

Bauteiloptimierung mittels Piezopeening -
Auswirkungen auf den Randschichtzustand und
die Schwingfestigkeit von 42CrMo4 V450

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Franziska Lienert

Tag der mündlichen Prüfung: 13.02.2107

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Berthold Scholtes



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand	3
2.1	Mechanische Oberflächenbehandlung	3
2.1.1	Elementarprozesse	3
2.1.2	Randschichtzustand nach mechanischer Oberflächenbehandlung	7
2.1.3	Kugelstrahlen	9
2.1.4	Festwalzen	12
2.1.5	Maschinelles Oberflächenhämmern	14
2.2	Auswirkung des Randschichtzustands auf die Schwingfestigkeit	24
2.2.1	Befunde	24
2.2.2	Stabilität der Eigenspannungen	25
3	Werkstoff und Probengeometrie	27
3.1	Werkstoff und Wärmebehandlung	27
3.2	Probengeometrien	28
3.2.1	Probengeometrie für die Parameterstudien	28
3.2.2	Probengeometrie für die Untersuchung der Lebensdauer	28
3.3	Charakterisierung des Ausgangszustands	29
3.3.1	Flachproben	29
3.3.2	Rundproben	29
4	Versuchseinrichtungen und -durchführung	33
4.1	Mechanische Oberflächenbehandlung	33
4.1.1	Piezopeening	33
4.1.2	Vergleichende Zustände	39
4.2	Randschichtcharakterisierung	40
4.2.1	Eigenspannungsmessung	40
4.2.2	Bestimmung der Oberflächentopographie	41
4.3	Mechanische Beanspruchung	41
4.3.1	Zyklische Versuche	41

4.3.2	Fraktographie	41
5	Parametervariationen beim Piezopeening	43
5.1	Einfluss der Amplitude auf den Randschichtzustand	44
5.1.1	Rauheit	45
5.1.2	Eigenspannungszustand	47
5.1.3	Verfestigungszustand	47
5.2	Einfluss des Bahnabstands auf den Randschichtzustand	48
5.2.1	Rauheit	48
5.2.2	Eigenspannungszustand	51
5.2.3	Verfestigungszustand	51
5.3	Einfluss des Vorschubs auf den Randschichtzustand	53
5.3.1	Rauheit	53
5.3.2	Eigenspannungszustand	55
5.3.3	Verfestigungszustand	56
5.4	Einfluss des Hammerkopfdurchmessers auf den Randschichtzustand	56
5.4.1	Rauheit	57
5.4.2	Eigenspannungszustand	57
5.4.3	Verfestigungszustand	59
5.5	Einfluss der Hammerkopfhärte auf den Randschichtzustand	60
5.5.1	Rauheit	60
5.5.2	Eigenspannungszustand	61
5.5.3	Verfestigungszustand	63
5.6	Diskussion des Einflusses verschiedener Prozessparameter	63
5.6.1	Amplitude	63
5.6.2	Bahnabstand	66
5.6.3	Vorschub	68
5.6.4	Hammerkopfdurchmesser	71
5.6.5	Hammerkopfhärte	74
5.6.6	Zusammenfassung der Prozessparametereinflüsse	77
6	Lebensdaueruntersuchungen	83
6.1	Piezopeening	83
6.2	Vergleichende Zustände	88
6.2.1	Randschichtzustand und Wöhlerkurve nach dem Kugelstrahlen	88
6.2.2	Randschichtzustand und Wöhlerkurve nach dem Festwalzen	93
6.3	Diskussion	96
6.3.1	Auswahl des Zustands mit der höchsten Lebensdauer	96
6.3.2	Randschichtzustand nach Piezopeening	99

6.3.3	Vergleich des Randschichtzustands	101
6.3.4	Vergleich der Wöhlerkurven	102
7	Zusammenfassung	109

1 Einleitung

Eine hoch beanspruchte Stelle eines Bauteils ist die Randschicht. Eine Möglichkeit die Eigenschaften der Randschicht zu verbessern, ist sie einer mechanischen Oberflächenbehandlung zu unterziehen. Hier haben sich im Laufe der Zeit das Verfestigungsstrahlen, im Folgenden Kugelstrahlen genannt, und das Festwalzen als Standardverfahren entwickelt. Kugelstrahlen führt durch die stochastisch verteilten Einschläge zu einem isotropen Eigenspannungszustand mit ein paar 100 μm Eindringtiefe. Die Stoßimpulse der Kugeln führen zu einer plastischen Verformung mit hohen Dehnraten, welche hohe Verfestigungen ermöglichen. Die Oberflächenrauheit steigt im Allgemeinen durch das Kugelstrahlen an.

Im Vergleich zum Kugelstrahlen können beim Festwalzen sehr hohe Druckeigenspannungen bis in Tiefen von einem Millimeter und mehr induziert werden. Durch die gerichtete Bearbeitung ist der Eigenspannungszustand anisotrop. Die auftretenden Dehnraten sind deutlich geringer als beim Kugelstrahlen, so dass die Verfestigungswirkung geringer ausfällt. Allerdings kann durch das Festwalzen die Oberflächenrauheit deutlich reduziert werden.

Der vorliegende Verfestigungsmechanismus ist Kaltverformung bzw. Versetzungsverfestigung. Bei hohen Dehnraten wird die Möglichkeit des Quergleitens von Schraubenversetzungen eingeschränkt. Es kommt demzufolge weniger zur Versetzungsumordnung und die Versetzungsdichte kann steigen. Aus diesem Grund kommt es bei höheren Dehnraten eher zu einer Verfestigungswirkung im Material.

In den letzten Jahren wurden einige alternative mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren entwickelt. Ein Großteil der Verfahren beruht darauf, dass ein schwingenden Indenter, Hammerkopf genannt, Einschläge auf der Werkstückoberfläche hinterlässt während er gerichtet über die Oberfläche bewegt wird. Diese Verfahren werden als maschinelles Oberflächenhämmern bezeichnet (VDI-Richtlinie 3416 im Gründruck). Dabei gibt es verschiedene Arten, wie die Bewegung des Hammerkopfes realisiert werden kann: Pneumatisch, elektromagnetisch, piezoelektrisch oder magnetostraktiv. Bei letzterem wird in der Regel ein Element zur Verstärkung der Amplitude verwendet, welches nur in Resonanz, also bei einer bestimmten Frequenz möglich ist. Weiterhin verändert sich die Amplitude unter Last und entspricht nicht der vor-

gegebenen Amplitude einer freien Schwingung. Man unterscheidet dabei zwischen direkt-sonotrodengetrieben (starre Kopplung zwischen Schwingungserreger und Hammerkopf) und sonotrodengetrieben (lose Verbindung) Verfahren.

In dieser Arbeit geht es um ein maschinelles Oberflächenhämmerverfahren mit piezoelektrischem Antrieb ohne Verstärkung der Amplitude. Der Hammerkopf wird hierfür direkt am Aktor befestigt. Dadurch muss ein Piezoaktor mit relativ hohem Stellweg verwendet werden, was die maximal möglichen Frequenzen reduziert. Allerdings bietet es den Vorteil, nicht auf eine Frequenz festgelegt zu sein, sondern die Frequenz in gewissem Rahmen frei einstellen zu können. Zusätzlich kann ein am Piezoaktor angebrachter Dehnmessstreifen (DMS) Aussagen über die Änderung der Amplitude liefern. Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit dem Einfluss verschiedener Prozessparameter auf den Randschichtzustand von Proben aus vergütetem 42CrMo4. Es wird der Effekt von verschiedenen Amplituden, Bahnabständen, Vorschubgeschwindigkeiten, Hammerkopfdurchmessern und Hammerkopfhärten auf die Oberflächenrauheit sowie den Eigenspannungs- und den Verfestigungszustand untersucht. Im zweiten Teil wird der Einfluss von Piezopeening auf die Schwingfestigkeit untersucht und zur Bewertung und Einordnung des Potenzials des Verfahrens mit den konventionellen Verfahren Kugelstrahlen und Festwalzen verglichen. Hierfür werden Rundproben verwendet, die im Gegensatz zu Flachproben den Vorteil aufweisen, die Messungen nicht durch Kantenefekte zu verfälschen. Die Proben wurden axial mit einem Spannungsverhältnis von $R=-1$ untersucht. Da der Randschichtzustand von den Flachproben nicht direkt auf die Rundproben übertragbar ist, wurden für alle drei Verfahren verschiedene Parameterkombinationen zunächst bei einem Lasthorizont im Zeitfestigkeitsbereich miteinander verglichen und für den Zustand mit der höchsten durchschnittlichen Lastspielzahl eine Wöhlerkurve erstellt. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Wechselfestigkeitsergebnisse anhand des Lebensdauermodells nach Goodman.

2 Kenntnisstand

2.1 Mechanische Oberflächenbehandlung

Bei einer mechanischen Oberflächenbehandlung wird die Randschicht eines Werkstücks durch einen Energieeintrag eines geeigneten Werkzeugs elastisch-plastisch verformt [1]. Dieser Energieeintrag kann statisch oder stoßartig sowie mit oder ohne Relativbewegung geschehen [2]. Ziel der mechanischen Oberflächenbehandlung ist es, die Widerstandsfähigkeit der Randschicht gegen Schädigungen infolge schwingender, tribologischer und korrosiver Beanspruchung zu verbessern [1].

In Abbildung 2.1 ist eine Übersicht verschiedener mechanischer Oberflächenbehandlungsverfahren in Abhängigkeit der Lastaufbringung und der Aufprallgeschwindigkeit auf der Werkstückoberfläche. Es gibt einerseits nicht geführte Verfahren wie das Kugelstrahlen und das Ultraschallkugelstrahlen, die sich durch stochastische Kugeleinschläge auszeichnen. Andererseits gibt es die geführten Verfahren wie das Festwalzen und die maschinellen Oberflächenhämmerverfahren. Hierbei erfolgt die Bearbeitung mit einem geführten Werkzeug, welches wie beim Festwalzen durch einen kontinuierlichen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück charakterisiert ist. Im Fall des maschinellen Oberflächenhämmerns liegt eine periodische Bewegung vor, die auch von einem kontinuierlichen Kontakt überlagert werden kann.

2.1.1 Elementarprozesse

Die Mechanismen bei der mechanischen Oberflächenbehandlung können grundsätzlich mit Hilfe von zwei Modellen für Elementarprozesse beschrieben werden: die Hertz'sche Pressung [4] und die plastische Streckung [5]. In Abbildung 2.2 sind die dabei auftretenden Spannungen dargestellt. Bei der plastischen Streckung wird davon ausgegangen, dass durch viele Einschläge die unmittelbare Oberfläche maximal plastisch gestreckt wird. Die maximalen Eigenspannungen treten meist direkt an der Oberfläche auf und nehmen in die Tiefe hin ab. Bei der Hertz'schen Pressung kommt es durch Kräfte senkrecht zur Oberfläche zur Ausbildung eines mehrachsigen

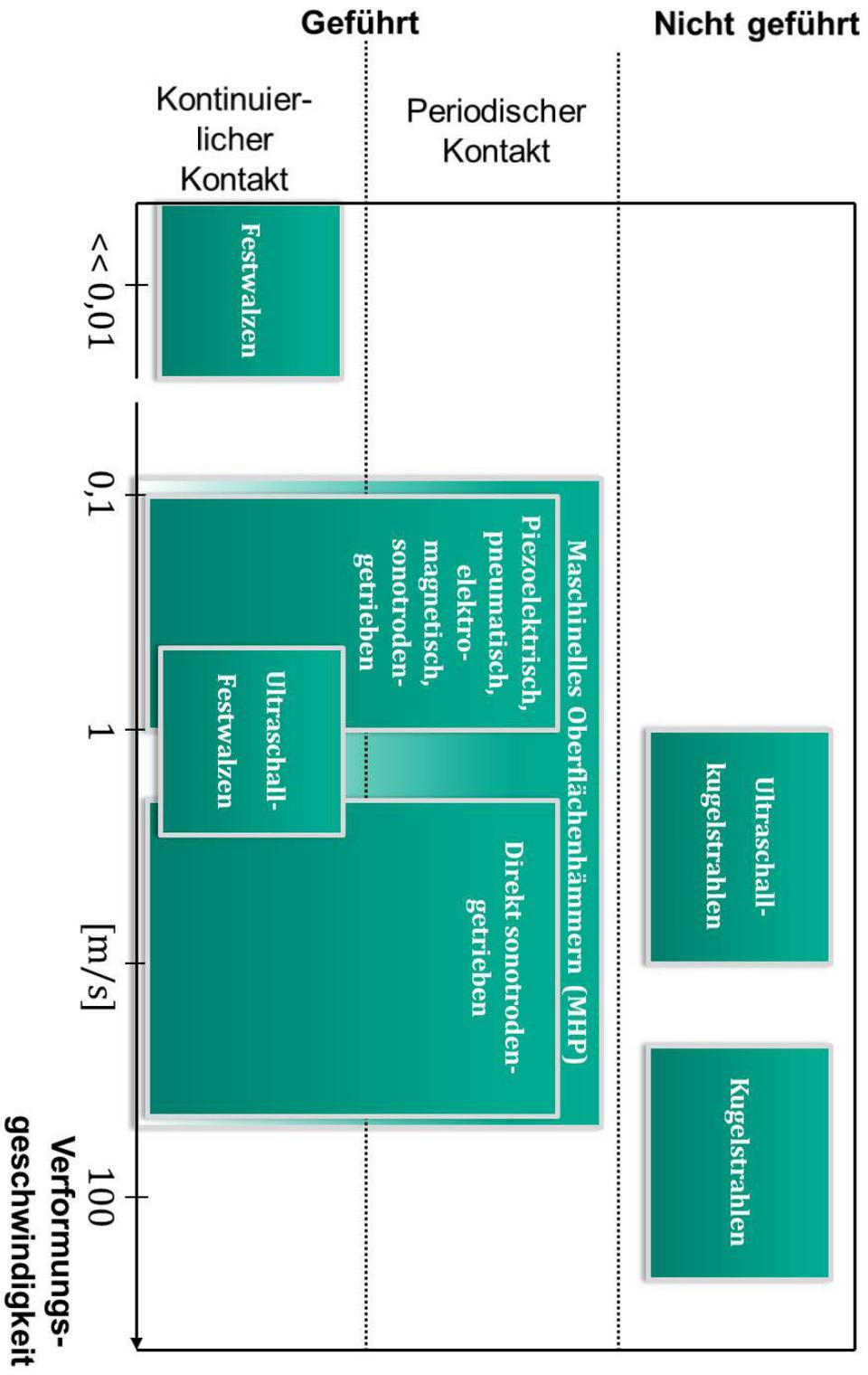


Abbildung 2.1: Übersicht über verschiedene Verfahren zur mechanischen Oberflächenverfestigung. Gegenüberstellung der Art der Lastaufbringung und der Verformungsgeschwindigkeit der Randschicht (berechnet aus Frequenz und Amplitude) [3].

