. These lines create a series of interconnected shapes, including triangles and polygons, some of which are partially cut off by the edges of the page. The lines vary in orientation, with some being horizontal or vertical and others being diagonal.

In einer Reihe von Fertigungsprozessen wird bereits heute Surface Engineering hinsichtlich den unterschiedlichsten Zielgrößen angewandt.

So ist bei schwingend belasteten metallischen Komponenten die Lebensdauer stets im Fokus von Prozessoptimierungen. Darüber hinaus gewinnen Fragestellungen aus dem Bereich der Tribologie zunehmend an Bedeutung. Anhand der folgenden Beispiele werden aktuelle Fragestellungen aus der industrienahen Forschung

vorgelegt. Hierbei werden sowohl spanende Fertigungsverfahren als auch Verfahren zum Finishing bzw. zur mechanischen Oberflächenbehandlung und zur Wärmebehandlung im Kontext der gezielten Einstellung von Lebensdauer und tribologischem Verhalten betrachtet.



Bild: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

Einlaufverhalten von Lagerflächen durch optimierte Zerspanungsprozesse

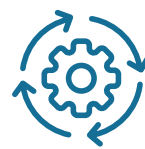


Ausgangssituation und Ziel

Jedes tribologische System stellt sich im Verlauf der Belastung in der Randzone spezifisch ein. Dieser sogenannte Einlauf betrifft mindestens die im Kontakt befindlichen Asperitäten, also die Topographien der Tribopartner. Im anfänglichen Kontakt kommt es in der Regel zu einem Einglätten der Rauheitsspitzen, welches sich auch im Reibwert widerspiegelt (siehe Abbildung 6). Damit kann eine Evolution der Korngröße in der Randschicht einhergehen. Was sich während des Einlaufes ändert und in welcher Geschwindigkeit sich ein stabiler Kontakt (also konstante Reib- und Verschleißwerte) einstellt, hängt maßgeblich von dem gewählten Einlaufregime ab (Volz 1977). Der zweite große Faktor für das Einlaufverhalten ist die mechanische Endbearbeitung, welche den Ausgangszustand bestimmt (Berlet, Dienwiebel & Scherge 2010).

Entscheidend für die Leistung von tribologisch belasteten Komponenten ist somit nicht nur der Fertigungszustand, sondern auch der Zustand, der sich nach dem Einlauf einstellt. Ein Ziel des Surface Engineering kann also sein, bereits im Fertigungsprozess dem Zustand, welcher sich eigentlich im verschleißbehafteten Einlauf einstellt, nahe zu kommen oder den Einlauf zu stabilisieren und zu verkürzen.

Abb. 6: Einlaufverhalten von Stahl auf gespritztem Siliciumnitrid mit rauer und glatter Oberfläche (Blau 1991).



Vorgehen und Methoden

Unterschiedliche Prozessstellgrößen in der Fertigung führen zu unterschiedlichen Randschichtzuständen, wie Topographien, Korngrößenverläufen, Eigenspannungen und Verfestigungen. Die Gesamtheit dieser Zustände beeinflusst nicht nur das Einlaufverhalten, sondern auch das nach dem Einlauf erreichte Gleichgewicht. Da der Einlauf stark verschleißbehaftet ist, besteht hier Potential zur Einsparung von Ressourcen.

Durch geeignete Bearbeitung lassen sich Korngrößenverläufe vorhersehbar einstellen (Ambrosy, Zanger & Schulze 2015; Segebade, Zanger & Schulze 2016; Segebade et al. 2018). Für die untereutektische Legierung AlSi11Cu3 wurden daher drei verschiedene Zustände mit vergleichbarer Rauheit und Verfestigung, jedoch mit unterschiedlichen Korngrößenverläufen hergestellt und tribologisch analysiert (Linsler 2016; Linsler, Schröcket & Scherge 2016).

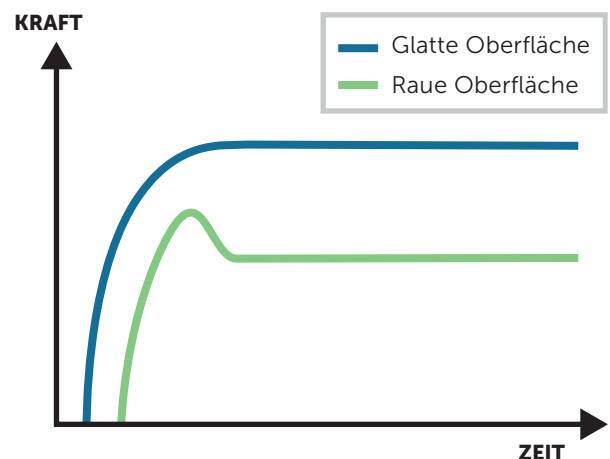




Bild: shutterstock / Matveev Aleksandr, bearbeitet von DER PUNKT



Ausgewählte Ergebnisse

Durch geschickte Wahl von Zerspanungswerkzeugen und Prozessstellgrößen kann der Randschichtzustand gezielt beeinflusst werden. Anwendung findet diese Form des Surface Engineering bspw. bei der Optimierung der Oberfläche von Nockenwellen.

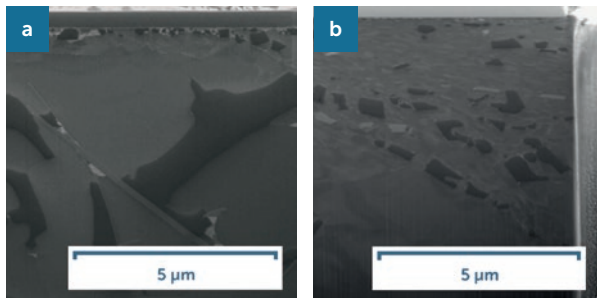


Abb. 7: Gefügestruktur in der Randschicht mit (a) der geringsten und (b) der höchsten Passivkraft (Linsler, Schröcket & Scherge 2016)

So ist bei der Zerspanung mit bestimmter Schneide in der Regel eine hohe Passivkraft ein Zeichen für einen großen Pflügeanteil. Das Pflügen des Werkstückes unter dem Werkzeug wiederum bewirkt in der Regel eine starke plastische Verformung und kann damit eine Kornfeinung hervorrufen. In Abbildung 7 sind zwei Extreme der getesteten Varianten dargestellt. Während die Variante a) nur eine sehr kleine Beeinflussung des Gefüges in der Randschicht durch den Fertigungsprozess aufweist, ist die Variante b) deutlich in größerer Tiefe geschert. Die Ergebnisse der tribologischen Einlaufversuche (inklusive Radionuklidmessung des Verschleißvolumens) sind in Abbildung 8 dargestellt. Während die Variante mit dem

gering beeinflussten Gefüge ein geringes Verschleißvolumen über das gewählte Reibungsregime aufweist, weist die Variante mit stark beeinflussten Gefüge bei jeder Änderung des Belastungskollektivs einen neuen Einlauf auf. Es bildet sich kein stabiler Gefügezustand, die Probe verschleißt nahezu konstant über den gesamten Versuchszeitraum.

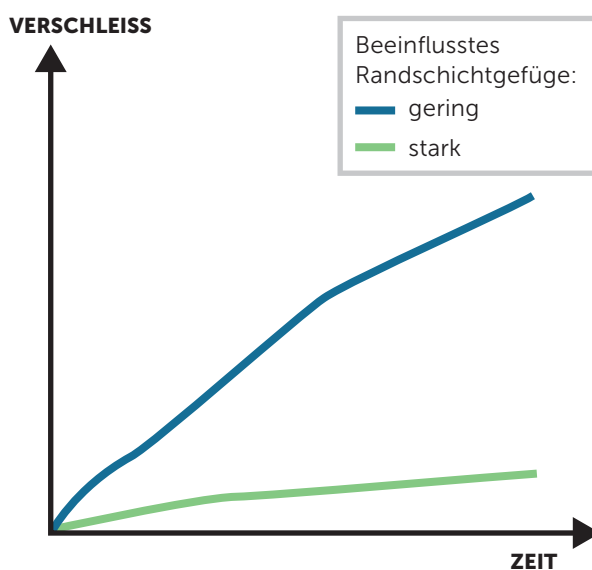


Abb. 8: Einlauf des gering und stark beeinflussten Randschichtgefüges (Linsler, Schröcket & Scherge 2016).

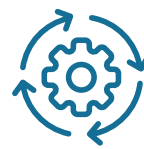
Texturierung durch Zerspanungsprozesse



Ausgangssituation und Ziel

Mögliche Hindernisse der Texturierung von Oberflächen zur Optimierung des Bauteilverhaltens sind unter anderem die Zugänglichkeit, oder auch die Notwendigkeit von Umspannungen oder zusätzlichen Prozessschritten in Maschinen. Dabei ist hinreichend nachgewiesen, dass Texturen einen erheblichen Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten haben können, welcher zum einen für geringere Energieverbräuche sorgen kann (durch die Reduktion des Reibwertes), und zum anderen zu langlebigeren Komponenten führt (durch Reduktion der Verschleißrate).

Die Fertigung von Texturen muss immer sowohl auf den Werkstoff der zu texturierenden Komponente, als auch auf den Tribopartner und das jeweilige Belastungskollektiv abgestimmt sein. Für tribologisch belastete Zylinderlaufflächen im Flugzeugbau soll der bei Titanlegierungen grundsätzlich hohe Verschleiß durch ausschließlich mit dem Zerspanungswerkzeug aufbrachte Texturen reduziert werden.



Vorgehen und Methoden

Das mechanische Aufbringen von Texturen mit Zerspanungswerkzeugen kann sowohl spanabhebend als auch spanlos realisiert werden. Die spanabhebende Texturierung kann in verschiedensten Prozessen umgesetzt werden. So ist die Integration von Piezoaktorik in das Werkzeug oder den Werkzeughalter sowohl beim Drehen (Hosseinabadi, Sajjadi & Amini 2018) als auch beim Fräsen (Chen et al. 2018) bereits umgesetzt worden. Eine Übertragung auf verwandte Prozesse ist abhängig von der Zugänglichkeit der Werkzeuge grundsätzlich denkbar. In der Drehbearbeitung ist eine Texturierung auch ohne weitere Hilfsmittel auf der Werkzeugmaschine möglich. Ein Beispiel hierfür ist das vorschubfreie Drehen (Schubert, Zhang & Steinert 2013), welches zu einer drallfreien kinematischen Rauheit führt. Spanlose Texturierung wird in der Regel nicht mit Zerspanungswerkzeugen durchgeführt. Die Ausnahme ist das das Verfahren der Komplementärtexturierung, welches an die Komplementärzerspanung angelehnt ist.

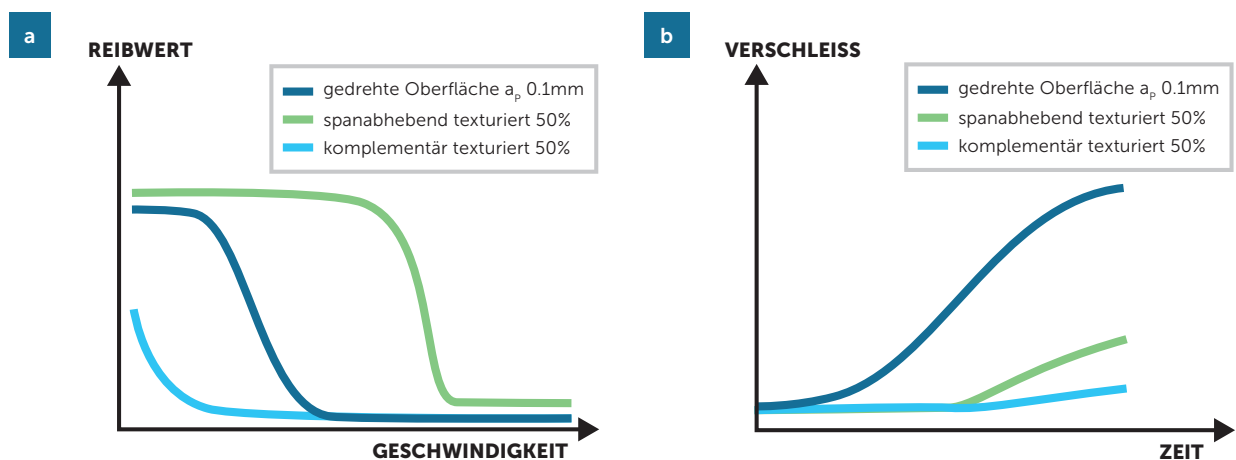
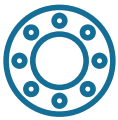


Abb. 9: (a) Reibwert gegen Relativgeschwindigkeit abhängig von aufgebrachtener Textur, TiAl6V4 gegen Lagerbronze im Pin on Disk Versuch (Segebade et al. 2018); (b) Linearer Verschleiß gegen Versuchsdauer abhängig von aufgebrachtener Textur, TiAl6V4 gegen Lagerbronze im Pin on Disk Versuch (Segebade et al. 2018).



Ausgewählte Ergebnisse

Durch die Texturierung im Zerspanungsprozess können Bauteile hinsichtlich der Lebensdauer optimiert werden.

Der Verschleiß von texturierten Oberflächen im Gleitkontakt ist maßgeblich von den Rahmenbedingungen Relativgeschwindigkeit, Normaldruck und der tatsächlichen Kontaktfläche abhängig. Letztere lässt sich durch den Füllgrad der Texturen, bzw. der gezielten Anpassung des Traganteils beeinflussen. In einer Vergleichsstudie im Triboprüfstand schnitten spanabhebend gefertigte Texturen bezüglich des Reibwertes und dem Übergang von Hydrodynamik zu Gleitreibung schlechter ab als die nicht texturierte Referenz, sowie die analog spanlos gefertigte Variante (siehe Abbildung 9a). Der über die Versuchsdauer gemessene lineare Verschleiß ergab ein ebenso deutliches Bild für die drei geprüften Varianten, wobei die spanlos gefertigte Variante über die gesamte Versuchsdauer einen deutlich geringeren Verschleiß aufwies als die anderen Varianten (siehe Abbildung 9b).

Die Ergebnisse legen nahe, dass der wesentliche Effekt nicht aus dem eigentlichen Fertigungsprozess hervorgeht (spanabhebend vs. komplementär), sondern die resultierende Kontaktfläche den größten Einfluss auf die Tribopaarung nimmt. Der Unterschied wird beim Blick auf die Texturquerschnitte, dargestellt in Abbildung 10, deutlich. Die aus der Komplementärtexturierung resultierende Topographie sorgt für eine größere Reduktion der Kontaktfläche als die spanabhebende Texturierung.

Auch wenn dadurch mit beiden Verfahren ähnliche Ergebnisse erzielbar sein sollten, kann die Komplementärtexturierung bei kaltverfestigenden Werkstoffen durch die starke Umformung der prozessbedingten Gratbildung die bessere Alternative sein.

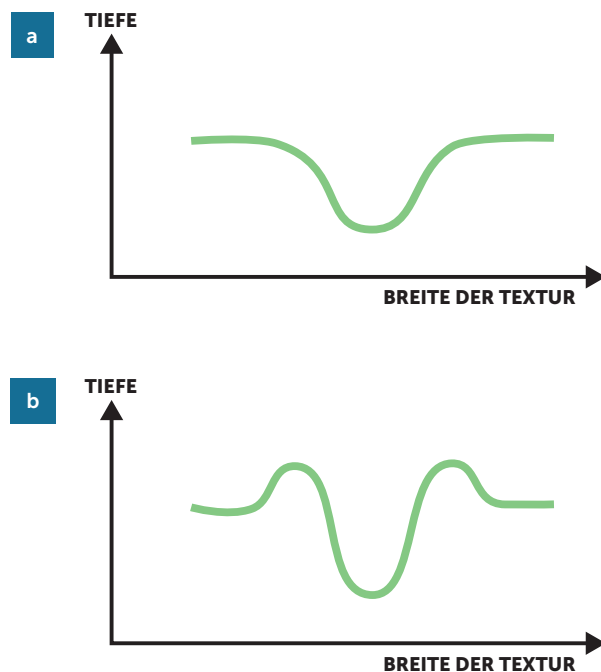


Abb. 10: Analyse der Texturquerschnitte: (a) spanabhebend, (b) komplementär texturiert (Segebade et al. 2018).



Texturierung mittels Laserablation und Stream Finishing



Ausgangssituation und Ziel

In der Endanwendung treten gleichzeitig verschiedenste Belastungsarten in Erscheinung, sodass Bauteile auf ein umfassendes Lastkollektiv optimiert und angepasst werden müssen. Hydrodynamische Gleitlagerpaarungen sind über ihre Standzeit hinweg Wechselbelastungen ausgesetzt, wodurch eine hohe Wechselfestigkeit unabdingbar ist. Gleichzeitig zeigt sich bei diesen Lagern auch eine starke tribologische Belastung während der An- und Ablaufphasen im Mischreibungsregime. Um verschleiß-

bedingten Lebensdauerverkürzungen vorzubeugen, ist eine reibungsreduzierende Oberfläche von Nöten.

Diese Belastungen müssen durch gezielte Bearbeitungsprozesse in der Herstellung adressiert werden. Im Falle der Gleitlagerwellen soll die Bauteiloptimierung mittels Texturierung durch Laserablation sowie durch die Kombination aus Laserablation und Stream Finishing angegangen werden.

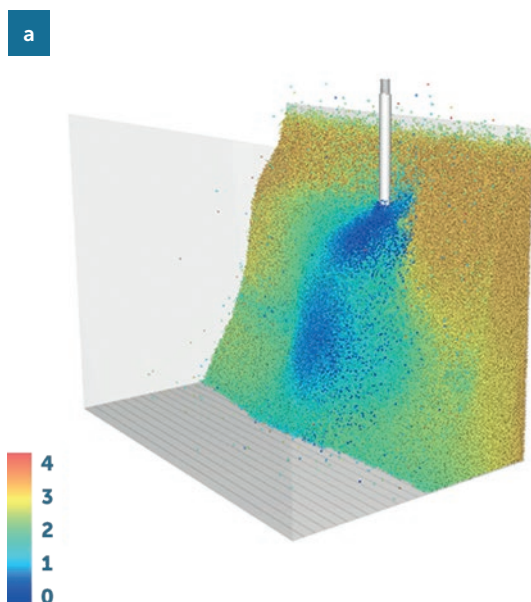


Abb. 11: (a) Simulative und (b) experimentelle Durchführung des Stream Finishing Prozesses.