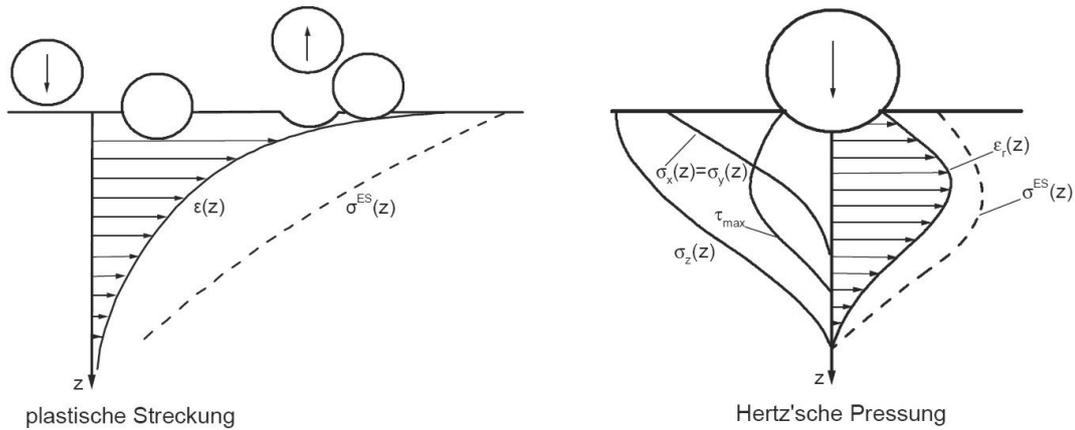


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Elementarprozesse [5].

Spannungszustands und einem Schubspannungmaximum unterhalb der Oberfläche. Daraus resultieren die maximalen Deformationen und damit auch die maximalen Eigenspannungen unterhalb der Oberfläche. Für einen Kugel-Ebene Kontakt kann laut [6] die maximale Hertz'sche Pressung p_{max} nach

$$p_{max} = \sqrt[3]{\frac{6F}{\pi^3 \cdot d^2} \cdot \left(\frac{E}{1 - \nu^2}\right)^2} \quad (2.1)$$

mit der Kraft F und dem Kugeldurchmesser d berechnet werden. Dabei ist der Kehrwert des reduzierten E-Modul, $\frac{1-\nu^2}{E}$,

$$\frac{1 - \nu^2}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right), \quad (2.2)$$

wobei E_1 und ν_1 den E-Modul bzw. die Querkontraktionszahl der Kugel und E_2 und ν_2 des Werkstücks bezeichnet.

Der Eindruckradius a ergibt sich nach

$$a = \sqrt[3]{\frac{3F(1 - \nu^2)d}{4E}}. \quad (2.3)$$

Die Verteilung der Spannung entlang der Oberfläche $p(r)$ lässt sich anhand der Gleichung

$$p(r) = \frac{3}{2} \bar{p} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (2.4)$$

mit der mittleren Spannung

$$\bar{p} = \frac{F}{\pi a^2} \quad (2.5)$$

berechnen. Die maximale Hertz'sche Pressung in diesem Fall liegt aufgrund der Beanspruchung in der Kugel vor. Die Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$, $\sigma_r(z)$ und $\sigma_\theta(z)$, abhängig von der Tiefe z im Werkstück, können nach

$$\sigma_z(z) = -\frac{3}{2}\bar{p} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{a}\right)^2} \quad (2.6)$$

und

$$\sigma_r(z) = \sigma_\theta(z) = -\frac{3}{2}(1 + \nu)\bar{p} \cdot \left[1 - \frac{z}{a} \arctan\left(\frac{a}{z}\right)\right] + \frac{3}{4}\bar{p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{z}{a}\right)^2 + 1} \quad (2.7)$$

berechnet werden. Aus Gleichung 2.6 und Gleichung 2.7 ergibt sich die Tiefenverteilung der Vergleichspannung nach von Mises $\sigma_v(z)$:

$$\sigma_v(z) = \left| \frac{3}{2}(1 + \nu)\bar{p} \cdot \left[1 - \frac{z}{a} \arctan\left(\frac{a}{z}\right)\right] - \frac{9}{4}\bar{p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{z}{a}\right)^2 + 1} \right| \quad (2.8)$$

Aus der Gleichung 2.8 ergibt sich, dass die maximale Spannung im Werkstück $0,31 p_{max}$ ist und in einer Tiefe $0,47 a$ vorliegt. In Abbildung 2.3 ist für den Fall Kugel-Ebene der Tiefenverlauf der Spannungskomponenten im Zentrum des Eindrucks dargestellt.

Aus dem Bereich der Härtemessung mit Kugelindenter ist bekannt, dass eine plastische Verformung des Materials erst stattfindet, wenn die mittlere Spannung $\bar{p} \approx 1,1R_{es}$ beträgt. Erst ab einer mittleren Spannung von $\bar{p} \approx 2,8R_{es}$ ist das gesamte Material um den Eindruck vollständig plastifiziert [7].

Abhängig von den im Prozess auftretenden Kräften kommt es zu einer plastischen Streckung, zu einer Hertz'schen Pressung oder zu einer Mischung aus beidem. Allerdings sind diese Effekte nur Modellvorstellungen und stellen die Vorgänge im Material lediglich vereinfacht dar. Die Theorie der Hertz'schen Pressung geht beispielsweise von einer rein elastischen Verformung aus und zudem kann die Temperatur einen Einfluss auf die Vorgänge im Material haben. Zudem ist bekannt, dass Reibungseffekte [8] oder Tangentialkräfte [9] dazu führen, dass die maximalen Spannungen in Richtung Oberfläche verschoben werden.

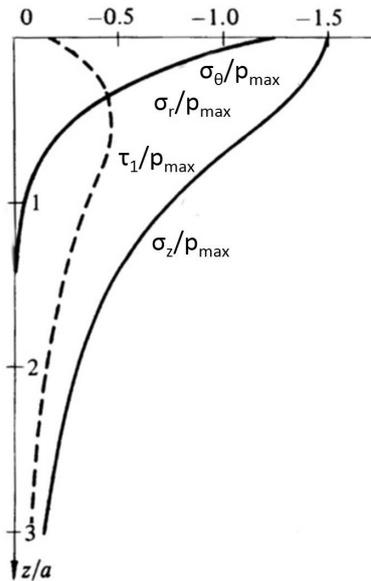


Abbildung 2.3: Tiefenverlauf der Spannungskomponenten im Mittelpunkt des Kugel-Ebenenkontaktes bei elastischem Hertz'schen Kontakt [6].

2.1.2 Randschichtzustand nach mechanischer Oberflächenbehandlung

Durch mechanische Oberflächenbehandlung können die Randschichteigenschaften eines Materials gezielt beeinflusst werden. In Abbildung 2.4 sind die charakteristischen Kenngrößen nach mechanischer Oberflächenbehandlung schematisch dargestellt. Auf den Einfluss auf die Oberflächentopographie, hier als Rauheit (R_z, R_a) dargestellt, die Eigenspannungen (σ^{ES}) und Halbwertsbreiten (HWB) bzw. Mikrohärtigkeit (HV) als Maß für den Verfestigungszustand wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

2.1.2.1 Oberflächentopographie

Eine mechanische Oberflächenbehandlung führt in der Regel zu einer Änderung der Oberflächentopographie und dadurch zu einer Änderung der Rauheit. Die Topographieänderungen reichen vom Einglätten der Rauheitsspitzen bis zum Hinterlassen von Eindrücken. Je nach Kraft, die durch das Werkzeug bzw. das Strahlmittel hervorgerufen wird, kommt es zunächst zum Einglätten der Rauheitsspitzen und anschließend zur plastischen Verformung der Oberfläche und dem Hinterlassen eines Eindrucks. Für Kugeleindrücke kommt es je nach Verfestigungsexponent am Eindruckrand zu einem Materialaufwurf oder zu einem Materialeinzug [11]. Abhängig von der Art der Bearbei-

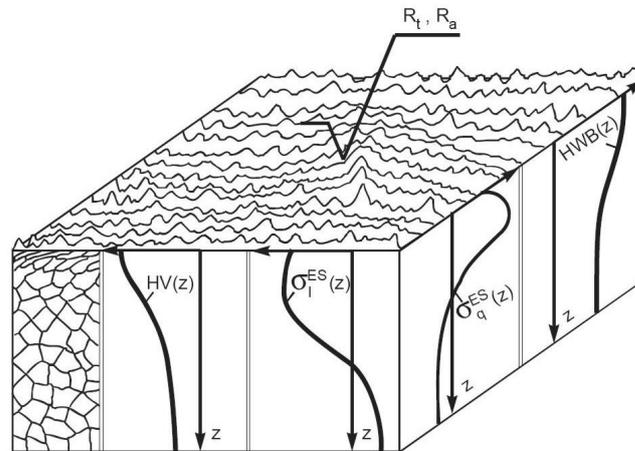


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Randschichteigenschaften nach mechanischer Oberflächenbehandlung [10].

ung, regellos oder regelmäßig, kommt es zu einer statistischen Oberflächenstruktur oder zu gerichteten Oberflächenstrukturen. Ein Ziel der mechanischen Oberflächenbehandlung kann die Reduzierung der Rauheit sein, um die Kerbwirkung abzumindern.

2.1.2.2 Eigenspannungen

Durch die elastisch-plastische Verformung der oberflächennahen Schichten im Zugbereich und der elastischen Verformung der darunter liegenden Schichten kommt es zur Ausbildung von Druckeigenspannungen in der Randschicht [1]. Die Eigenspannungstiefenverläufe sind maßgeblich von den auftretenden Kräften senkrecht und parallel zur Oberfläche sowie der Wärmeentwicklung beeinflusst, wie Scholtes und Macherauch [10] am Beispiel des Kugelstrahlens schematisch dargestellt haben, siehe Abbildung 2.5. Die maximalen Druckspannungen liegen, je nachdem ob Hertz'sche Pressung oder Oberflächenstreckung dominieren, unterhalb der Oberfläche oder direkt an der Oberfläche. Aus Gleichgewichtsgründen kommt es in tieferen Bereichen zur Ausbildung von Zugeigenspannungen. Die Probengeometrie hat also einen großen Einfluss auf die Ausbildung des Eigenspannungstiefenverlaufs [12].

2.1.2.3 Verfestigung

Die plastische Verformung der Randschicht führt zu einer Versetzungsmultiplikation und dadurch zur Behinderung von weiterer Versetzungsbewegung. Das bewirkt einen

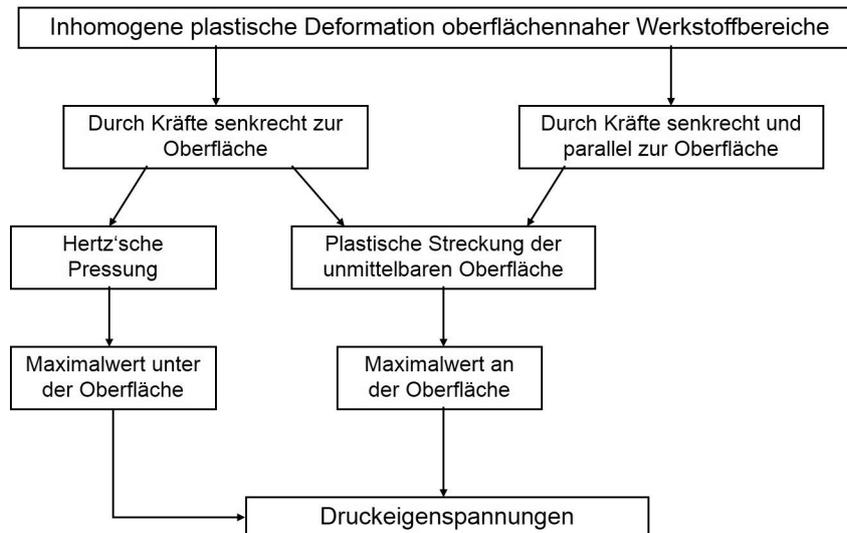


Abbildung 2.5: Einfluss der wirkenden Kräfte auf den Eigenspannungszustand nach [10].

Anstieg der Festigkeit in diesem Bereich. Dieser Effekt wird als Versetzungs- oder Kaltverfestigung bezeichnet. Allerdings hat der Ausgangszustand entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der Verfestigung. Sind im Ausgangszustand bereits viele Versetzungen vorhanden, kann es zu Versetzungsannihilationen und -umlagerungen in energetisch günstigere Strukturen kommen [13]. Es können sich sogenannte Zellstrukturen ausbilden. Dies führt zu einer Verringerung der Versetzungsdichte und damit zur Verringerung der Halbwertsbreite und der Mikrohärtigkeit, die im Allgemeinen als Maß für die Verfestigung verwendet werden. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Verformungsgeschwindigkeit. Bei hohen Dehnraten ist die Quergleitung von Schraubenversetzungen behindert, was die Umlagerung der Versetzungen zu räumlichen Strukturen verhindert [14].

2.1.3 Kugelstrahlen

Das Kugelstrahlen ist nach ASTM B851 [15] ein Verfahren zur Verfestigung der Oberfläche, bei dem die Oberfläche mit festem, rundem Strahlmittel mit relativ hoher Geschwindigkeit beschossen wird. Das Ziel der Bearbeitung ist die Erhöhung der Lebensdauer unter schwingender Beanspruchung und des Widerstands gegen Spannungsrisskorrosion.

Aufgrund der hohen Flexibilität des Kugelstrahlens eignet sich das Kugelstrahlen sowohl für einfache als auch komplexe Geometrien. Typischerweise werden Zahnräder, Federn, Wellen, Achsen, Pleuel und auch Schweißnähte kugelgestrahlt [1, 2].