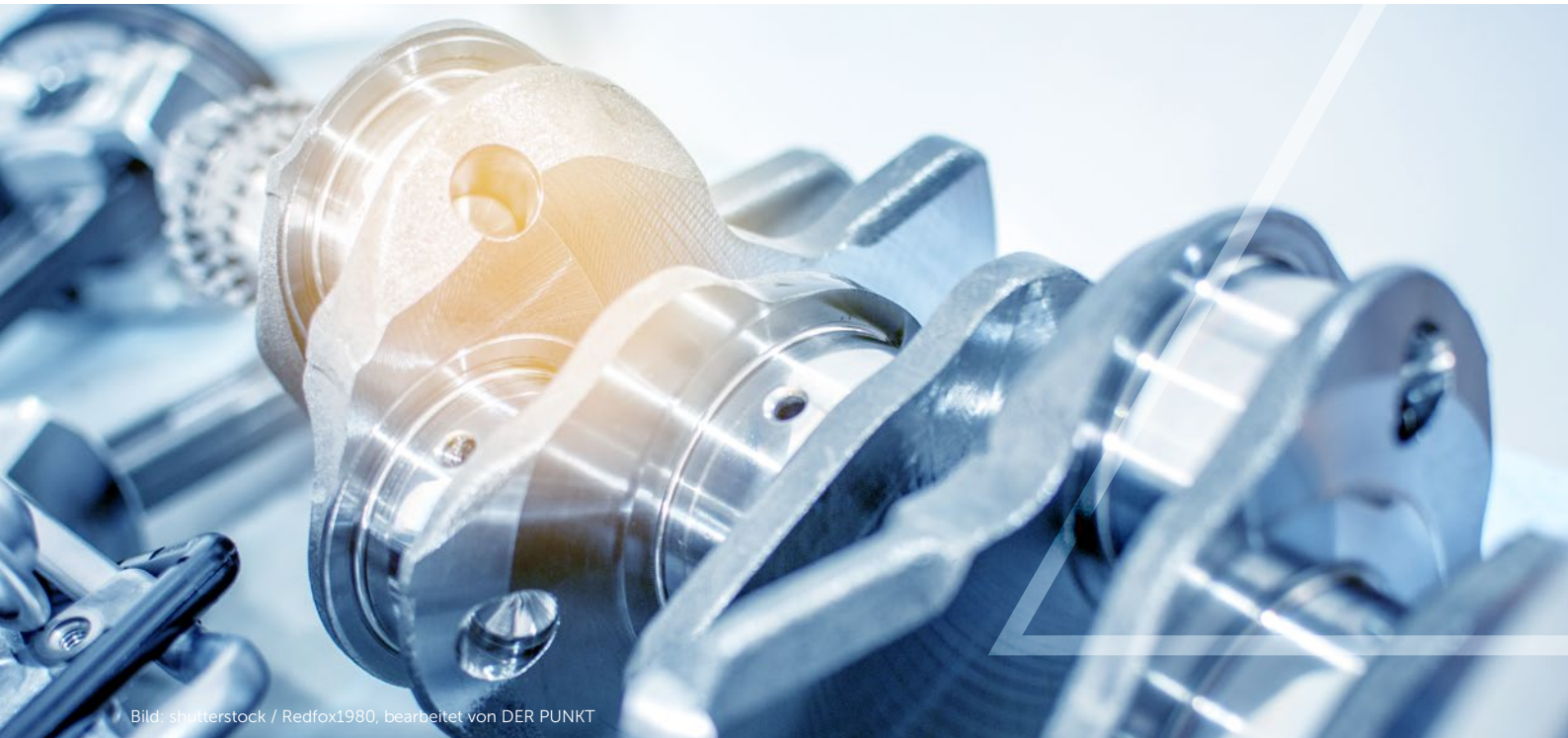


Bild: shutterstock / Redfox1980, bearbeitet von DER PUNKT



Vorgehen und Methoden

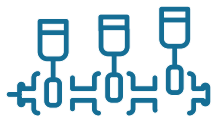
Die Texturierung von technischen Oberflächen durch Laserablation kann die tribologischen Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. Hierbei sind die Texturgeometrie wie bspw. Näpfchen oder Gräben, der Flächenanteil und die Art der Laserbearbeitung als primäre Prozess- und Einflussparameter zu nennen (Braun 2015). Das Einbringen von Strukturen auf eine technische Oberfläche hat gezeigt, dass diese den Reibungskoeffizienten und somit den Verschleiß deutlich senken können. Welche Form der Textur dabei zum Erfolg führt, ist stark vom Tribosystem, also der Kombination der Werkstoffe in Verbindung mit dem Lastkollektiv abhängig.

In der Regel werden bei der Verwendung von Nanosekunden-Lasern die entstehenden Schmelzaufwürfe bei der Texturierung durch Schleifen entfernt (Hu, Hu & Ding 2012; Kovalchenko et al. 2005). Je nach Werkstoff können allerdings Umschmelzeffekte für verbesserte Eigenschaften sorgen, weshalb das Belassen der Schmelzaufwürfe auch von Vorteil sein kann. Neben Werkstoffen für die dies offensichtlich der Fall ist (bspw.

Gusseisen (Mishra & Polycarpou 2011), Stahl (Greiner & Schäfer 2015) oder Kupfer (Amanov et al. 2013)) wurden die tribologischen Eigenschaften von Grabenstrukturen mit Schmelzaufwürfen auf der Titanlegierung TiAl6V4 untersucht (Kümmel et al. 2019).

Auch die Entwicklung einer optimierten Bearbeitungsstrategie bestehend aus mehreren Prozessen kann die Textur ebenfalls auf die Anforderung des Bauteils gezielt angepasst werden.

Das neuartige Stream Finishing Verfahren vereint die Vorteile einer Oberflächenendbearbeitung durch Polieren mit positiver Beeinflussung von Randschichteigenschaften. Durch diesen Prozess ist es möglich, Druckeigenstress einzubringen womit eine Erhöhung der Wechselfestigkeit erzielt wird. Um die vorherrschenden Vorgänge des Stream Finishing tiefgreifend zu verstehen, werden Simulationen mit experimenteller Arbeit (Abbildung 11) kombiniert.



Ausgewählte Ergebnisse

Das Potential der Texturierung mittels Laserablation und Stream Finishing lässt sich u.a. an Kurbelwellen zeigen. Hier führt eine Texturierung der Lager zu einer Reduzierung der Reibung und somit zu einer Effizienzsteigerung.

Im reversierenden Gleitkontakt wurden TiAl6V4 Proben quer zu einer Grabentextur mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden untersucht. Der Überdeckungsgrad wurde von 0 % (Referenz) bis 200 % (vollständig umgeschmolzen und nachgeschliffen) variiert. Zusätzlich wurde die Textur bei einem Überdeckungsgrad von 10 % einmal unter Schutzgas appliziert (Argon), und einmal nach der Texturierung die Aufwürfe in einem Schleifprozess entfernt. Es wird deutlich, dass die Textur ab einem Überdeckungsgrad von 5 % den Verschleiß stark reduziert. Dies gilt nicht für die Texturierung unter Schutzgas (10 % Ar) oder bei Entfernung der Schmelzaufwürfe (10 % br). Auf der Probe mit 200 % Überdeckungsgrad und anschließendem Schleifen konnte kein Verschleiß gemessen werden. Abbildung 12 zeigt die Verschleißspur auf der Referenz und der Probe mit 10 % Überdeckungsgrad. Während auf der Referenz die ursprüngliche Oberfläche im Kontaktbereich stark verschliffen ist, sind die Schmelzaufwürfe der texturierten Probe noch immer sichtbar und nur im Ansatz abgetragen. Die Texturierung hat in diesem Fall den

Verschleiß also signifikant verringern können. Welchen Einfluss die Texturen auf die Wechselfestigkeit haben, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Die Texturierung von tribologisch belasteten Oberflächen hat gezeigt, dass auch eine Näpfchentextur, wie in Abbildung 13a) gezeigt, eine Reduktion von Verschleißerscheinungen erzielen kann. Als besonders vorteilhaft hat sich das Applizieren dieser Strukturen durch Ultrakurzpuls-Laser im Picosekunden-Regime erwiesen. Durch diese extrem kurzen Laserpulse wird eine thermische Beeinflussung, und somit das Einbringen ungewünschter Zugeigenspannungen in das Werkstück drastisch reduziert. Experimente haben hierbei bestätigt, dass die Zugspannungszustände nahe der Oberfläche nach einer Laserbearbeitung nur geringe Werte annehmen. Weiterhin wird durch den Einsatz des Picosekunden-Lasers ein Aufwerfen von Material an den Strukturen unterbunden, wodurch Nachbearbeitungsprozesse entfallen.

Das Stream Finishing Verfahren ermöglicht die Feinstoberflächenbearbeitung von einfachen und komplex geformten Bauteilen. Hierbei sind in kürzester Bearbeitungszeit sehr kleine Rauheitswerte möglich. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt zudem in der Optimierung

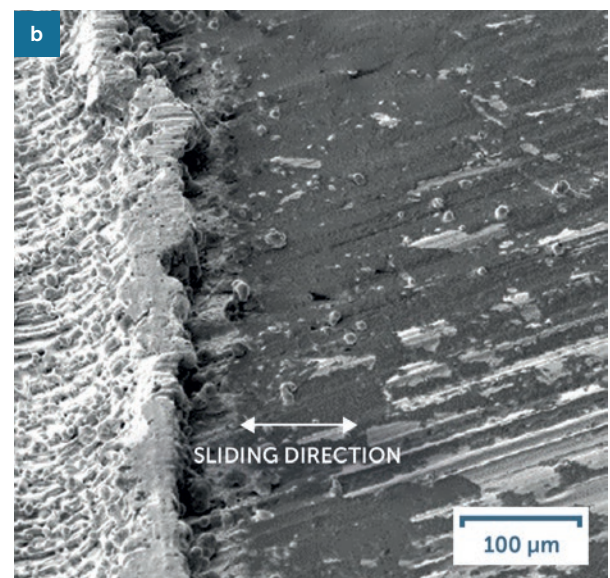
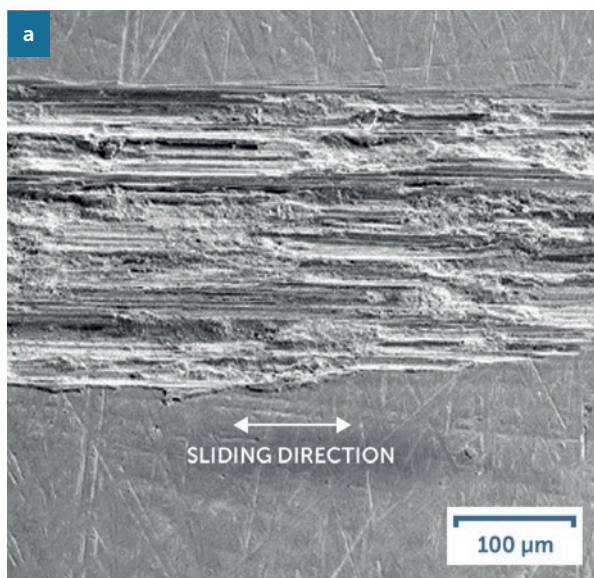


Abb. 12: Verschleißspur nach 60 Minuten reversierendem Kontakt bei 20 N Normalkraft (a) ohne Textur (Referenz), (b) mit 10 % Überdeckungsgrad (Kümmel et al. 2019).

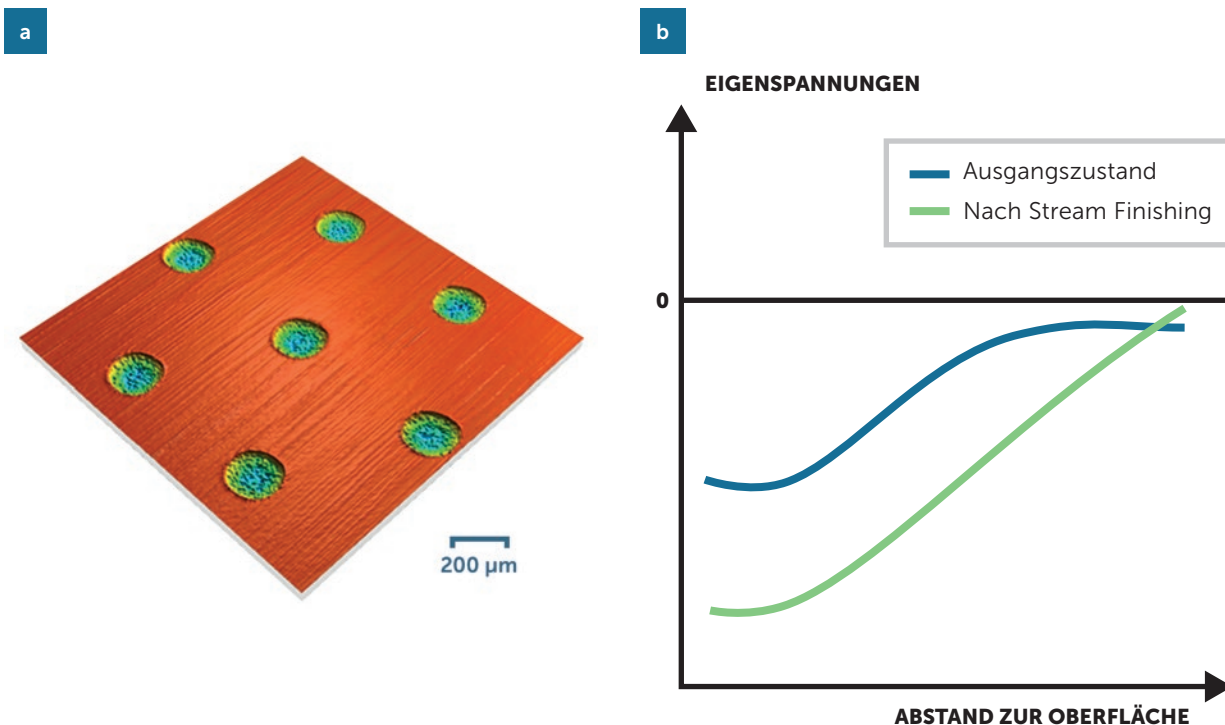


Abb. 13: (a) Topografie einer Lasertexturierten Oberfläche; (b) Druckspannungsverläufe in der Randschicht nach einer Bearbeitung durch den Stream Finishing Prozess.

der Randschichtzustände der Werkstücke. Durch die Bearbeitung entstehen feinst- und nano-kristalline Bereiche mit signifikanten Druckeigenspannungszonen (vgl. Abbildung 13b) wodurch die Schwingfestigkeit maßgeblich beeinflusst wird.

Neben der Optimierung der Bauteile sind auch die eingesetzten Fertigungsverfahren selbst von großer Bedeutung. Durch thermische, mechanische oder thermo-mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren können die geforderten Bauteilzustände zwar auch am Ende der Prozesskette eingestellt werden, jedoch wird in der jüngsten Vergangenheit, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz, intensiv daran gearbeitet, die Prozesse zur Oberflächenbehandlung zu optimieren, sie in vorhergehende Prozesse zu integrieren oder gar zu vermeiden. Um Potentiale hinsichtlich

der Optimierung aufzuzeigen und umzusetzen, muss jedoch zunächst ein grundlegendes Prozess- und Mechanismenverständnis aufgebaut werden. Die Verkürzung von Prozessketten wird dadurch ermöglicht, dass hybride Prozesse entwickelt werden, durch die Prozesse in vorhergehende Prozessschritte integriert werden. Weiter gedacht kann die gezielte Einstellung der Bauteilzustände bereits im formgebenden Zerspanungsprozess zu einem gänzlichen Verzicht von Prozessen zur Oberflächenbehandlung führen. Der Einsatz einer kryogenen Kühlung in der Zerspanung ist in diesem Kontext nur ein Beispiel solcher innovativer Konzepte zur Prozessführung. Darüber hinaus kann der Werkstofffluss und damit die resultierenden Bauteilzustände durch den Einsatz von Zerspanungswerkzeugen mit gezielten Schneidkantenmikrogeometrien eingestellt werden (Gerstenmeyer 2018).

Kugelstrahlen und Warmstrahlen



Ausgangssituation und Ziel

Das Kugelstrahlen ist eines der ältesten Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung und findet u.a. Anwendung bei der Festigkeitssteigerung von Federn. Dabei wird ein Strahlmittel mit hoher Geschwindigkeit

mit dem Ziel auf eine Bauteiloberfläche geschleudert, das Bauteil zu reinigen, entgraten oder in die Randschicht infolge elastischplastischer Verformung lebensdauersteigernde Bauteilzustände zu induzieren.



Bild: shutterstock / PHOTOCREO Michal Bednarek, bearbeitet von DER PUNKT



Vorgehen und Methoden

Die wesentlichen Einflussgrößen beim Kugelstrahlen sind das Strahlmittel, die Strahlgeschwindigkeit bzw. Strahlendruck sowie der Bedeckungsgrad. Mit diesen Prozessstellgrößen können unterschiedliche Bauteilzustände, wie Rauheiten oder Eigenspannungen beeinflusst werden. Bei Variation einer weiteren Prozessstellgröße, der Strahltemperatur, ergibt sich ein weiterer Freiheitsgrad für das Kugelstrahlen. Dazu müssen das Strahlgut und das Werkstück während des Strahlvorgangs auf Temperaturen von bspw. 300°C bei Stählen erwärmt werden. Damit können weitere Randschichtveränderungen, hervorgerufen durch Überlagerung von Vorspannung und Strahltemperatur, erzielt werden, die mit dem konventionellen Kugelstrahlen nicht möglich wären.