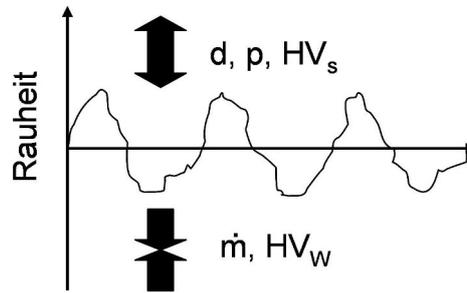


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Änderung der Rauheit durch Kugelstrahlen nach [16].

Bei der Durchführung des Kugelstrahlens gibt es die Möglichkeit mit Druckluft-, Schleuderrad-, Injektor- oder Injektorgravitationsanlagen zu arbeiten. Abhängig von der Art der Anlage gibt es unterschiedliche Prozessparameter, im Folgenden beziehen sich die Angaben auf die Ergebnisse an Druckluftkugelstrahlanlagen. Wichtige Prozessparameter sind hierbei zum einen das Strahlmittel, dessen Größe und Härte, zum anderen der Strahlendruck, der Massendurchsatz, die Strahlmittelgeschwindigkeit, die Strahlzeit und sowie die Härte des Strahlguts.

Einflüsse auf die Topographie Die Strahlmitteleinschläge sind auf der Werkstückoberfläche stochastisch verteilt, so dass die Oberfläche nach dem Strahlen mit einer Kraterlandschaft vergleichbar ist. Wie verschiedene Prozessparameter die Oberflächentopographie von unterschiedlich wärmebehandeltem 42CrMo4 beeinflussen, wurde von [16] untersucht und ist in Abbildung 2.6 zusammengefasst: Ein entscheidender Einfluss auf die Ausprägung der Krater ist die Härte des Werkstücks. Je härter das Werkstück, desto geringer die Rauheitssteigerung, was in der größeren Verformungstiefe bei weichem Grundmaterial begründet ist, siehe auch [17]. Auch eine Erhöhung des Massendurchsatzes bewirkt niedrigere Rauheitswerte. Das liegt daran, dass bei höherem Massendurchsatz die einzelnen Strahlmittelpartikel öfter gegeneinander stoßen und somit schon einen Teil ihrer kinetischen Energie verlieren, bevor sie auf das Werkstück treffen. Mit steigender Strahlmittelhärte und -größe kommt es im Gegensatz dazu zu einer Rauheitssteigerung, was auch für einen steigenden Strahlendruck gilt. Der Einfluss der Strahlmittelhärte lässt sich durch geringere Neigung zur plastischen Verformung bei steigender Härte begründen. Steigende Strahlmittelgröße und Strahlendruck führen zu einer Erhöhung der kinetischen Energie und steigern aufgrund dessen die Rauheit.

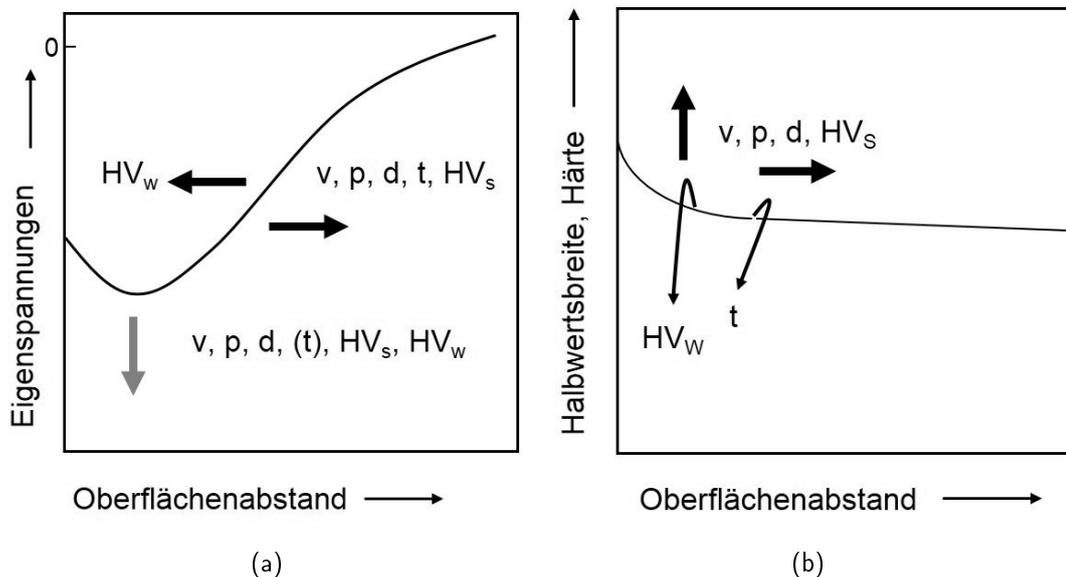


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Änderung des Eigenspannungstiefenverlaufs (a) und des Halbwertsbreitentiefenverlaufs (b) durch verschiedene Kugelstrahlparameter [18].

Einflüsse auf die Eigenspannungen Der qualitative Eigenspannungstiefenverlauf kann mit Hilfe der in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Elementarprozesse, plastische Streckung und Hertz'sche Pressung, beschrieben werden. Der Einfluss der Prozessparameter kann nach [18] Abbildung 2.7a entnommen werden. Eine Steigerung der Härte des Werkstücks führt zu höheren Oberflächeneigenspannungen und geringeren Eindringtiefen, sowie einem ausgeprägteren Druckspannungsmaximum unter der Oberfläche. Dies ist durch den mit zunehmender Härte steigenden Anteil an Hertz'scher Pressung zu erklären [5]. Allerdings konnte für 42CrMo4 bei hohen Härten auch eine Verringerung der Oberflächeneigenspannungen beobachtet werden, die maximalen Eigenspannungen nehmen mit steigender Härte jedoch zu [16]. Eine Steigerung der Strahlmittelhärte bewirkt eine Erhöhung der Eindringtiefe und der maximalen Druckeigenspannungen, wie stark sich die Effekte auswirken, hängt jedoch entscheidend vom Werkstoffzustand ab [16]. Der Strahlmitteldurchmesser, der Strahl Druck und die Strahlmittelgeschwindigkeit bestimmen die kinetische Energie, mit der das Strahlmittel auf die Werkstückoberfläche trifft. Höhere kinetische Energie führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Eindringtiefe und der maximalen Druckeigenspannungen. Die Erhöhung der Strahlzeit führt zu einer größeren Eindringtiefe der Eigenspannungen. Es ist jedoch zu beachten, dass, je nach Werkstoff und Wärmebehandlungszustand, die Einflüsse unterschiedlich stark ausgeprägt sein können.

Einflüsse auf die Verfestigung Analog zu den Einflüssen auf den Eigenspannungstiefenverlauf zeigt Abbildung 2.7b schematisch den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf den Halbwertsbreitentiefenverlauf. Prinzipiell führen höhere Strahlmittelgeschwindigkeit, Strahldruck, Strahlmittelgröße und -härte zu höheren Halbwertsbreiten und größeren Eindringtiefen [16]. Eine höhere Werkstückhärte führt im Gegensatz dazu zu niedrigeren Halbwertsbreiten. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die höhere Versetzungsdichte, die mit einer höheren Härte einhergeht. Ist die Versetzungsdichte im Ausgangszustand bereits sehr hoch, kommt es statt zu einer weiteren Verfestigung zu einer Entfestigung durch Versetzungsumordnung und -annihilation [19]. Die Strahldauer wirkt sich aus demselben Grund negativ auf die Verfestigung aus. Nach einer gewissen Strahldauer kommt es statt zu einer weiteren Verfestigung zum Abbau der Versetzungsdichte und damit zur Entfestigung [18]. Ausschlaggebend dafür ist die bereits im Werkstoff vorhandene Versetzungsdichte.

2.1.4 Festwalzen

Festwalzen ist ein spanloses Fertigungsverfahren und gehört nach der VDI-Richtlinie 3177 [20] zu den Oberflächen-Feinwalzverfahren. Dabei wird, durch ein- oder mehrfaches Überrollen mit dem Festwalzwerkzeug unter einer definierten Anpresskraft, die Randschicht elastisch-plastisch verformt. Die Werkzeuge sind in der Regel mit einer Kugel oder einer Walzrolle ausgestattet und können hydrostatisch oder mechanisch betrieben werden. Ziel des Verfahrens ist das Einbringen von Druckeigenspannungen, das Verfestigen der Randschicht zur Steigerung der Schwingfestigkeit und das Glätten der Oberflächentopographie.

In der Regel wird das Festwalzen bei rotationssymmetrischen Bauteilen wie Kurbelwellen, Achsen, Schrauben, Bolzen oder Torsionsstäben eingesetzt. Sonderwerkzeuge ermöglichen auch das Festwalzen von Innenwandungen von Stufen-, Durchgangs- oder Sacklochbohrungen [1, 2]. Aber auch Freiformflächen wie z.B. Turbinenschaufeln können festgewalzt werden [21].

Wesentliche Prozessparameter beim Festwalzen sind der Festwalzdruck bzw. die Festwalzkraft, der Vorschub, die Überrollzahl und die Geometrie des Werkzeugs. Zusätzlich dazu wurde von [21] eine Walzintensität, ähnlich der Almenintensität beim Kugelstrahlen, definiert.

Einflüsse auf die Topographie Das Festwalzen führt zu einer Änderung der Oberflächentopographie, die abhängig von der Festwalzkraft ist, siehe Abbildung 2.8 links.

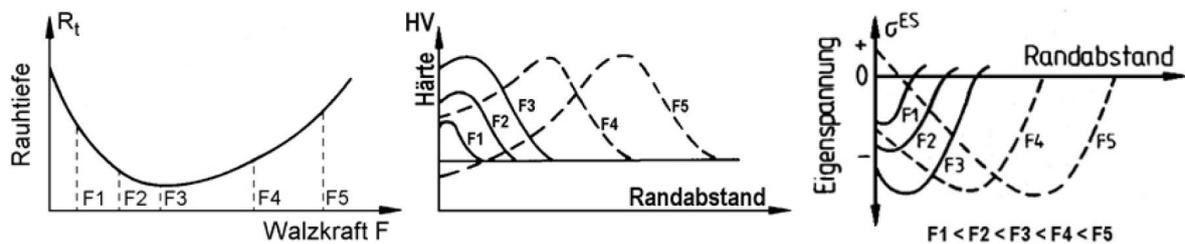


Abbildung 2.8: Einfluss der Festwalzkraft auf die Rauheit, den Härte- und Eigenspannungstiefenverlauf [23].

Zunächst kommt es zu einer Verringerung der Rauheit, welche auf die Glättung der Riefen der zerspannten Oberfläche zurückzuführen ist. Nach dem Durchlaufen eines Minimums kommt es allerdings bei höheren Festwalzkraften zu einem Wiederanstieg der Rauheit. Dieser Anstieg wird von [22, 23] auf Schädigung oberflächennaher Bereiche zurückgeführt. Ähnlich wirkt sich auch die Überrollzahl auf die Rauheit aus.

Einflüsse auf die Eigenspannungen Der Eigenspannungstiefenverlauf nach dem Festwalzen kann mit Hilfe des Modells der Hertz'schen Pressung beschrieben werden. Grundsätzlich ist die Eigenspannungsverteilung anisotrop, die Eigenspannungen quer zur Walzrichtung sind betragsmäßig größer als in Walzrichtung. Das Druckspannungsmaximum liegt, bedingt durch die Hertz'sche Pressung, unterhalb der Oberfläche, siehe Abbildung 2.8 rechts. Mit steigender Festwalzkraft wird das Maximum und die Eindringtiefe in größere Tiefen verschoben. Dies kann bei hohen Festwalzkraften dazu führen, dass an der Oberfläche Zugeigenspannungen vorliegen. Die Höhe der maximalen Druckeigenspannungen steigt mit der Festwalzkraft nur geringfügig [24]. Gruber et al. [25] haben beobachtet, dass auch die Oberflächendruckeigenspannungen ein Maximum durchlaufen und bei hohen Kräften wieder abnehmen. Dies wird von [2] ebenfalls auf die Oberflächenschädigung zurückgeführt.

Einflüsse auf die Verfestigung Analog zum Eigenspannungstiefenverlauf zeigt der Härtetiefenverlauf ein Maximum unterhalb der Oberfläche, siehe Abbildung 2.8 Mitte. Bei geringen Festwalzkraften verschiebt sich das Maximum in Richtung der Oberfläche, bei hohen Kräften in größere Tiefen. Dies kann im Extremfall dazu führen, dass es an der Oberfläche zu einer geringeren Härte kommt, als im Ausgangszustand [23]. Die Halbwertsbreiten zeigen nach [24] für normalisierten Ck45 einen anderen Verlauf. Die Halbwertsbreite an der Oberfläche liegt über dem Wert des unbehandelten Materials im Probeninneren und nimmt mit steigender Tiefe kontinuierlich ab. Mit steigendem

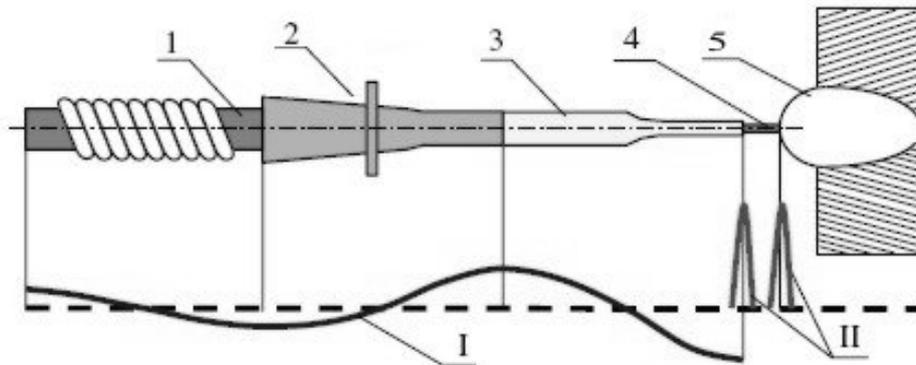


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Prinzips der piezoelektrischen Beschleunigung des Hammerkopfes [30]. 1 - Elektromechanischer Wandler; 2 - Horn; 3 - Sonotrode; 4 - Hammerkopf; 5 - Zu bearbeitende Oberfläche

Festwalzdruck nimmt der Oberflächenwert und die Eindringtiefe zu, wobei sich bei mittleren Tiefen ein Plateau ausbildet.