Ausgewählte Ergebnisse

Eine vergleichende Analyse zwischen dem Kugelstrahlen und Warmstrahlen am Vergütungsstahl 42CrMo4 zeigt, dass durch das Warmstrahlen etwa 100 MPa höhere Druck-Eigenspannungen erreicht werden können, während sich hinsichtlich der erreichbaren Rauheit keine nennenswerten Änderungen ergeben.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass bei zyklischer Beanspruchung die resultierende Dauerfestigkeit von warmgestrahlten Proben verglichen zu Proben mit Raumtemperatur deutlich gesteigert werden kann. Dies ist auf eine höhere Stabilität der Randschichtzustände, insbesondere der Eigenspannungen, zurückzuführen. Während es bei gestrahlten Proben bei Raumtemperatur zu einem signifikanten Eigenspannungsabbau nach 1000 Lastspielen kommt, bleiben die Druck-Eigenspannungen nach dem Warmstrahlen weitestgehend auf einem bis zu doppelt so höheren Niveau erhalten und wirken so einem frühzeitigen Bauteilversagen entgegen (vgl. Abbildung 14).

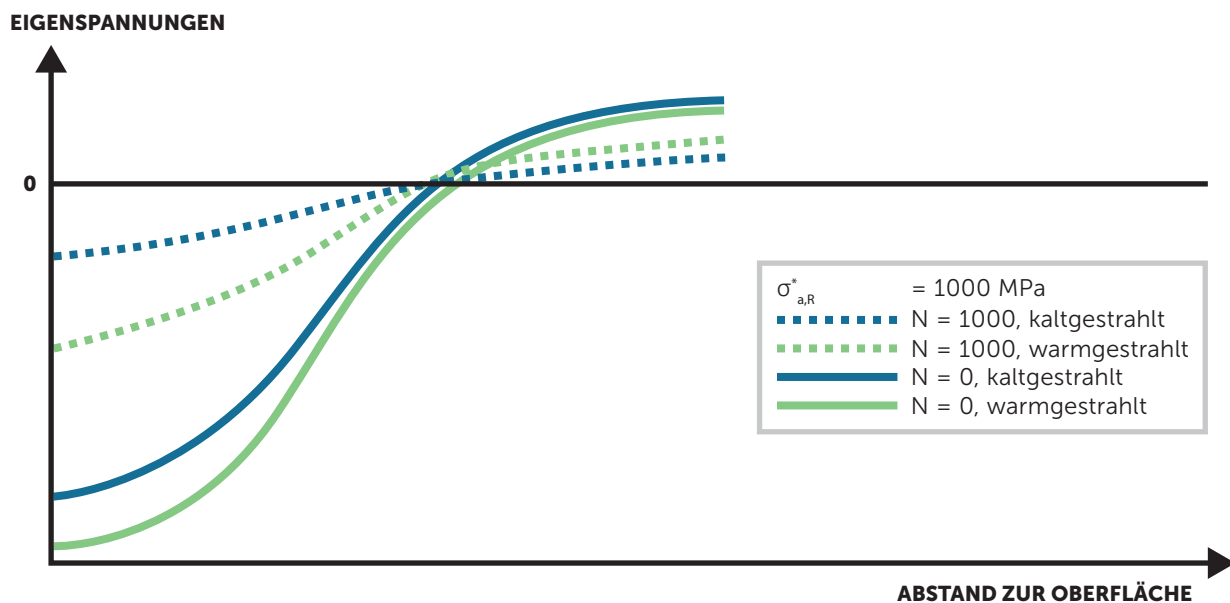


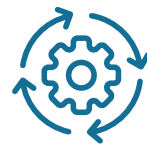
Abb. 14: Eigenspannungsverlauf von warm und kaltgestrahlten Proben nach 0 und 1000 Lastspielzahlen (Wick, Schulze & Vöhringer 1999).

Festwalzen und kryogenes Festwalzen



Ausgangssituation und Ziel

Das Festwalzen ist ein weiteres Verfahren für eine mechanische Oberflächenbehandlung und damit zur gezielten Verbesserung der Randschichtzustände. Dabei überrollt ein Festwalzwerkzeug, in der Regel eine geführte und mit einer Vorspannkraft vorgespannte Kugel oder Rolle, die Bauteiloberfläche und induziert dabei eine elastisch-plastische Verformung die Randschicht (vgl. Abbildung 15a). Das Festwalzen erfolgt in der Regel nach einem zerspannenden Fertigungsprozess und stellt damit den letzten Prozessschritt in der Fertigungskette dar.



Vorgehen und Methoden

Beim Festwalzen sind die klassischen Prozessstellgrößen der Vorschub, Kugel- bzw. Rollendurchmesser, Anzahl der Überrollungen sowie der Festwalzdruck. Mit diesen Prozessstellgrößen kann werkstoffabhängig die resultierende plastische Verformung gezielt beeinflusst werden und so, ähnlich wie beim Kugelstrahlen, unterschiedlichste Bauteilzustände, wie Rauheiten oder Verfestigung erreicht werden. Des Weiteren kann die Prozessführung um eine kryogene Kühlung erweitert werden. Dabei wird bspw. mit flüssigem CO₂ das Bauteil bzw. lokal die Wirkzone während dem Festwalzprozess gekühlt (vgl. Abbildung 15b). Damit ist eine weitergehende Beeinflussung der Randschichtzustände möglich.

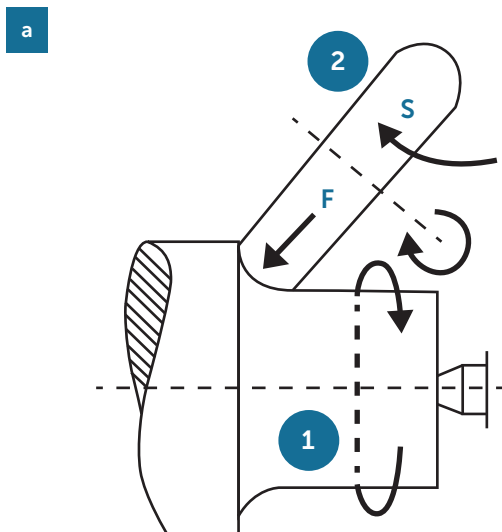


Abb. 15: (a) Schematische Darstellung des Festwalzen (Kloos & Adelman 1988), (b) Festwalzen unter kryogener Kühlung (Meyer, Brinksmeier & Hoffmann 2011).



Bild: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT



Ausgewählte Ergebnisse

Anwendung findet das Festwalzen u.a. bei der Verfestigung von Gleitlagerflächen.

Rauheitsanalysen nach dem Festwalzen zeigen das Potential zur Senkung der Rauheiten. So konnte beim Festwalzen des Vergütungsstahls 42CrMo4 gezeigt werden, dass der Rauheitskennwert Rz verglichen zur vorhergehenden Zerspanung um etwa 88 % gesenkt werden konnte (vgl. Abbildung 16a). Gleichzeitig wurden Druckeigenspannungen von etwa 1050 MPa bis zu einer Tiefe von 400 μm nachgewiesen.

Unter Verwendung einer kryogenen Kühlung während des Festwalzens konnte (Meyer 2012) zeigen, dass durch martensitische Umwandlung eine weitere Steigerung der Mikrohärtigkeit insbesondere in der oberflächennahen Randschicht möglich ist. Diese Charakteristik ist auf die wirkende Hertz'sche Pressung während des Festwalzens zurückzuführen.

a

Rz in μm	
Zerspanung:	2,7
Festwalzen:	0,3

b

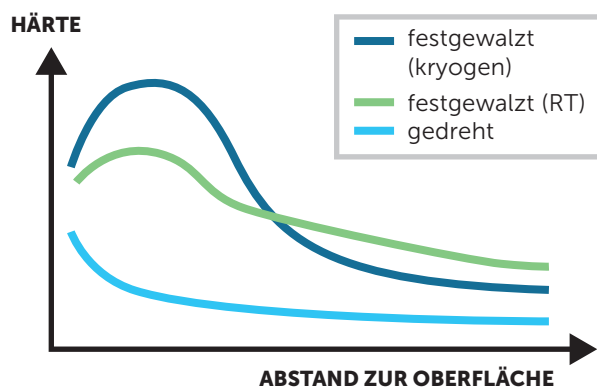


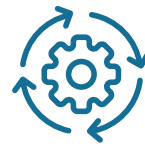
Abb. 16: (a) Resultierende Topographie nach dem Festwalzen von 42CrMo4, (b) Resultierende Mikrohärtigkeit nach dem Zerspannen und Festwalzen von X210Cr12 mit unterschiedlichen Temperaturen, nach (Meyer 2012).

Drehwalzen



Ausgangssituation und Ziel

Aus den steigenden Anforderungen nach zeit- und kosteneffizienten Prozessketten resultieren Forschungsansätze, ausgewählte Prozessschritte in vorgehende Prozessschritte zu integrieren. So stellt ausgehend von dem etablierten Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung Festwalzen das sog. Drehwalzen eine Verfahrensvariante dar, die die Zerspanung und das Festwalzen in einem Prozessschritt realisiert. Die grundsätzlichen Anwendungsgebiete bleiben hierbei die Gleichen.



Vorgehen und Methoden

Beim Drehwalzen ist in einem Kombinationswerkzeug sowohl ein Zerspanungs- als auch Festwalzwerkzeug integriert. Dabei ist das Festwalzwerkzeug in einem Abstand von einigen Millimetern hinter dem Zerspanungswerkzeug angeordnet (vgl. Abbildung 17). Konstruktiv bedingt sind diese Prozessschritte somit gekoppelt, wodurch Prozessstellgrößen, wie der Vorschub für beide Prozessschritte gelten. Zusätzlich zu den bei der Zerspanung üblichen Prozessstellgrößen ist beim Drehwalzen die Vorspannung und Durchmesser des Festwalzwerkzeuges eine relevante Einflussgröße, um das Bearbeitungsergebnis gezielt beeinflussen zu können.

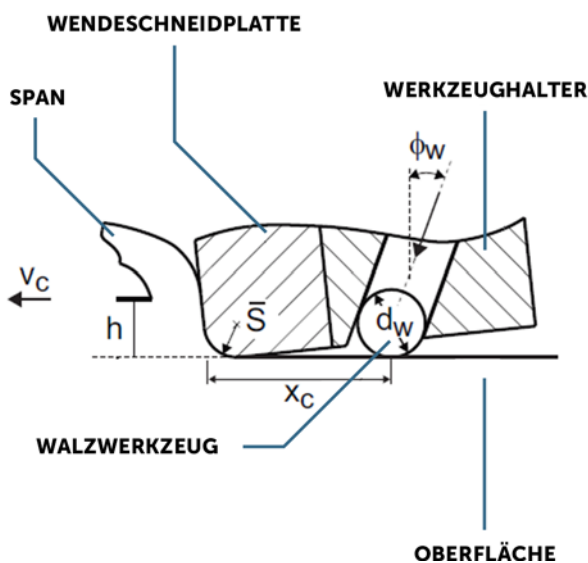


Abb. 17: Schematische Darstellung der Kombination aus Drehen und Festwalzen (Maiß 2019).

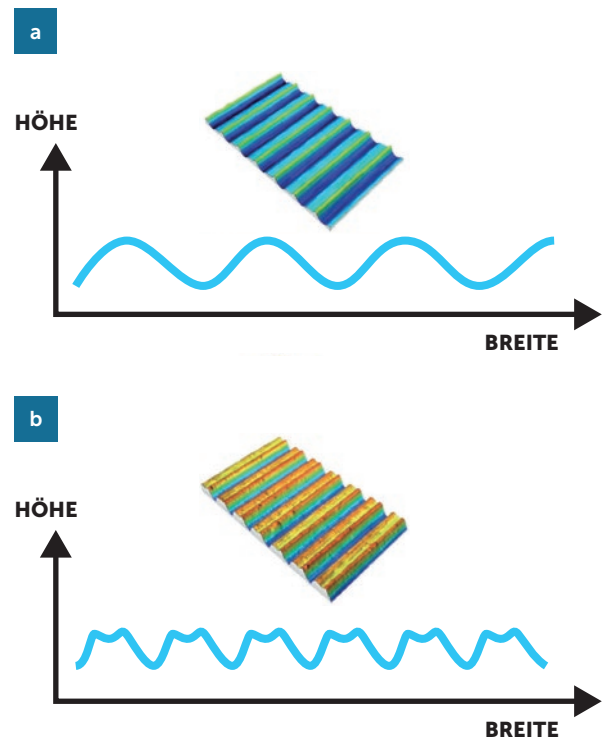


Abb. 18: (a) Durch Hartdrehen erzeugte Oberfläche, (b) Erzeugung von Plateauoberflächen durch Drehwalzen (Maiß 2019).



Ausgewählte Ergebnisse

Im Rahmen der forschungsseitigen Entwicklung des Drehwalzens konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Lagerflächen aus 100Cr6 mit dem hybriden Werkzeug zeiteffizient zu bearbeiten und lebensdauersteigernde Bauteilzustände zu erzeugen. So konnte eine vergleichende Analyse zwischen dem konventionellen Drehen und dem Drehwalzen von 100Cr6 zeigen, dass die resultierende Oberfläche infolge der elastischplastischen Verformung beeinflusst wird und Rauheitsspitzen, wie in Abbildung 18 gezeigt, in einem erheblichen Maße gesenkt werden konnten (Maiß 2019).

Weiterhin hat die Analyse von Maiß (2019) ergeben, dass mit unterschiedlichen Vorschüben und Walzdrücken unterschiedlich stark ausgeprägte Druck-Eigenstressungen in die Randschicht eingebracht werden können (Abbildung 19).

Der sich auf die Lebensdauer verlängernde Einfluss der sich ändernden Bauteilzustände beim Drehwalzen konnte in zyklischen Schwingfestigkeitsversuchen nachgewiesen werden. So können unter einer geometrischen Anpassung des Festwalzwerkzeuges (Änderung des Durchmessers) höhere und damit zeiteffizientere Schnittgeschwindigkeiten umgesetzt werden und gleichzeitig vergleichbare Lebensdauern erreicht werden, wie es bei einer konventionellen Prozesskombination aus Zerspänung und Festwalzen erreicht wird (Maiß 2019).

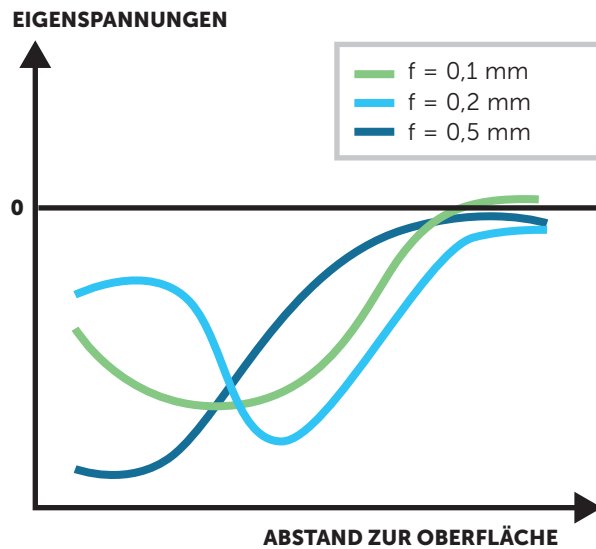


Abb. 19: Einfluss des Vorschubs auf die Eigenstressungen beim Hartdrehwalzen (Maiß 2019).

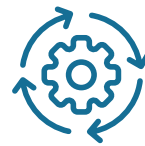


Komplementärzerspanung



Ausgangssituation und Ziel

Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung, wie das Kugelstrahlen, sind in einer Vielzahl von Anwendungen etabliert. Ebenso wie hybride Verfahren, wie das Drehwalzen, bringen sie eine plastische Verformung in die Randschicht ein und tragen so zur Optimierung von Bauteilzuständen bei. Diese Verfahren sind jedoch auf zusätzliche Anlagen, Nebenaggregate und Werkzeuge angewiesen, oder in der Prozessführung begrenzt. Ziel der Bearbeitungsstrategie Komplementärzerspanung ist diese zusätzlichen Aufwendungen zu reduzieren.



Vorgehen und Methoden

Die Bearbeitungsstrategie Komplementärzerspanung verfolgt den Ansatz, die Prozessschritte Zerspanung und anschließende mechanische Oberflächenbehandlung zu kombinieren. Diese beiden Prozesse werden ohne Werkzeugwechsel in der gleichen Bauteileinspannung unter Verwendung des Zerspanungswerkzeugs durchgeführt. Dabei verfährt das Zerspanungswerkzeug nach der Zerspannung in entgegengesetzter Bearbeitungsrichtung über die Bauteiloberfläche. Eine schematische Darstellung der Eingriffsverhältnisse bei der Komplementärzerspanung im Außenlängsdrehen ist in Abbildung 21 gezeigt. Die mechanische Oberflächenbehandlung unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges induziert eine plastische Verformung in der Bauteilrandschicht, wodurch die Bauteilzustände gezielt beeinflusst werden können.

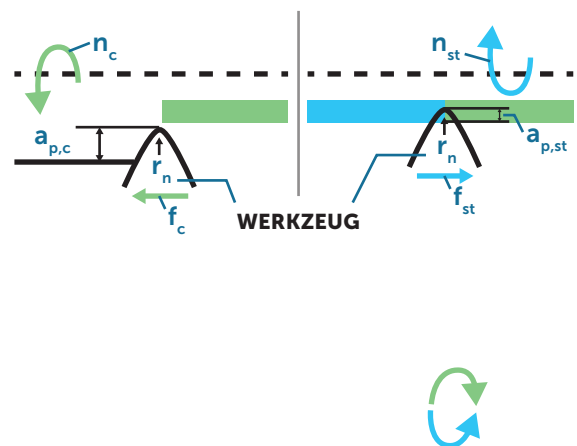
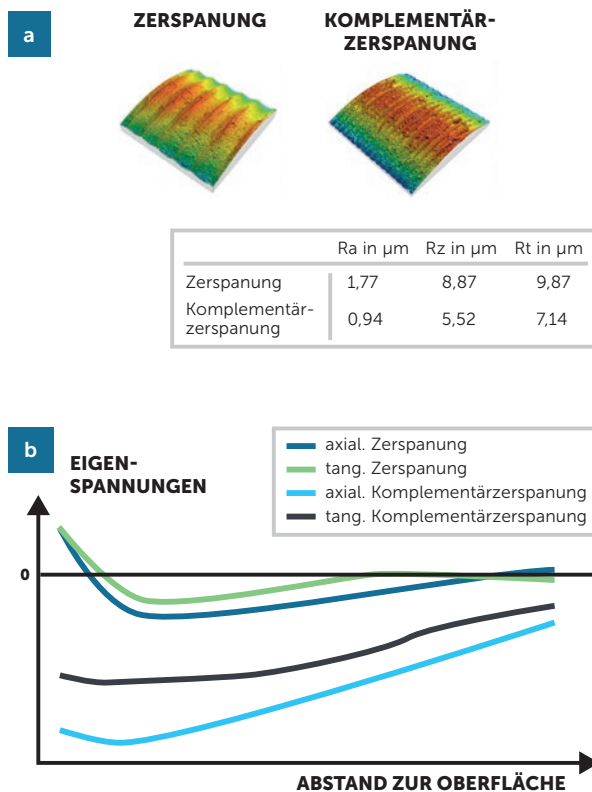


Abb. 20: (a) Topographie und (b) Eigenspannungen nach der Zerspanung bzw. Komplementärzerspanung von 42CrMo4 (Gerstenmeyer, Zanger, Schulze 2018).