2.1.5 Maschinelles Oberflächenhämmern

Das maschinelle Oberflächenhämmern ist ein Oberbegriff für verschiedene, alternative mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren. Kenngröße ist ein Energieeintrag in das Werkstück über die kinetische Energie einer bewegten Masse [26]. Das charakteristische Bewegungsmerkmal ist die lineare Bewegung des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche. Wie bereits in Abbildung 2.1 dargestellt, gibt es verschiedene Verfahrensvarianten, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

Direkt-sonotrodengetriebene Beschleunigung des Hammerkopfes Die Beschleunigungseinheit eines direkt-sonotrodengetriebenen Systems besteht aus einem elektromechanischen Wandler dessen Amplitude mit Hilfe eines Horns und einer Sonotrode mechanisch verstärkt wird, siehe Abbildung 2.9. Der elektromechanische Wandler kann dabei ein piezoelektrisches oder magnetostriktives Material sein. Die Amplitudenverstärkung mittels Sonotrode hat zur Folge, dass diese Verfahren nur in Resonanz betrieben werden können. Bei den direkt-sonotrodengetriebenen Verfahren besteht eine starre Verbindung zwischen Sonotrode und Hammerkopf. Somit wird die Schwingung direkt auf den Hammerkopf übertragen. Beispiele hierfür sind das Ultrasonic Impact Treatment (UIT) der Firma MTU [27], das Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification (UNSM) [28] und das Ultrasonic Peening Treatment (UPT) [29].

Sonotrodengetriebene Beschleunigung des Hammerkopfes Bei diesen Verfahren besteht keine feste sondern eine lose Verbindung zwischen Sonotrode und Hammerkopf. In diesem Fall schlägt die Sonotrode auf den Hammerkopf, der dann mit deutlich geringeren Frequenzen auf das Werkstück trifft. Zu den Verfahren mit loser Verbindung zählen Ultrasonic Impact Treatment (UIT) der Firma Applied Ultrasonics [31], das Ultrasonic Needle Peening (UNP) [32], Ultrasonic Impact Peening (UIP) [33], Ultrasonic Peening (UP) [34] und das Ultrasonic Shock Treatment (UST) [35]. Eine Abwandlung des UIP ist das Rotating Pin Ultrasonic Peening (RPUIP) [36], hierbei dreht sich der Hammerkopf noch zusätzlich.

Ultraschallfestwalzen Diese Verfahren stellen eine Variante des Festwalzens mit überlagerter Schwingung dar. Der Aufbau ist ähnlich der direkt-sonotrodengetriebenen Verfahren, es herrscht jedoch ein kontinuierlicher Kontakt und der Hammerkopf kann sich wie beim Festwalzen drehen. Beispiele dafür sind die Ultrasonic Cold Forging Technology (UCFT) [37], das Ultrasonic Deep Cold Rolling (UDCR) [38], das Ultrasound-Aided Deep Rolling (UADR) [39], das Ultrasonic Thread Root Rolling (UTRR) [40] und der Ultrasonic Surface Rolling Process (USRP) [41].

Piezelektrische Beschleunigung des Hammerkopfes Im Gegensatz zu den vorherigen Verfahren wird bei den Verfahren mit piezelektrischer Beschleunigung die Amplitude des Piezoaktors nicht verstärkt. In [42] wird ein anderer Aufbau verwendet, der auch auf dem piezelektrischen Prinzip beruht. Hierbei wird nur mittels eines Piezoaktors ein Stößel bewegt ohne eine zusätzliche Verstärkung der Amplitude durch eine Sonotrode. Zur Kompensation des geringen Hubs von 0,18 mm wird das Werkzeug mit einer Schraubenfeder gegen das Werkstück vorgespannt [43].

Elektromagnetische Beschleunigung des Hammerkopfes Bei elektromagnetischen Systemen (E-MHP) wird der Hammerkopf mittels des Magnetfelds einer mit Wechselstrom durchflossenen Spule beschleunigt. Der ferromagnetische Träger an dem der Hammerkopf befestigt ist, führt aufgrund dessen Schwingungen mit definierter Frequenz, Amplitude und Nulldurchgang aus [44].

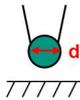
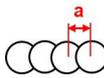
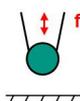
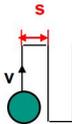
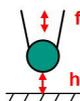
Pneumatische Beschleunigung des Hammerkopfes Eine weitere Möglichkeit ist die Beschleunigung des Hammerkopfes mit Hilfe von Druckluft. Hier gibt es drei verschiedene Varianten: Das High Frequency Impact Treatment (HiFIT) [45], bei dem ein Kolben mittels zweier mit Druck beaufschlagter Volumina und einer Entlastungsleitung hin

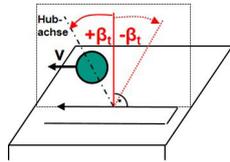
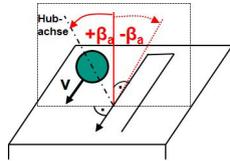
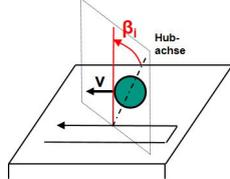
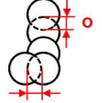
und her bewegt werden kann [46]. Beim Pneumatic Impact Treatment (PIT) wird mit Hilfe eines pneumatischen „Muskels“ der Firma Festo der Hammerkopf bewegt [47]. Für das Forgefix Kaltschmiedewerkzeug [48] sind keine Informationen zur genauen Funktionsweise veröffentlicht.

Die Vielzahl der Verfahren führt zu unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Die auch in einer Hand-held-Variante erhältlichen Verfahren HiFIT, PIT, UIT und UNT werden im Allgemeinen bei Schweißnahtnachbehandlungen eingesetzt [49, 50, 51]. Das UNSM wird eingesetzt, um die Lebensdauer von Kugel- und Gleitlagern, Schneidmessern und Nockenstößeln zu steigern [52]. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Glätten der Oberflächen im Werkzeug- und Formenbau in der Automobilindustrie [53].

Aufgrund der unterschiedlichen Technologien zur Erzeugung der Schwingung gibt es bei den Verfahren teilweise unterschiedliche Prozessparameter. In den Richtlinien zur Terminologie für das Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung „Maschinelles Oberflächenhämmern“ [26] werden die in Tabelle 2.1 aufgeführten Parameter als Prozessparameter identifiziert:

Tabelle 2.1: Prozessparameter der maschinellen Oberflächenhämmerprozesse

Hammerkopfdurchmesser d , gesondert noch die Angabe der geometrischen Form	
Anzahl der Hammerköpfe n	
Eindruckabstand a , als Abstand zweier Eindrücke in Bewegungsrichtung	
Vorschubgeschwindigkeit v , die die Geschwindigkeit des Hammerkopfes in seiner Bewegungsrichtung angibt	
Frequenz f , mit der der Hammerkopf schwingt	
Bahnabstand s , als Abstand der Eindrücke senkrecht zur Bewegungsrichtung	
Hub h , welcher den maximalen Abstand zwischen Hammerkopf und Bauteiloberfläche beschreibt	

<p>Kontaktenergie E_c, beschreibt die Energie des Hammerkopfes beim Auftreffen auf die Bauteiloberfläche</p>	
<p>Kippwinkel β_t, Winkel zwischen der Flächennormale der Werkstückoberfläche und der Hubrichtung in der Ebene, die von Vorschubrichtung und Flächennormale aufgespannt wird</p>	
<p>Anstellwinkel β_a, Winkel zwischen der Flächennormale der Werkstückoberfläche und der Hubrichtung in der Ebene, die senkrecht zur Vorschubrichtung mit der Flächennormale aufgespannt wird</p>	
<p>Auftreffwinkel β_i, kleinstmögliche Winkel zwischen der Flächennormale der Werkstückoberfläche und der Hubrichtung</p>	
<p>Bahnorientierungswinkel α, Winkel zwischen Vorschubrichtung und der Richtung der vorherigen Bearbeitung</p>	
<p>Eindruckdurchmesser d_i, senkrecht zur Vorschubrichtung</p>	
<p>Eindruckfläche A_i</p>	
<p>Überlappung o, entweder in Vorschubrichtung oder senkrecht dazu</p>	
<p>Kontaktzeit Δt, Dauer des Kontaktes zwischen Hammerkopf und Werkstück während einer Periode</p>	

Aufgrund der vielfach angewendeten Vorspannung oder statischen Kraft F ist es sinnvoll, diese als weiteren Prozessparameter zu betrachten.

Standardmäßig werden für die Anregung piezoelektrisch oder magnetostruktiv beschleunigter Systeme Frequenzen zwischen 20 kHz und 44 kHz verwendet. Für direkt-

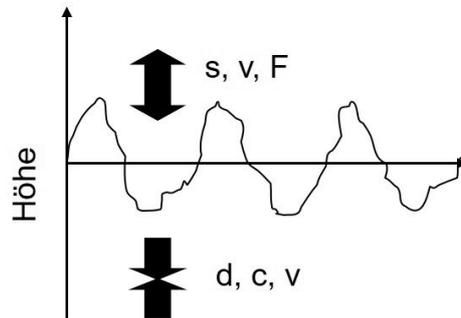


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des Einflusses der Prozessparameter auf die Rauheit.

sonotrodengetriebene Systeme entspricht das der Arbeitsfrequenz, bei sonotrodengetriebenen Systemen liegen die Frequenzen, mit denen das Werkstück bearbeitet wird, zwischen 500 und 3 kHz [31]. Die Amplituden liegen im Bereich von 3-60 μm [27, 40]. Bei den elektromagnetisch beschleunigten Verfahren können Frequenzen bis 500 Hz und Hübe bis 1,2 mm verwendet werden [54]. Bedingt durch den Aufbau hängt die wirkende Kraft auf das Werkstück stark vom Hub, also der Beschleunigungsstrecke, ab. Für einen größeren Hub können höhere Kräfte erreicht werden, allerdings wird dadurch der nutzbare Frequenzbereich eingeschränkt [55]. Die Frequenz von pneumatischen Systemen liegt, ähnlich derer mit elektromagnetischer Beschleunigung, typischerweise im Bereich bis 300 Hz [56]. Die auftretenden Dehnraten $\dot{\epsilon}$ können mit den abgeschätzten Werten der Verformungsgeschwindigkeit v aus Abbildung 2.1 mit dem Zusammenhang $\dot{\epsilon} = v/l$ grob abgeschätzt werden.

Einflüsse auf die Topographie Wie sich das MHP auf die Oberflächentopographie auswirkt, ist stark von den Prozessparametern abhängig und reicht vom Einglätten der Rauheitsspitzen, was zu sehr glatten Oberflächen führt, bis hin zur Schädigung der Oberfläche durch zu hohe Kräfte [38, 57, 58]. Wie sich die verschiedenen Prozessparameter auf die resultierende Rauheit auswirken, wurde für einen Großteil der Verfahren zumindest teilweise untersucht. Die generellen Einflussfaktoren auf die Rauheit sind in Abbildung 2.10 zusammenfassend für alle MHP Prozesse schematisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert. Bezüglich des Hammerkopfdurchmessers d wurde für pneumatisches MHP [42], UIT [27] und E-MHP [59] einheitlich festgestellt, dass mit zunehmendem Hammerkopfdurchmesser die Rauheit verringert werden kann. Bei kleinen Kugeln kommt es aufgrund der Ausbildung von Bearbeitungsrillen zu einer Verschlechterung der Rauheit [42, 38].

Generell hat die Überdeckung einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächentopographie.

pographie. Die Überdeckung wird durch die Vorschubgeschwindigkeit v , den Bahnabstand s und die Frequenz f bestimmt. Nach [60] kommt es bei UNSM von AISI 1045 mit steigender Überdeckung zu einer Abnahme der Rauheit. Bei Untersuchungen zur Abhängigkeit der Rauheit von der Prozesszeit haben [33] für RPUP von, [61] für UIP von Zr1%-Nb und [62] für UIT von AISI 304 festgestellt, dass es bei sehr kurzen Prozesszeiten zunächst zu einem Anstieg der Rauheit und erst anschließend zu einer Verbesserung der Rauheit kommt.

Zu dem Einfluss der Vorschubgeschwindigkeiten v gibt es unterschiedliche Beobachtungen. Beim elektromagnetischen MHP von C45E nimmt dabei mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Rauheit senkrecht zur Bearbeitungsrichtung ab und scheint ab einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit eine Sättigung zu erreichen [54]. Parallel zur Bearbeitungsrichtung zeigt sich ein gegenteiliges Phänomen: Nach einer anfänglich sehr hohen Reduzierung der Rauheit nimmt diese mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit wieder zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei geringen Geschwindigkeiten die einzelnen Abrücke nicht mehr erkennbar sind, sondern nur Bearbeitungsbahnen. In Bearbeitungsrichtung sind sie sehr glatt, weisen aber seitliche Riefen auf. Je höher der Vorschub, desto mehr ist die Oberflächentopographie von den einzeln erkennbaren Eindrücken geprägt. Beim USRP eines 40Cr Stahls führt nach [63] eine höhere Vorschubgeschwindigkeit zu höheren Rauheiten (senkrecht zur Bearbeitungsrichtung).

Bei den verschiedenen Antriebstechnologien wird übereinstimmend die Abnahme der Rauheit mit geringer werdenden Bahnabständen s berichtet. [42] untersuchte das für pneumatisches MHP von ZnAl4Cu3 und 60CrMoV18-5. Die selben Ergebnisse erhielten auch [52] für UNSM von SAE52100, [59] für E-MHP von C45E und [63] für USRP eines 40Cr Stahls.

Beim E-MHP führt ein höherer Hub h zu größeren Rauheiten [64], was mit der Tatsache, dass die Tiefe eines Eindrucks im Material abhängig vom Hub ist, erklärt werden kann [59].

Eine höhere Vorspannung F führt bei UNSM von AISI 4137 [65] und AISI 304 [66] zu höheren Rauheitswerten, es kann sogar zu Mikrorissen kommen.