Abb. 21: Schematische Darstellung der Eingriffsverhältnisse und experimentelle Umsetzung der Komplementärzerspanung beim Außenlängsdrehen (Gerstenmeyer, Zanger & Schulze 2018).



Ausgewählte Ergebnisse

Die Bearbeitungsstrategie Komplementärzerspanung wurde erstmals systematisch bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4 (AISI4140) im Außenlängsdrehen entwickelt und analysiert (Gerstenmeyer 2018). Zielgrößen waren neben der resultierenden Gefügestruktur und Mikrohärtze auch die Topographie und die Eigenspannungen. Infolge der elastisch-plastischen Verformungen in der Randschicht während der Komplementärzerspanung kommt es im Zuge einer Kornfeinerung zu sog. nanokristallinen Randschichten. Die Dicke dieser nano-kristallinen Randschicht beläuft sich auf bis zu 15 μm . Hinsichtlich der resultierenden Mikrohärtze konnten durch die Komplementärzerspanung Steigerungen von etwa 45 % im Vergleich zu herkömmlich zerspannten Oberflächen nachgewiesen werden. Abbildung 20a zeigt die resultierende Rauheit nach der Zerspanung und Komplementärzerspanung. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduzierung der Rauheitskennwerte durch die Komplementärzerspanung. Die resultierenden Rauheitskennwerte nach der Komplementärzerspanung sind mit denen nach dem Kugelstrahlen vergleichbar. Darüber hinaus wurden hohe Druckeigenspannungen nach der Komplementärzerspanung gemessen (vgl. Abbildung 20b). Diese liegen auf dem Niveau des Festwalzens oder sogar leicht darüber.

Die Randschichtanalysen haben gezeigt, dass durch die Komplementärzerspanung lebensdauersteigernde Randschichtzustände eingestellt werden können. In zyklischen Schwingfestigkeitsversuchen konnte gezeigt werden, dass diese Randschichtzustände einen positiven Einfluss auf die Bauteillebensdauer haben. So konnte im Vergleich zur Zerspanung bei der Komplementärzerspanung der Ort des Anrisses weg von der Oberfläche ins Volumen verlagert werden (vgl. Abbildung 22a). Zyklische Schwingfestigkeitsversuche (Zug-Druck) haben ergeben, dass die Dauerfestigkeit von komplementärzerspannten Proben vergleichbar mit denen nach dem Kugelstrahlen ist und sogar oberhalb des Festwalzens liegt (vgl. Abbildung 22b).

Die vielfältigen Analysen im Bereich der mechanischen Oberflächenbehandlung und hybriden Prozessen zeigen, dass Randschichtzustände die Lebensdauer bei schwingender Beanspruchung positiv beeinflussen. Dabei kommt es darauf an unter welchen Randbedingungen die Bearbeitung erfolgt. So können die wir-

kenden thermomechanischen Lasten die Stabilität der Randschichtzustände beeinflussen. Daraus folgt, dass mittels geeigneter Prozessführung die gewünschten Bauteileigenschaften gezielt eingestellt werden können und so ein wichtiger Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden kann.

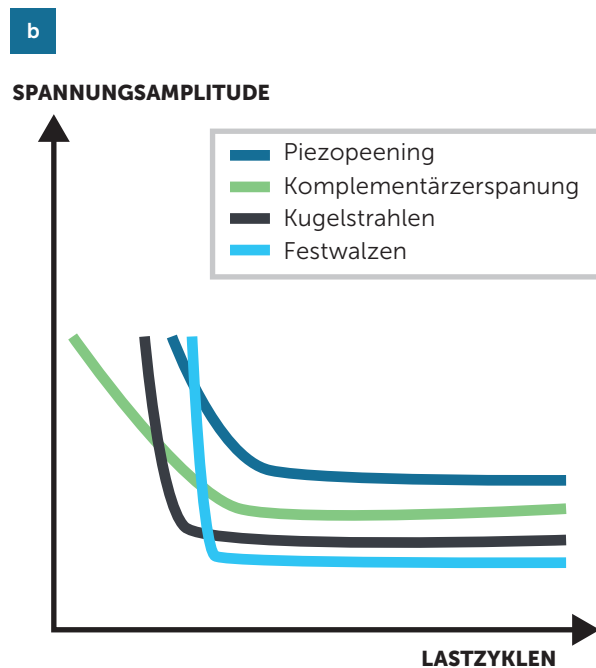
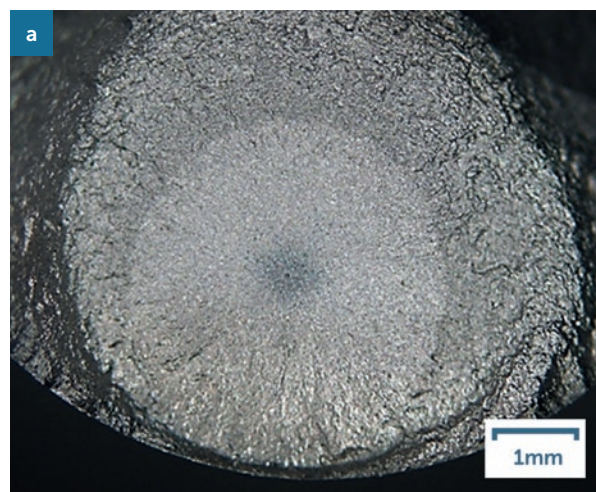


Abb. 22: (a) Analyse der Bruchfläche sowie (b) der Schwingfestigkeit nach der Komplementärzerspannung von 42CrMo4 (Lienert et al. 2014; Gerstenmeyer, Zanger & Schulze 2018)

Zusammenfassung und Ausblick

Der Randschichtzustand eines Bauteils kann u.a. durch die Topographie, die Härte bzw. Verfestigung, das Gefüge und den Eigenspannungszustand beschrieben werden.

Der Randschichtzustand eines Bauteils kann u.a. durch die Topographie, die Härte bzw. Verfestigung, das Gefüge und den Eigenspannungszustand beschrieben werden. Durch den gezielten Einsatz der Fertigungsprozesse kann dieser Randschichtzustand beeinflusst werden, was wiederum die Bauteileigenschaften u.a. bei schwingender, tribologischer und korrosiver Beanspruchung bestimmt. Die gezielte Ausnutzung eines in Fertigungsprozessen robust eingestellten Randschichtzustands kann also zu verbesserten Bauteillebensdauern bzw. -zuverlässigkeiten führen. Die Applikation dieser Prozesse in technische Anwendungen führt zu Ressourceneffizienzeffekten. Diese können nur gemeinsam im Produktentstehungsprozess von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Werkstofftechnik gehoben werden.

Signifikante Herausforderungen stellen hierbei aktuell die robuste und effiziente Erfassung des Randschichtzustands im Prozess sowie die dynamische Vorsteuerung und Regelung von Zerspanungsprozessen hinsichtlich der Randschichtzustände dar.

Ziel zukünftiger Forschung ist es, für Zerspanungsprozesse unter kombinierter Nutzung von inprocess einsetzbarer Softsensorik und Prozesswissen in Form von Prozess-, Geometrie- und Werkstoffmodellen dynamische Vorsteuerungen bzw. -regelungen aufzubauen, die es gestatten, in metallischen Bauteilen gleichzeitig definierte Geometrien und Randschichtzustände einzustellen. Parallel sollen auch die hybriden Fertigungsprozesse weiterentwickelt werden um bisher ungenutzte Ressourceneffizienzpotentiale zu nutzen.

Damit sollen diese Randschichtzustände und somit auch die Eigenschaften der gefertigten Bauteile auch bei Vorliegen von beobachtbaren Störgrößen (wie zum Beispiel Maschinenschwingungen) oder verborgenen Störgrößen (wie zum Beispiel Werkzeugverschleiß bzw. Schartigkeit im Eingriff und streuende Materialeigenschaften) im Prozess sichergestellt werden



Bild: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

Literaturangaben

Seite 6

Emec, S.; Stock, T.; Bilge, P.; Tufinkgi, P.; Kaden, C. & Seliger G. (2013), Studie: Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie. VDI ZRE Publikationen: Studien, Hrsg. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

Seite 8-9

Gonçalves, José Lucio; Mello, José Daniel Biasoli de & Costa, Henara Lillian (2019), Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach. *Wear*, vol. 426-427, pp. 1523-1535.

Ralston, K. D. & Birbilis, N. (2010), Effect of Grain Size on Corrosion: A Review. *CORROSION*, vol. 66(7):075005-075005-13.