Der Bahnorientierungswinkel α ist nach [67] für eine gleichmäßige Oberflächentopographie möglichst konstant und für MHP-Prozesse bei 45 ° zu halten. Allerdings konnte von [42] kein Einfluss des Bahnorientierungswinkels festgestellt werden .

Abhängig von der Ausgangshärte des Materials ergeben sich unterschiedliche Effekte für unterschiedliche Auftreffwinkel β_i [68]. Für nicht gehärteten X155CrVMo12-1 wird die Rauheit bei einem Auftreffwinkel von 30 ° am meisten reduziert, im gehärteten Zu-

stand tritt bei 0 ° der größte Effekt auf. Auch [42] zeigt, dass durch eine Vergrößerung des Auftreffwinkels für kleine Hammerkopfdurchmesser eine bessere Einglättung der Oberfläche durch pneumatisches MHP von Materialien mit geringer Streckgrenze erreicht werden kann.

Prinzipiell ist es sinnvoll, die Gesamtheit der Parameter in Abhängigkeit vom Material zu betrachten. [69] zeigt, dass für X155CrVMo12-1 und GP4M große Hubenergien und eine hohe Überdeckung, also hohe Frequenz und geringer Bahnabstand, zu einer Verbesserung der Rauheit führen. Für Werkzeugstahl ist die höhere Energie pro Fläche bei einem kleinen Hammerkopf positiv für die Rauheit, bei Gusseisen mit Kugelgraphit kann es auf Grund der hohen Energien dazu kommen, dass während der Bearbeitung Graphit ausbricht und so die Oberflächenqualität verschlechtert wird. Der Auftreffwinkel sollte so gering wie möglich sein, um die volle Hubenergie nutzen zu können. Ab einem Winkel von >50 ° wird nur eine geringe Änderung der Oberflächentopographie erreicht.

Einflüsse auf die Eigenspannungen Vergleichbar mit dem Festwalzen kommt es zur Ausprägung von Druckeigenspannungen, die eine Richtungsabhängigkeit [27, 54, 70, 71, 72] aufweisen, wobei senkrecht zur Bearbeitungsrichtung die größeren Eigenspannungen gemessen werden können. In vielen Fällen liegt das Druckspannungsmaximum unterhalb der Oberfläche [40, 63, 73], teilweise werden aber auch an der Oberfläche [38, 74] die maximalen Eigenspannungen aufgezeichnet. Nach [75] können die Eigenspannungswerte entlang der Oberfläche variieren, der Unterschied wird mit zunehmender Tiefe dann geringer. Ein Großteil der Literaturstellen zum pneumatischen MHP bezieht sich auf die Eigenspannungen nach einer Schweißnahtnachbehandlung. Hierbei können die ursprünglich in der Schweißnaht vorhandenen Zugeigenspannungen in Druckeigenspannungen umgewandelt werden [76, 77, 78, 79, 80, 81]. [82] berichtet jedoch auch von Zugeigenspannungen in paralleler Richtung am Rand der bearbeiteten Zone an der Schweißnaht in einem ASTM A516 Stahl.

Die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter auf den Eigenspannungstiefenverlauf sind in Abbildung 2.11 schematisch wiedergegeben. Nach [27] steigen die Eigenspannungen mit kleiner werdendem Hammerkopfdurchmesser d bei UIT-Bearbeitung von IN718. Wie bei der Rauheit spielt auch beim Eigenspannungszustand die Überdeckung eine Rolle. Nach [33] kommt es für UIP von AISI 321 sowie für RPUIP von α -Titan [36] mit steigender Bearbeitungszeit zu höheren Oberflächeneigenspannungen. Nach Erreichen eines Optimums werden sie anschließend wieder geringer. Durch mehrfaches Bearbeiten mit USRP kommt es nach [83] bei 40Cr zu höheren Oberflächen- als auch maximalen Eigenspannungen. Das Eigenspannungsmaximum und die Eindringtiefe der Eigenspannungen wird dabei in größere Tiefen verschoben.

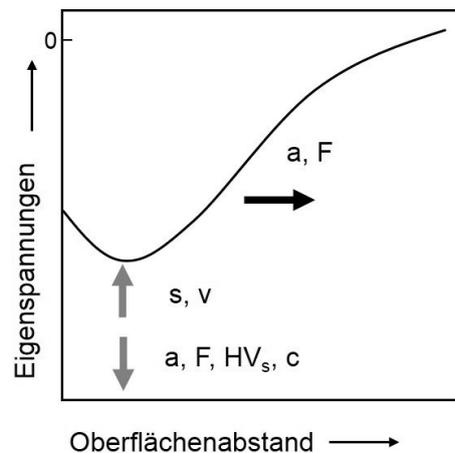


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung des Einflusses der Prozessparameter auf den Eigenspannungstiefenverlauf.

Im Gegensatz dazu misst [54] bei E-MHP von C45E keine Änderungen des Betrags der Oberflächeneigenspannungen. Des Weiteren bestimmt, wenn die zwei Bearbeitungen senkrecht zueinander ausgeführt wurden, der letzte Bearbeitungsschritt die resultierende Eigenspannungsverteilung. [84] zeigt, dass die maximalen Druckeigenspannungen bei E-MHP für X155CrMoV12 bei einem größeren Bahnabstand s und einer höheren Vorschubgeschwindigkeit v geringer werden.

Untersuchungen zur Amplitude a liegen nur für das UIT-Verfahren von [27] an IN718 vor. Demnach lässt sich die Tiefenwirkung mit steigender Amplitude erhöhen.

Bezüglich des Einflusses der Vorspannung f gibt es unterschiedliche Beobachtungen. Nach [27] kommt es mit steigender Vorspannung beim UIT von IN718 zu einer größeren Tiefenwirkung. [70] stellt dagegen fest, dass beim UNSM von IN718 mit steigender Vorspannung die Oberflächeneigenspannungen ansteigen, es jedoch keinen Einfluss auf die Eindringtiefe gibt. Ähnliches wird auch von [65] bei UNSM beobachtet: Zunehmende Oberflächeneigenspannungen und kaum Änderung der Eindringtiefe für SCM435, für SKD61 tritt jedoch eine geringfügige Erhöhung der Eindringtiefe auf [85].

Aus den Untersuchungen von [54] zu E-MHP von C45E ergibt sich, dass die Oberflächeneigenspannungen unabhängig vom Bahnorientierungswinkel α sind.

[86] zeigte bei seiner Untersuchung von 42CrMo4 (540-560 HV) und 100Cr6 (700-750 HV), dass im härteren Werkstoff höhere Eigenspannungen mittels UNSM eingebracht werden konnten. Im Diagramm in Abbildung 2.11 ist die Härte des Werkstücks als HV_s dargestellt.

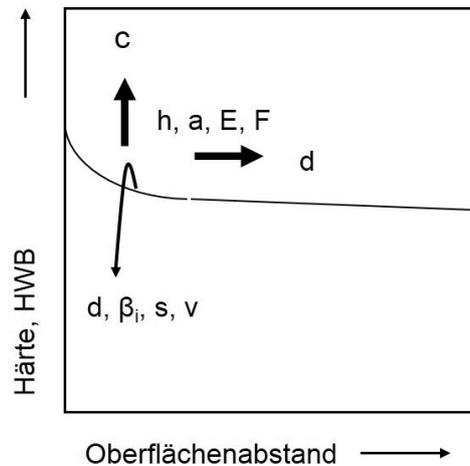


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Einflusses der Prozessparameter auf den Verfestigungszustand.

Einflüsse auf die Verfestigung Im Allgemeinen wird ein Anstieg der Härte, wie beispielsweise in AISI 321 und VT1-0 nach UIP [33, 87], in der Schweißnaht eines Stahls mit niedrigem Kohlenstoffgehalts nach UST [35], in α -Titan nach RPUP [36], in SKD 61 nach UCFT [37], in Ti-6Al-4V nach UDCR [38], in GGG70L nach E-MHP [88] oder der Halbwertsbreite in IN718 nach UIT [27] der Bearbeitung beobachtet. Eine Ausnahme ist [73], der für 30CrMnSiNi2A nach UADR eine Abnahme der Halbwertsbreite trotz Härteanstieg messen konnte. Die genaue Ausprägung der Verfestigung ist jedoch ebenso wie die Rauheit und die Eigenspannungen materialabhängig [77, 89, 90, 91, 92].

In den meisten Fällen geht man dabei von einem Härte- oder Halbwertsbreitenanstieg durch Versetzungsverfestigung aus. Es können darüber hinaus noch zusätzliche Effekte auftreten. Nach [93] führt UNSM von Al 5052 zur Ausbildung von Zellstrukturen der Versetzungen bis hin zur Kornfeinung, so dass der Härteanstieg mit der Hall-Petch-Beziehung erklärt werden kann.

In Abbildung 2.12 ist der Effekt verschiedener Prozessparameter auf den Verfestigungszustand skizziert. Auf diese wird in den folgenden Absätzen eingegangen.

Zum Einfluss des Hammerkopfdurchmessers d auf die Verfestigung gibt es unterschiedliche Versuchsergebnisse. Die Ergebnisse von [42] zu pneumatischem MHP von ZnAl4Cu3, von [27] zu UIT von IN718 und [89] zu E-MHP von 1.2379 und EN-GJL-250 zeigen eine höhere Härte bei geringeren Hammerkopfdurchmessern d . Allerdings beobachtet [94] für E-MHP mit steigendem Hammerkopfmesser eine höhere Härte und auch eine höhere Eindringtiefe.

Bei der Verfestigung spielt die Überdeckung c ebenfalls eine Rolle. Nach [95, 96] führt eine steigende Überdeckung bei UNSM von AISI 1045 zu zunehmender Härte, die Eindringtiefe ändert sich jedoch nicht. Nach [63] kommt es bei USRP von 40Cr mit mehrfacher Bearbeitung zu einem Anstieg der Mikrohärt. Untersuchungen von [36] zu RPUP von α -Titan gibt es eine optimale Bearbeitungsdauer, danach nimmt die Härte wieder ab.

Bezüglich des Einflusses des Vorschubs v führt nach [97] bei UIT von einer Schweißnaht eines CSA G40.21 350W Stahls ein verringerter Vorschub zu höherer Härte. Ebenfalls führt E-MHP von X155CrMoV12 [84] und UNSM von SAE52100 [52] mit sinkendem Bahnabstand s zu einer höheren Härte an der Oberfläche. Und auch die Ergebnisse von [42], dass bei pneumatischem MHP von ZnAl4Cu3 und 60CrMoV18-5 die Härte mit geringer werdendem Eindruckabstand ansteigt, bestätigt dies.

Der Effekt von unterschiedlich großen Hüben h wurde für E-MHP von [68] untersucht. Für nicht gehärteten X115CrVMo12-1 wird eine leichte Härtesteigerung detektiert, es ist jedoch keine Abhängigkeit vom Hub zu erkennen. Für gehärteten X115CrVMo12-1 kann zunächst mit steigendem Hub eine steigende Oberflächenhärte beobachtet werden. Das Maximum wird bei einem Hub von 0,9 mm erreicht, danach kommt es zu einer leichten Verringerung der Härtewerte [68]. Eine ähnliche Abhängigkeit vom Hub beobachtet [71] für E-MHP von C45E, [64] für E-MHP von einen nicht näher bezeichneten Stahl und [27] für UIT von IN 718.

Mit zunehmender Hubenergie E steigen nach [98] bei UNSM einer Cu-Zn-Legierung die Härte und die Eindringtiefe an. Das stimmt auch mit den Ergebnissen von [89] zu E-MHP von 1.2379, GP4M, EN-GJL-250 und EN-JS2070 sowie von [42] zu pneumatischem MHP von ZnAl4Cu3 und 60CrMoV18-5 überein. [99] beobachtet bei UNSM von AZ91D einen Anstieg der Mikrohärt mit zunehmender Schlagkraft, jedoch keine Unterschiede in der Tiefenwirkung.

Eine höhere Vorspannung F führt bei UIT von IN 718 [27] und bei UNSM von AISI 304 [66, 100] zu einer höheren Halbwertsbreite bzw. Härte und auch [101] bestätigt einen Härteanstieg mit zunehmender Vorspannung bei UNSM von SAE52100, allerdings gibt es ein Optimum nachdem die Härte wieder abfällt.

Bezüglich des Auftreffwinkels β_i gibt es unterschiedliche Beobachtungen. Nach [89] steigt die Oberflächenhärte mit sinkendem Auftreffwinkel bei E-MHP von GP4M, EN-GJL-250 und EN-JS2070. Entgegengesetzt dazu misst [94] für E-MHP eine höhere Härtesteigerung mit größerem Auftreffwinkel, jedoch ist die Eindringtiefe für kleine Auftreffwinkel größer.

[102] zeigt am Beispiel von einer Schweißnaht in 2024T3, dass die Härtesteigerung

größer ist, wenn das Verfahren angewendet wird, während der Schweißvorgang noch läuft, das sogenannte „trailing peening“.

2.2 Auswirkung des Randschichtzustands auf die Schwingfestigkeit

2.2.1 Befunde

Die durch mechanische Oberflächenbehandlung hervorgerufenen Änderungen der Randschichteigenschaften wirken sich unterschiedlich auf das Ermüdungsverhalten eines Bauteils aus. Generell ist zu sagen, dass die Auswirkungen auf die Stadien der Ermüdung stark vom vorliegenden Werkstoffzustand abhängen. [103] hat für Ti-Al6V4 folgenden Zusammenhang festgestellt: Eine hohe Rauheit begünstigt durch die Kerbwirkung die Rissinitiierung, hat auf die Rissausbreitung jedoch keinen Einfluss. Der erhöhte Verfestigungszustand verzögert die Rissinitiierung, beschleunigt aber aufgrund der hohen Versetzungsdichte die Rissausbreitung. Die entstandenen Druckeigenstressungen haben keinen Einfluss auf die Rissinitiierung, verzögern jedoch die Rissausbreitung. Ähnliche Effekte konnten von [103] für 7010- und 8090-Aluminiumlegierungen gefunden werden. [104] nimmt an, dass dies auch für andere metallische Werkstoffe gilt. [105] ist jedoch zu dem Schluss gekommen, dass durch die Verfestigung bei X2CrNiMo17-12-2 die Rissausbreitung verzögert wird.

Die Lebensdauer kann durch die unterschiedlichen mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren teilweise deutlich gesteigert werden. Für 42CrMo4 V450 konnte durch konventionelles Kugelstrahlen die 50 %-Biegezugfestigkeit um bis zu 20 %, durch Strahlen mit erwärmter Luft sogar bis zu 45 % gesteigert werden [106]. Durch Festwalzen kann eine Dauerfestigkeitssteigerung von bis zu 70 % bei 37Cr3 erreicht werden [107]. Für die verschiedenen MHP-Verfahren gibt es ebenfalls Untersuchungen zum Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Ein Großteil dreht sich dabei um die Erhöhung der Lebensdauer von Schweißnähten [91, 102, 45]. Die Bearbeitung kann direkt nach dem Schweißen oder als Reparatur bereits vorhandener Risse geschehen [78]. Wobei nach [108] ein direktes Nachbearbeiten effektiver als eine Reparatur ist. In Abbildung 2.13 sind verschiedene Literaturdaten zu gehämmerten Schweißnähten von [109] in einem Diagramm dargestellt. Es zeigt eine Steigerung der Lebensdauer von 89 % bei einer Lastspielzahl von $N_B = 2 \cdot 10^6$. Andererseits gibt es auch den Fall, dass bei nicht genauer spezifiziertem Hämmern von AA5083 Schweißnähten die Lebensdauer verringert wurde [110].

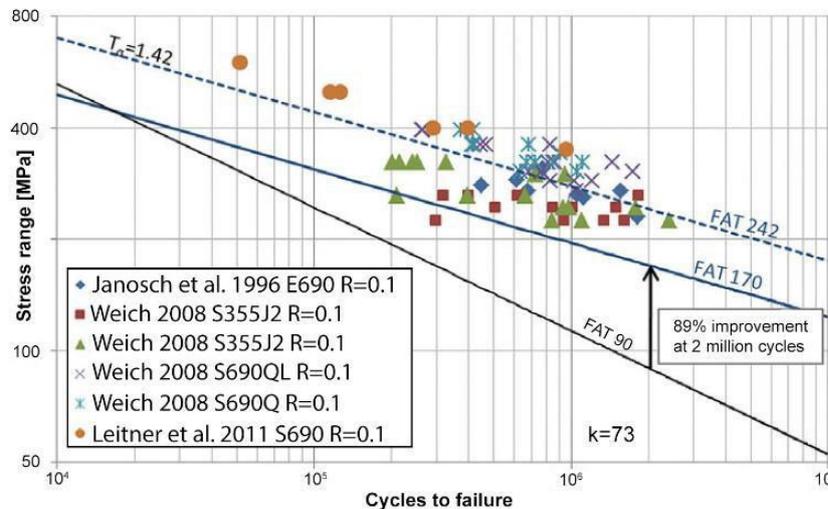


Abbildung 2.13: Übersicht über Literaturdaten von gehämmerten Schweißnähten nach [109].

2.2.2 Stabilität der Eigenspannungen

Um den durch die mechanische Oberflächenbehandlung veränderten Randschichtzustand bei der Auslegung von Bauteilen berücksichtigen zu können, muss die Stabilität der Zustände gewährleistet oder der Eigenspannungsabbau bekannt sein. Eine zyklische Belastung kann zu einem Abbau der Eigenspannungen führen. Entscheidend hierfür ist die plastische Dehnungsamplitude [111]. Es können vier verschiedene Arten des zyklischen Eigenspannungsabbaus anhand experimenteller Befunde unterschieden werden, siehe Abbildung 2.14. Wird weder die statische noch die zyklische Streckgrenze überschritten, findet kein Eigenspannungsabbau statt (1). Liegt die Belastung unterhalb der statischen, jedoch über der zyklischen Streckgrenze, erfolgt ein Abbau erst bei großen Lastspielzahlen (2). Wird die Streckgrenze überschritten und gibt es zyklische Verfestigung, kommt es nach anfänglichem starkem Abfall zu keinem weiteren Abbau der Eigenspannungen (3). Erfolgt hingegen eine zyklische Entfestigung, verläuft der Eigenspannungsabbau nach einem anfänglichen starken Abfall kontinuierlich (4) [112]. Entscheidend dafür, welcher Fall eintritt, ist der Werkstoff bzw. der Werkstoffzustand. Nach [113] sind die Eigenspannungen in mittelfesten und hochfesten Werkstoffzuständen weitgehend stabil.

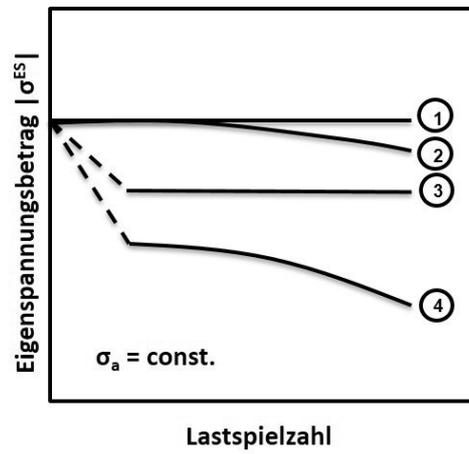


Abbildung 2.14: Schema zur Unterteilung der verschiedenen Arten des Eigenspannungsabbaus bei schwingender Beanspruchung nach [112].

3 Werkstoff und Probengeometrie

3.1 Werkstoff und Wärmebehandlung

Als Versuchswerkstoff wurde 42CrMo4 V450 verwendet. Die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Proben ist in Tabelle 3.1 aufgeführt. Es wurden zwei unterschiedliche Chargen für die Parameterstudien und die Schwingfestigkeitsuntersuchungen verwendet. Die durchgeführte Wärmebehandlung ist in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Proben in Ma%, die Basis ist Eisen.

	C	Cr	Mo	Si	Mn	P	S
Char.	0,43	1,01	0,22	0,25	0,80	0,01	0,02
Wöhler	0,42	1,04	0,20	0,24	0,73	0,01	0,04
Norm	0,38-0,45	0,9-1,2	0,15-0,3	≤ 0,4	0,6-0,9	≤ 0,025	≤ 0,035

Tabelle 3.2: Wärmebehandlung

Temperatur [°C]	Dauer [min]	Bemerkung
850	20	Austenitisieren
RT		Abschrecken in Öl
450	120	Anlassen
RT		Ofenabkühlung

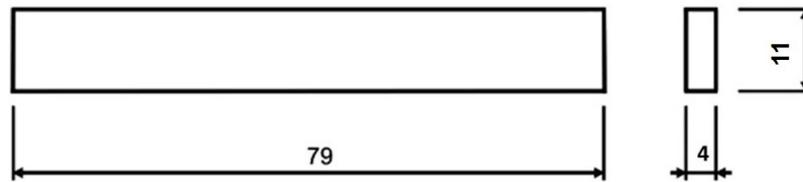


Abbildung 3.1: Geometrie der verwendeten Flachproben

3.2 Probengeometrien

Für die Charakterisierung der Randschichtzustände nach der Variation der Prozessparameter und für die Erstellung der Wöhlerkurven wurden verschiedene Probengeometrien gewählt, die aus unterschiedlichen Chargen hergestellt wurden.

3.2.1 Probengeometrie für die Parameterstudien

Die Parameterstudien zur Bestimmung des Einflusses der einzelnen Prozessparameter wurden an Flachproben mit einer Dicke von 4 mm durchgeführt, siehe Abbildung 3.1. Die Proben wurden vor der Wärmebehandlung mit einem Aufmaß von jeweils 0,1 mm gefertigt und nach der Wärmebehandlung auf das Endmaß geschliffen. Hierfür wurden die Schleifparameter nach [106] (Schnittgeschwindigkeit 30 m/s, Zustellung 3 μm pro Hub) gewählt, so dass die Randschicht nach dem Schleifen möglichst spannungsfrei vorlag.

3.2.2 Probengeometrie für die Untersuchung der Lebensdauer

Zur Untersuchung der Lebensdauer wurden Rundproben verwendet mit einer Messtrecke von 17 mm und einem Durchmesser von 7 mm, siehe Abbildung 3.2. Die Proben wurden aus Stangenmaterial gefertigt, welches zunächst vorge dreht, dann wärmebehandelt und anschließend auf das Endmaß bearbeitet wurde.

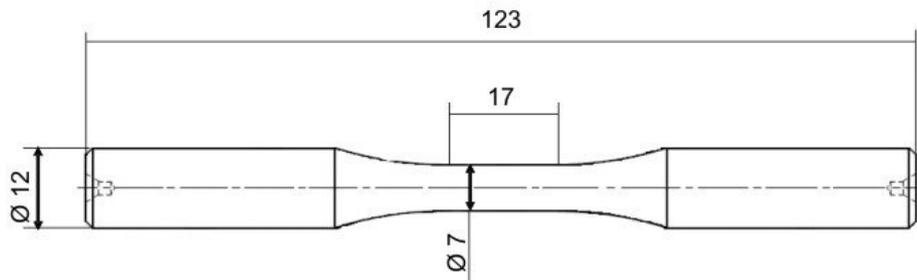


Abbildung 3.2: Geometrie der verwendeten Rundproben

3.3 Charakterisierung des Ausgangszustands

Um die Ergebnisse der mechanischen Oberflächenbehandlungen bewerten zu können, ist die Kenntnis des Randschichtzustands der Proben im Ausgangszustand notwendig.

3.3.1 Flachproben

Die Oberflächentopographie der Flachproben nach dem Schleifen auf Endmaß kann Abbildung 3.3a entnommen werden. Die Oberfläche weist nach dem Schleifen eine mittlere Rauheit von $R_a = 0,411 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,7 \pm 0,231 \mu\text{m}$ auf. Der Eigenspannungszustand entlang der Längs- und Querachse der Probe, sowie die entsprechenden Halbwertsbreiten sind in Abbildung 3.3b dargestellt. Die Eigenspannungen entlang der Probenlängsachse sind vernachlässigbar, entlang der Probenquerachse, d.h. quer zu den Schleifriefen, sind an der Oberfläche -300 MPa vorhanden. Diese sind jedoch bereits nach $20 \mu\text{m}$ auf 0 MPa abgesunken. Die Halbwertsbreite ist durch das Schleifen an der Oberfläche auf $3,3^\circ$ erhöht, im Probeninneren beträgt sie $2,9^\circ$.

3.3.2 Rundproben

In Abbildung 3.4a ist die Oberflächentopographie der gedrehten Rundprobe dargestellt. Es sind deutliche Riefen sichtbar, die durch den Drehprozess erzeugt wurden. Nach dem Schleifen ergeben sich die Rauheiten $R_a = 0,661 \pm 0,016 \mu\text{m}$ und $R_z = 4,09 \pm 0,162 \mu\text{m}$. Der Eigenspannungstiefenverlauf in axialer Richtung sowie der Halbwertsbreitentiefenverlauf können Abbildung 3.4b entnommen werden. An der Oberfläche sind nach dem Drehen leichte Zugeigenspannungen von 200 MPa vorhanden. Die

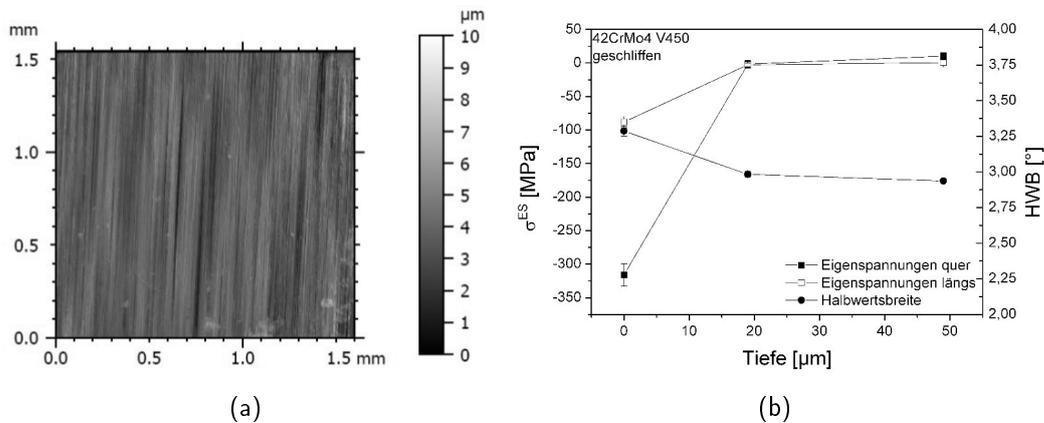


Abbildung 3.3: a) Oberflächentopographie der geschliffenen Flachprobe; b) Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der geschliffenen Flachprobe [114].

Halbwertsbreite ist durch die Bearbeitung an der Oberfläche ebenfalls leicht erhöht und beträgt 4° , im Probeninneren weist das Material eine Halbwertsbreite von etwa $3,2^{\circ}$ auf. Der Unterschied der Halbwertsbreiten der beiden Probengeometrien ist durch die unterschiedlichen Materialchargen und damit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen bedingt.

In Abbildung 3.5 ist die Wöhlerkurve für 42CrMo4 V450 im unbearbeiteten Zustand dargestellt. Es sind Bruchwahrscheinlichkeiten von 5 %, 50 % und 95 % eingezeichnet. Sie liegen im Wechselfestigkeitsbereich bei 462 MPa, 557 MPa und 652 MPa. Die Proben für die Wöhlerkurve, die als Referenz dient, entstammen derselben Materialcharge, wie die hier verwendeten Rundproben, wurden allerdings in einer anderen Werkstatt für ein anderes Projekt gefertigt. Die Parameter bei der Probenherstellung entsprechen nicht exakt denen, die für die mechanisch oberflächenbehandelten Rundproben verwendet wurden. Nach [116] wurden Eigenspannungen von maximal -70 MPa gemessen und können somit als nahezu eigenspannungsfrei bezeichnet werden. Die Rauheit der Proben ist vergleichbar.