Wang, B.; Yin, Y.; Gao, Z.; Hou, Z.; & Jiang, W. (2017), Influence of the ultrasonic surface rolling process on stress corrosion cracking susceptibility of high strength pipeline steel in neutral pH environment. *RSC Advances*, vol. 59, pp. 36876-36885.

Wolff, K.; Liu, Z.; Braun, D.; Schneider, J. & Greiner, C. (2016), Chronology of the microstructure evolution for pearlitic steel under unidirectional tribological loading. *Tribology International*, vol. 102, pp. 540-545.

Seite 10-13

Bhaduri, D.; Batal, A.; Dimov, S.; Zhang, Z.; Dong, H.; Fallqvist, M. & M'Saoubi, R. (2017), On Design and Tribological Behaviour of Laser Textured Surfaces. *Procedia CIRP*, vol. 60, pp. 20-25.

Bernardos, P.G. & Vosniakos, G.-C. (2002), Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 833-844.

Chokshi, A.; Rosen, A.; Karch, J. & Gleiter, H. (1989), On the validity of the hall-petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metallurgica*, vol. 23, pp. 1679-1683.

Conradi, M.; Drnovšek, A. & Gregorčič, P. (2018), Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles. *Scientific Reports*, vol. 8(1): 7457.

Fallqvist, M.; Schultheiss, F.; M'Saoubi, R.; Olsson, M. & Ståhl J.E. (2013), Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I experimental observations of contact conditions. *Wear*, vol. 298-299, pp. 87-98.

Hall, O.E. (1951), The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society, Section B*, vol. 64, pp. 747-753.

Kloos, K.-G. & Braisch, P.K. (1982), Über die Wirkung der lokalen Dauerfestigkeit auf die Schwingfestigkeit von Proben und Bauteilen. *Härterei Technische Mitteilungen*, Bd. 37, S. 83-91.

Macherauch, E. & Wohlfahrt, H. (1985), Eigenspannungen und Ermüdung, Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe. DGM-Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, S. 237-283.

Moravčíková, J.; Moravcik, R.; Kusý, M. & Necpal, M. (2018), Influence of Laser Surface Texturing on Tribological Performance of Tool Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27(10), pp. 5417-5426.

Okorokov, V.; Morgantini, M.; Gorash, Y.; Comlekci, T.; Mackenzie, D. & van Rijswick, R. (2018), Corrosion fatigue of low carbon steel under compressive residual stress field. *Procedia Engineering*, vol. 213, pp. 674-681.

Petch, N.J. (1953), The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 174, pp. 25-28.

Ripoll, M.R.; Simič, R.; Brenner, J. & Podgornik, B. (2013), Friction and Lifetime of Laser Surface-Textured and MoS₂-Coated Ti6Al4V Under Dry Reciprocating Sliding. *Tribology Letters*, vol. 51(2), pp. 261-271.

Scherge, M. (2018), The Running-in of Lubricated Metal-Metal Contacts - A Review on Ultra-Low Wear Systems. *Lubricants*, vol. 6(2):54.

Scholtes, B. & Macherauch, E. (1986), Auswirkungen mechanischer Randschichtverformungen auf das Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe. *Zeitschrift für Metallkunde*, Bd. 77(5), S. 322-337.

Shakhvorostov, D.; Poehlmann, K. & Scherge, M. (2006), Structure and mechanical properties of tribologically induced nanolayers. *Wear*, vol. 260, pp. 433-437.

Song, H.W.; Guo, S.R. & Hu, Z.Q. (1999), A coherent polycrystal model for the inverse Hall-Petch relation in nanocrystalline materials. *Nanostructured Materials*, vol. 11(2), pp. 203-210.

Weertman, J.R. (1993), Hall-Petch strengthening in nanocrystalline metals. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 166(1-2).

Seite 20-21

Ambrosy, F., Zanger, F. & Schulze, V. (2015), FEM-simulation of machining induced nanocrystalline surface layers in steel surfaces prepared for tribological applications. *CIRP-Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 69-72.

Berlet, P.; Dienwiebel, M. & Scherge, M. (2010), The effect of sample finishing on the tribology of metal/metal lubricated contacts. *Wear*, vol. 268, pp. 1518-1523.

Blau, P.J. (1991), Running-in: Art or Engineering?. *Journal of Materials Engineering*, vol. 13(1), pp. 47-53.

Linsler, D. (2016), Einlaufverhalten einer untereutektischen AlSi-Legierung unter Berücksichtigung des Randzonengefüges. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Linsler, D.; Schröckert, F. & Scherge, M. (2016), Influence of subsurface plastic deformation on the running-in behavior of a hypoeutectic AlSi alloy. *Tribology International*, vol. 100, pp. 224-230.

Segebade, E.; Kümmel, D.; Zanger, F.; Schneider, J. & Schulze, V. (2018), Influence of cutting edge asymmetry on grain refinement of Ti6Al4V. *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 232-237.

Segebade, E.; Zanger, F.; Schulze, V. (2016), Influence of different asymmetrical cutting edge micro-geome-tries on surface integrity. *Procedia CIRP*, vol. 45, pp. 11-14.

Volz, J. (1977), Erstellung Optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

Seite 22-23

Chen W.; M Zheng L.; Huo D. & Chen Y. (2018), Surface texture formation by non-resonant vibraton assisted micro milling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 28:025006-11.

Hosseinabadi H.N.; Sajjady S.A. & Amini, S. (2018) Creating micro textured surfaces for the improvement of surface wettability through ultrasonic vibration assisted turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 2825-2839.

Schubert A.; Zhang, R. & Steinert, P. (2013), Manufacturing oft twist-free surfaces by hard turning. *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 294-298.

Segebade E.; Kümmel D.; Zanger F.; Schneider J. & Schulze V. (2018), Surface texturing of TiAl6V4 using cutting tools in reverse. *Procedia Manufacturing*, vol. 18, pp. 97-103.

Seite 24-27

Amanov, A.; Tsuboi, R.; Oe, H.& Sasaki S., The influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction and wear behavior. *Tribology International*, vol. 60, pp. 216-223.

Braun, D. (2015), Größeneffekte bei strukturierten tribologischen Oberflächen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Greiner, C. & Schäfer, M. (2015), Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties. *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 10(4).

Hu, T., Hu, L. & Ding, Q. (2012), The effect of laser surface texturing on the tribological behavior of Ti-6Al-4V. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 226(10), pp. 854-863.

Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G. & Etsion, I. (2005), The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. *Tribology International*, vol. 38(3), pp. 219-225.

Kümmel, D.; Hamann-Schroer, M.; Hetzner, H. & Schneider, J. (2019), Tribological behavior of nano-second-laser surface textured Ti6Al4V. *Wear*, vol. 422-423, pp. 261-268.

Mishra, S.P. & Polycarpou, A.A. (2011), Tribological studies of unpolished laser surface textures under starved lubrication conditions for use in air-conditioning and refrigeration compressors. *Tribology International*, vol. 44(12), pp. 1890-1901.

Zanger F.; Kacaras A.; Neuenfeldt P. & Schulze V.; (2019), Optimization of the stream finishing process for mechanical surface treatment by numerical and experimental process analysis. *CIRP Annals*, vol. 68(1), pp. 373-376.

Seite 28-29

Wick, A.; Schulze, V. & Vöhringer, O. (1999), Kugelstrahlen bei erhöhter Temperatur mit einer Druckluftstrahlanlage. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Bd. 30, S. 269-273.

Seite 30-31

Kloos, K. H. & Adelman, J. (1988), Schwingfestigkeitssteigerung durch Festwalzen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Bd. 19(1), S. 15-23.

Meyer, D. (2012), Cryogenic deep rolling - An energy based approach for enhanced cold surface hardening. *CIRP Annals*, vol. 61, pp. 543-546.

Meyer, D.; Brinksmeier, E. & Hoffmann, F. (2011), Surface hardening by cryogenic deep rolling. *Procedia Engineering*, vol. 19, pp. 258-263.

Seite 32-33

Maiß, O. (2019), Lebensdauererhöhung von Wälzlagern durch mechanische Bearbeitung. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover.

Seite 34-35

Gerstenmeyer, M. (2018), Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Gerstenmeyer, M.; Zanger, F. & Schulze, V. (2018), Influence of Complementary Machining on fatigue strength of AISI 4140. *CIRP Annals*, vol. 67(1), pp. 583-586.

Lienert, F.; Hoffmeister, J.; Erz, A. & Schulze, V. (2014), Influence of Piezo Peening on the Fatigue Strength of quenched and tempered AISI 4140. *ICSP*, pp. 517-522.

Bildquellen

Titelseite: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

Seite 2: shutterstock / Pixel B, bearbeitet von DER PUNKT

Kontakt und Impressum

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Institutsleiter Fertigungs- und Werkstofftechnik

wbk Institut für Produktionstechnik

Tel.: +49 721 608-42440

Volker.Schulze@kit.edu

Herausgeber

wbk Institut für Produktionstechnik am KIT

Karlsruhe

www.wbk.kit.edu

Gestaltung

DER PUNKT GmbH

Karlsruhe

www.derpunkt.de

Autoren

Volker Schulze,

Michael Gerstenmeyer,

Eric Segebade, Jannis Langer

Druck

Stober GmbH

Eggenstein

www.stober.de