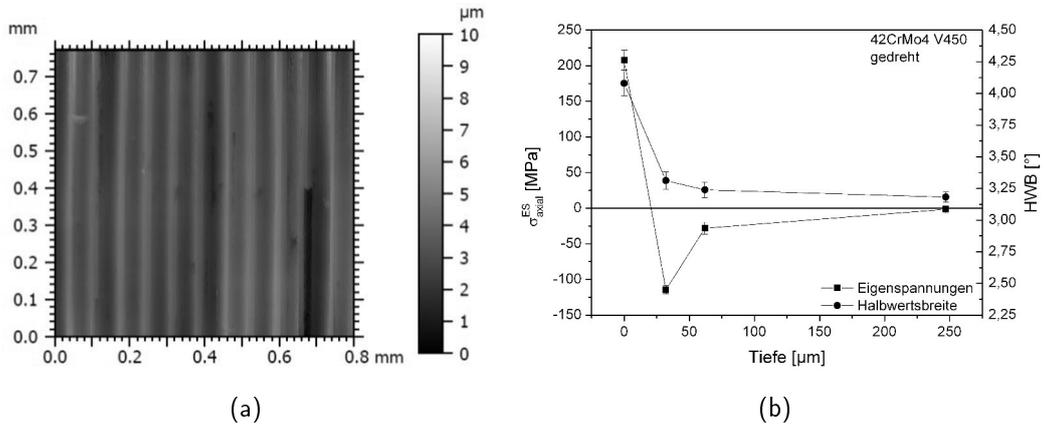


Abbildung 3.4: a) Oberflächentopographie der gedrehten Rundprobe; b) Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der gedrehten Rundprobe [115].

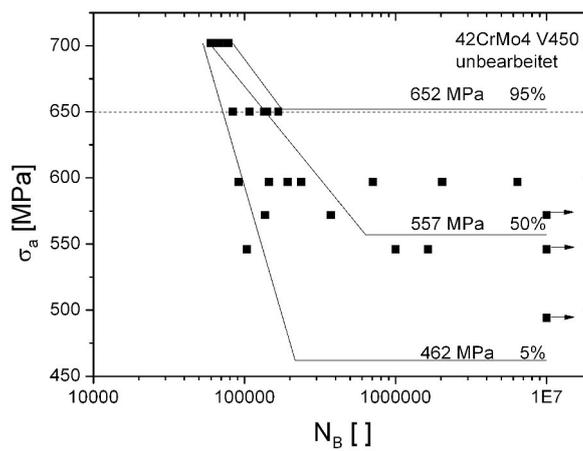


Abbildung 3.5: Wöhlerkurve von unbearbeitetem 42CrMo4 V450 [115].

4 Versuchseinrichtungen und -durchführung

4.1 Mechanische Oberflächenbehandlung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren untersucht. Hauptaugenmerk lag hierbei auf dem Piezopeening (vgl. Kapitel 4.1.1). Nach der Inbetriebnahme der Anlage wurde mit Hilfe gezielter Variationen der Einfluss einzelner Prozessparameter auf den Randschichtzustand untersucht und anschließend der Einfluss, der durch das Piezopeening verfestigten Randschicht, auf die Schwingfestigkeit betrachtet. Um dieses neue Verfahren bewerten zu können, wurden zu Vergleichszwecken die konventionellen Verfahren Kugelstrahlen und Festwalzen mit betrachtet.

4.1.1 Piezopeening

4.1.1.1 Prinzip

Das Piezopeening-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des UIT-Prozesses [27] und zählt zu den maschinellen Oberflächenhämmerverfahren. Beim Piezopeening wird auf jegliche Art von Schwingungsverstärkern verzichtet. Vielmehr wird direkt die von einem Piezoaktor erzeugte Schwingung zur Materialbearbeitung genutzt, siehe Abbildung 4.1. Der Hammerkopf hinterlässt einzelne Einschläge auf der Probe. Der Aktor kann gerichtet verfahren werden, so dass eine gezielte Bearbeitung der Probe möglich ist. Da in diesem Fall mit erzwungenen Schwingungen gearbeitet wird, ist die Frequenz im Gegensatz zu sonotrodengetriebenen Verfahren in gewissen Grenzen frei wählbar. Die Amplitude des Piezoaktors wird gesteuert und während der Bearbeitung aufgezeichnet. Um eine gleichmäßige Bearbeitung zu gewährleisten und geringe Unebenheiten ausgleichen zu können, wird der Kontakt vom Hammerkopf mit der Probe geregelt. Dies geschieht mit Hilfe des Tastverhältnisses T (Verhältnis von Anteil der

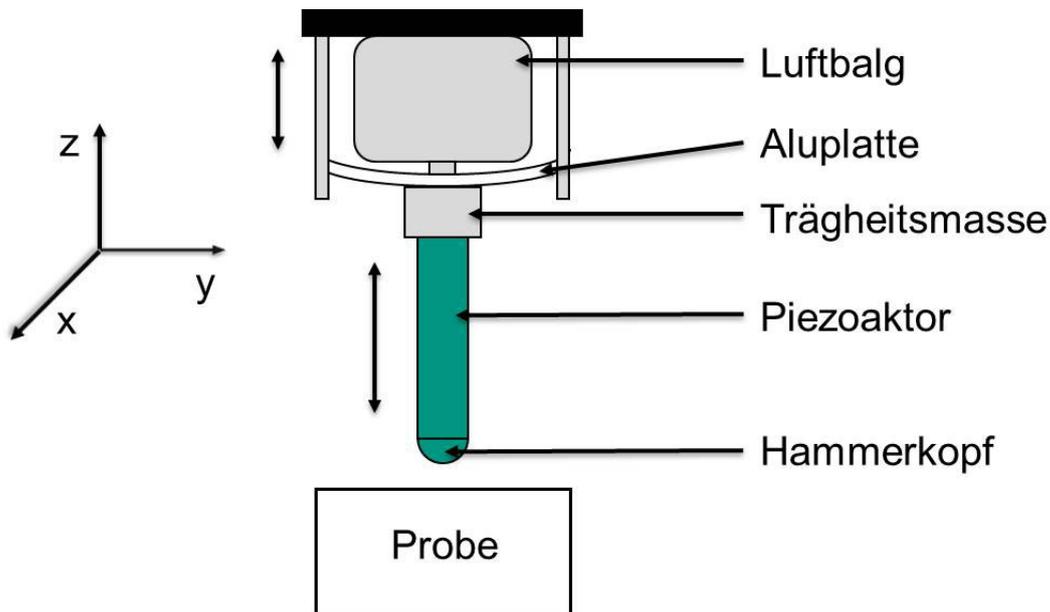


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Piezopeening-Prozesses.

Periodendauer in der ein Kontakt besteht zur Gesamtperiodendauer), siehe Abbildung 4.2. Kommt es zu einer Abweichung vom vorgegebenen Tastverhältnis, wird die z-Position des Aktors mittels eines PI-Reglers nachgeregelt.

4.1.1.2 Experimentelle Umsetzung

Ein Foto des experimentellen Aufbaus der Piezopeening-Anlage ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Zur Erzeugung der mechanischen Schwingungen wird der Piezoaktor (1) P216.40 und die dazugehörige Elektronik der Firma Physik Instrumente GmbH & Co.KG verwendet. Er besitzt einen maximalen Stellweg von $60\ \mu\text{m}$ und eine Resonanzfrequenz von 7 kHz. Der Aktor ist zudem mit einem Anschluss zur Kühlung mittels Druckluft sowie einem DMS-Sensor zur Messung der Dehnung des Aktors ausgestattet. Der Hammerkopf besteht aus einer Kugel, die in einen Kugelhalter geklebt ist. Der Kugelhalter ist mit einem Gewinde am Piezoaktor verschraubt. Der Piezoaktor ist an einer Kraftmessdose (2) zur Erfassung der Prozesskräfte befestigt. Diese wiederum ist über eine Aluminiumplatte mit einem Luftbalg (3) verbunden. Die Aluminiumplatte ist beidseitig an zwei Stangen neben dem Luftbalg festgeklemmt. Um eine gewisse Massenträgheit in das System zu bringen, ist zwischen der Kraftmessdose und der Aluplatte noch eine Stahlplatte befestigt. Dieser ganze Aufbau ist oben an einem höhenverstellbaren Querhaupt verschraubt. Darunter sind auf einem Tisch zwei Lineareinheiten (4) zu einem Kreuztisch verbunden. Darauf können die Proben befestigt und unter dem Aktor in x- und y-Richtung verfahren werden. Das Spannen der Proben

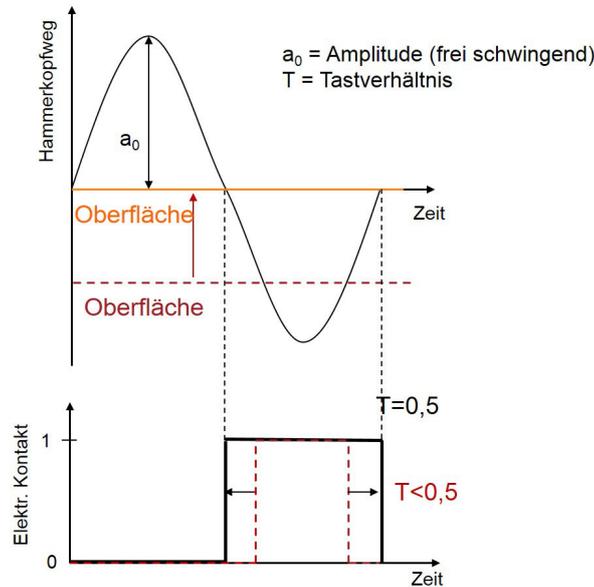


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Tastverhältnisses. Weicht das Tastverhältnis vom geforderten Wert ab (z.B. $T < 0,5$), wird der Abstand von Piezoaktor zur Oberfläche angepasst (Verringern des Abstands zwischen Probe und Hammerkopf).

wird für den Fall der Flachproben mit einem mechanischen Schraubstock (5) realisiert. Die Rundproben werden mit Hilfe von zwei Prismen (6) gelagert und jeweils mit einem Plättchen von oben fixiert. Das eine Ende der Probe wird mit einem Doppelwellengelenk (7) an einen Motor gekoppelt, um die Probe zu drehen, siehe Abbildung 4.4. Der Motor kann Drehzahlen von bis zu $n = 120 \text{ U/min}$ erreichen. Zur Berechnung des Tastverhältnisses wird eine Messung des Kontakts zwischen Hammerkopf und Werkstück genutzt. Dies geschieht mit Hilfe einer elektrischen Schaltung. Dazu ist es erforderlich, dass der Hammerkopf elektrisch leitfähig ist. Alternativ kann der Prozess auch über das Kraftsignal geregelt werden.

Die Bewegungen der einzelnen Komponenten werden mit unterschiedlichen Programmen gesteuert. Die Bewegung des Aktors wird mit Hilfe des Programmes PI Nanocapture der Firma Physik Instrumente GmbH gesteuert. Es können unterschiedliche Bewegungen wie Sinusschwingungen oder ein Dreieckssignal vorgegeben werden. Es werden die gewünschte Frequenz und Amplitude sowie die Anzahl der Wiederholungen eingestellt. Die Lineareinheiten werden mit dem Programm Remote der Firma isel Germany AG gesteuert. Hier können z.B. Mäanderbahnen in den gewünschten Abständen als NC-Programm programmiert werden.

Die Regelung des Prozesses erfolgt mit Hilfe eines LabView Programms. Hiermit kann zunächst eine Offset Position des Aktors eingestellt werden. Dadurch wird der Abstand

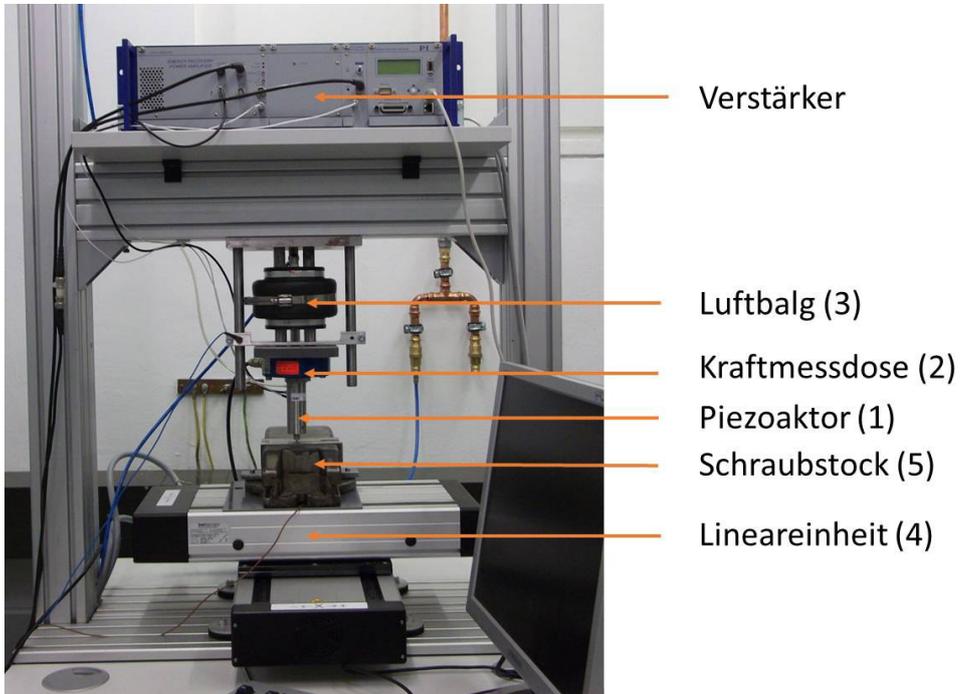


Abbildung 4.3: Experimenteller Aufbau der Piezopeeninganlage.

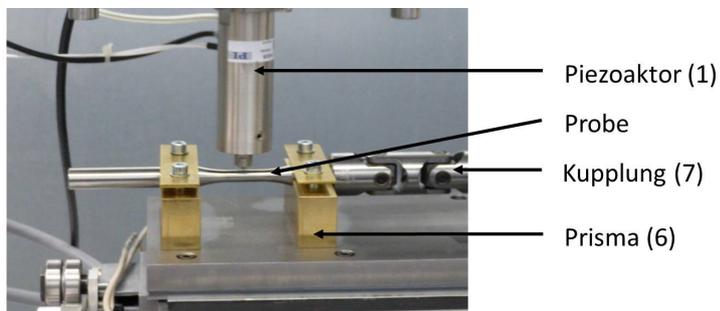


Abbildung 4.4: Fixierung der Rundproben mit Hilfe von Prismen.

des Hammerkopfes zur Probe zu Beginn eingestellt. Dieser Vorgang wird über ein Pneumatikventil bewerkstelligt, welches den Druck im Luftbalg einstellt. Je nach vorherrschendem Druck wird die Aluplatte mehr oder weniger stark durchgebogen und so die Position in z-Richtung eingestellt. Des Weiteren werden das Signal der Kraftmessdose, die Anregungsspannung des Piezoaktors, das Signal des DMS, die Drehzahl des Motors und das Signal der Kontaktschaltung als Eingangssignale angezeigt. Aus dem Signal der Kontaktschaltung oder wahlweise dem Signal der Kraftmessdose wird das Tastverhältnis berechnet. Bei Abweichungen vom gewünschten Tastverhältnis wird durch einem PI-Regler das Ventil des Luftbalgs gesteuert. Durch Änderung des Drucks erhöht oder verringert sich die Durchbiegung der Aluminiumplatte und die Position des Aktors kann im μm -Bereich ohne Stick-slip-Effekt angepasst werden.

Für den Fall, dass der Hammerkopf nicht mehr von der Probe abhebt und somit ein konstanter Kontakt vorliegt, kann messtechnisch kein sinnvolles Tastverhältnis berechnet werden. Die Auswertung ergibt in diesem Fall ein Tastverhältnis von 0 und würde in einer weiteren Bewegung des Aktors auf die Probe zu resultieren. Aus diesem Grund können Reset-Kriterien definiert werden, die dazu führen, dass wieder der Ausgangsdruck des Offsets im Luftbalg eingestellt wird. Zum einen kann hier ein Wert für das Tastverhältnis gewählt werden, bei dessen Überschreiten ein Reset erfolgen soll, zum anderen kann ein Kraftwert gewählt werden, den die Minimalkraft nicht überschreiten darf.

4.1.1.3 Prozessparameter

Prinzipiell können sowohl für Flachproben als auch für Rundproben die folgenden Parameter eingestellt werden:

- Amplitude a des Piezoaktors (0-30 μm)
- Frequenz f des Piezoaktors (0-2,5 kHz)
- Vorschub v in Bearbeitungsrichtung (0-50 mm/s)
- Bahnabstand s zwischen den einzelnen bearbeiteten Bahnen ($\geq 50 \mu\text{m}$)
- Hammerkopfdurchmesser d (2,5-10 mm)
- Hammerkopfhärte HV_H (550-1500 HV)
- Tastverhältnis T (0,3-0,8)

Für Rundproben können der Vorschub und der Bahnabstand mittels der Geschwindigkeit der Linearachse und der Anzahl der Umdrehungen/min des Motors eingestellt wer-

den. Der maximal mögliche Vorschub liegt hier jedoch nur bei etwa 40 mm/s. Weiterhin wäre denkbar, die Geometrie des Hammerkopfes zu verändern. Außerdem kann auch die Bewegung des Aktors anders vorgegeben werden: Hier wäre beispielsweise auch ein Dreieck- oder Rechteckverlauf statt einer Sinusschwingung möglich. Bezüglich der Amplitude wird jeweils der Wert im frei schwingenden Zustand angegeben, also wenn der Aktor mit Hammerkopf schwingt, ohne dabei die Probe zu bearbeiten. Diese Amplitude ist größer als die tatsächliche Amplitude während des Versuchs. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Amplitude, des Vorschubs, des Bahnabstands, des Hammerkopfdurchmessers und der Hammerkopfhärte auf den Randschichtzustand an Flachproben untersucht. Dafür wurde jeweils ein Parameter variiert und die anderen Parameter konstant gehalten. Die konkreten Parameter sind bei den jeweiligen Ergebnissen mit aufgeführt. Die dabei mittels Kraftmessdose gemessenen Kräfte lagen im Bereich von 300-800 N. Anschließend wurden verschiedene Parametersätze bezüglich der Steigerung der Lebensdauer bei axialer Belastung von Rundproben untersucht. Die dafür verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Da aufgrund der unterschiedlichen Lagerung der Flach- und Rundproben bei der Bearbeitung keine direkte Übertragung der Parameter möglich war, wurde versucht mit verschiedenen Hammerkopfhärten und Überdeckungen ein breites Parameterfeld abzudecken. Hierbei sei nochmals erwähnt, dass sich Vorschub auf die Richtung bezieht, in welche der nächste Einschlag erfolgt, und der Vorschub nicht mit der z.B. bei Drehprozessen verwendeten Vorschubrichtung verwechselt werden darf. Hier lagen die Kräfte nur zwischen 100-200 N.

Tabelle 4.1: Piezopeeningparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Amplitude [μm]	18						
Frequenz [Hz]	500						
Tastverhältnis [-]	0,5						
Hammerkopfdurchmesser [mm]	5						
Hammerkopfhärte [HV]	756	1500	555	555	1500	765	555
Vorschub [mm/s]	18,3				36,7		
Bahnabstand [mm]	0,24	0,24	0,24	0,48	0,12	0,24	0,24

4.1.2 Vergleichende Zustände

4.1.2.1 Kugelstrahlen

Für die Kugelstrahlversuche wurde eine Druckluftstrahlanlage der Bauart Baiker verwendet. Die Proben wurden mit einer Aufnahme an der Rotationsvorrichtung befestigt und im Bereich der Messstrecke und des Radius gestrahlt. Um die Prozessparameter für einen Zustand mit möglichst hoher Lebensdauer zu bestimmen, wurden basierend auf [16, 106, 117] verschiedene Parametersätze ausgewählt, die zu unterschiedlichen Almenintensitäten führen, siehe Tabelle 4.2. Es wurden jeweils drei Proben mit der jeweiligen Parameterkombination gestrahlt. Die Vorschubgeschwindigkeit der Düse wurde dabei so gewählt, dass sich eine Überdeckung von etwa 100 % ergab.

Tabelle 4.2: Kugelstrahlparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	K1	K2	K3	K4	K5
Strahlmittel	S170 46 HRC				
Düsendurchmesser [mm]	4				
Abstand Düse-Werkstück [mm]	80				
Strahldruck [bar]	1,2	1,6	1	1	1,6
Massendurchsatz [kg/min]	1	1,5	1,5	2	4
Almenintensität [mmA]	0,29	0,36	0,21	0,18	0,21
Überdeckung	100 %				

4.1.2.2 Festwalzen

Die Festwalzbearbeitung wurde mit dem Festwalzwerkzeug HG6 und dem dazugehörigen Hydraulikaggregat HGP 4.7 der Firma Ecoroll AG durchgeführt. Eine Keramikkugel mit einem Durchmesser von 6,35 mm wird in der Hülse von dem mit Druck beaufschlagten Kühlschmiermittel hydrostatisch und nahezu reibungsfrei gelagert. Der Druck wird mit einem Manometer am Hydraulikaggregat von Hand eingestellt, es sind Drücke bis etwa 360 bar möglich. Durch das Nachführsystem der Hülse von etwa 15 mm wird gewährleistet, dass auch bei Änderungen der Kontur eine konstante Walzkraft auf das Werkstück aufgebracht wird. Das Werkzeug kann mit einem Werkzeughalter an einer Drehbank befestigt werden.

Die Rundproben wurden zum Festwalzen in der Drehmaschine eingespannt und das Festwalzwerkzeug so ausgerichtet, dass die Mitte der Kugel sich auf Höhe der Mitte

der Probe befindet. Die Probe wurde im Bereich der Messtrecke und jeweils 5 mm auf beiden Seiten darüber hinaus festgewalzt. Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Festwalzparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Kugeldurchmesser [mm]	6,35						
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,315						
Drehzahl [U/min]	80						
Festwalzdruck [bar]	100	150	175	200	225	250	300

4.2 Randschichtcharakterisierung

4.2.1 Eigenspannungsmessung

Die Eigenspannungsmessungen wurden röntgenographisch an einem ψ -Diffraktometer „Karlsruher Bauart“ nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren [118] bestimmt. Die Messung erfolgte mit Vanadium-gefilterter $\text{CrK}\alpha$ -Strahlung an den $\{211\}$ -Gitterebenen des α -Eisens. Es wurden 13 äquidistante ψ -Kippungen von $\psi = \pm 60^\circ$ durchgeführt. Der Beugungspeak wurde im Bereich von $2\theta = 148^\circ$ bis $2\theta = 166^\circ$ in Schritten von $\Delta 2\theta = 0,15^\circ$ gemessen. Die Eigenspannungen der Flachproben wurden sowohl senkrecht als auch parallel zur Probenlängsachse ermittelt. Die Eigenspannungen der Rundproben wurden aufgrund des geringen Durchmessers nur in der axialen Richtung gemessen.

Für den Bragg-Winkel von Eisen im spannungsfreien Zustand wurde $2\theta_0^{\{211\}} = 156,394^\circ$ angenommen. Für die Auswertung erfolgte ein linearer Untergrundabzug und anschließend ein Fit nach Pearson VII. Zur Berechnung der röntgenographisch-elastischen Konstanten wurde $E_{\{211\}} = 219911 \text{ MPa}$ und $\nu_{\{211\}} = 0,28$ verwendet. Die mittlere Halbwertsbreite wurde aus den Messungen bei $\psi = 0^\circ$ und $\psi = \pm 20,7^\circ$ bestimmt.

Bei den Flachproben wurde primärseitig eine Rundblende mit nominellem Durchmesser 1 mm verwendet, für die Rundproben eine Rundblende mit nominellen Durchmesser 0,5 mm. Auf der Detektorseite wurde jeweils eine 2 mm-Symmetrisierungsblende [119] verwendet.

Zur Bestimmung eines Tiefenprofils wurde sukzessive nach jeder Messung eine Schicht elektrolytisch abgetragen. Bei den Flachproben wurde ein $10 \times 10 \text{ mm}^2$ großer

Bereich abgetragen, bei den Rundproben erfolgte ein kreisförmiger Abtrag mit einem Durchmesser von 5 mm. Die Eigenspannungsumlagerungen durch den elektrolytischen Abtrag wurden nicht korrigiert.

4.2.2 Bestimmung der Oberflächentopographie

Die Bestimmung der Oberflächenrauheit erfolgte mit dem konfokalen Weißlichtmikroskop „Nanofocus“ und der dazugehörigen Software μ soft. Zur Auswertung der Rauheit wurde nach der DIN EN ISO 4288 [120] eine Grenzwellenlänge von 0,8 mm verwendet.

4.3 Mechanische Beanspruchung

4.3.1 Zyklische Versuche

Die axiale Zug-Druck-Beanspruchung wurde an servohydraulischen Prüfmaschinen der Bauart Schenck durchgeführt. Die Versuche wurden alle bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt. Die Prüffrequenz wurde auf 50 Hz eingestellt und die Grenzlastspielzahl betrug 10^7 Lastspiele. Der Vergleich verschiedener Zustände fand jeweils bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa statt. Für die optimalen Zustände bei $\sigma_a = 650$ MPa wurden vollständige Wöhlerkurven ermittelt. Die Wöhlerkurven wurden jeweils aus den Werten von 20-30 Proben ermittelt, welche nach dem $\arcsin\sqrt{P}$ -Verfahren [121] ausgewertet wurden. Aufgrund der Beanspruchung im Einspannungsbereich der Proben wurden alle Proben ab ca. 2-3 mm außerhalb der Messstrecke auf beiden Seiten zusätzlich kugelgestrahlt. Hierfür wurde der Parametersatz P3, jedoch mit einer 8 mm-Düse, verwendet und mit einer Geschwindigkeit von 260 mm/min die Probe zweimal gestrahlt, so dass eine Überdeckung von 100 % gewährleistet war. Der Bereich der Messstrecke wurde dabei sorgfältig abgedeckt um eine Beeinflussung des Randschichtzustands des zu untersuchenden Probenvolumens zu verhindern.

4.3.2 Fraktographie

Die gebrochenen Proben wurden hinsichtlich des Rissausgangsortes untersucht. Mit einem Makroskop erfolgte eine Aufnahme der Bruchfläche, so dass die Anrisse in Oberflächenanrisse und Volumenrisse aufgeteilt werden konnten. Bei den Proben

4. Versuchseinrichtungen und -durchführung

mit Volumenansatz wurde zusätzlich noch bestimmt, in welcher Tiefe der Ansatz erfolgt ist.

5 Parametervariationen beim Piezopeening

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen Prozessparameter auf den Randschichtzustand dargestellt und diskutiert. Um den Effekt der Parameter besser einordnen zu können wurde ein Referenzzustand gewählt. Die Prozessparameter des Referenzzustandes sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einflusses der Amplitude auf den Randschichtzustand.

Amplitude in μm	18
Hammerkopfdurchmesser in mm	5
Hammerkopfmateriale	100Cr6
Vorschubgeschwindigkeit in mm/s	50
Frequenz in Hz	500
Bahnabstand in μm	400
Tastverhältnis	0,5

Wie in Abbildung 6.3 zu sehen, kommt es durch die Bearbeitung zur Veränderung der ursprünglichen Oberflächentopographie. Es sind nun die Bearbeitungsbahnen und die einzelnen Eindrücke der Kugeln zu erkennen. Die Rauheit beträgt $R_z = 2,18 \mu\text{m}$ und konnte im Vergleich zum Ausgangszustand um etwa 20 % reduziert.

Die Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverläufe sind in Abbildung 5.2 dem Ausgangszustand gegenübergestellt. Durch die Bearbeitung wurden Druckeigenspannungen erzeugt, welche senkrecht zur Bearbeitungsrichtung größer sind als parallel. Zur besseren Beschreibung der Eigenspannungstiefenverläufe werden charakteristische Größen eingeführt: die Eigenspannungen an der Oberfläche σ_{OF}^{ES} , die maximalen Eigenspannungen σ_{max}^{ES} , die Tiefe der maximalen Eigenspannungen x_{max} und die Tiefe des Nulldurchgangs der Eigenspannungen x_0 . Der Nulldurchgang der Eigenspannungen ist richtungsunabhängig, alle anderen Größen können zusätzlich in die Richtungen senkrecht und parallel zur Bearbeitungsrichtung mit den Indizes s und p unterschieden werden. Beim Referenzzustand betragen $\sigma_{OF,s}^{ES}$ und $\sigma_{OF,p}^{ES}$ -700 MPa bzw.

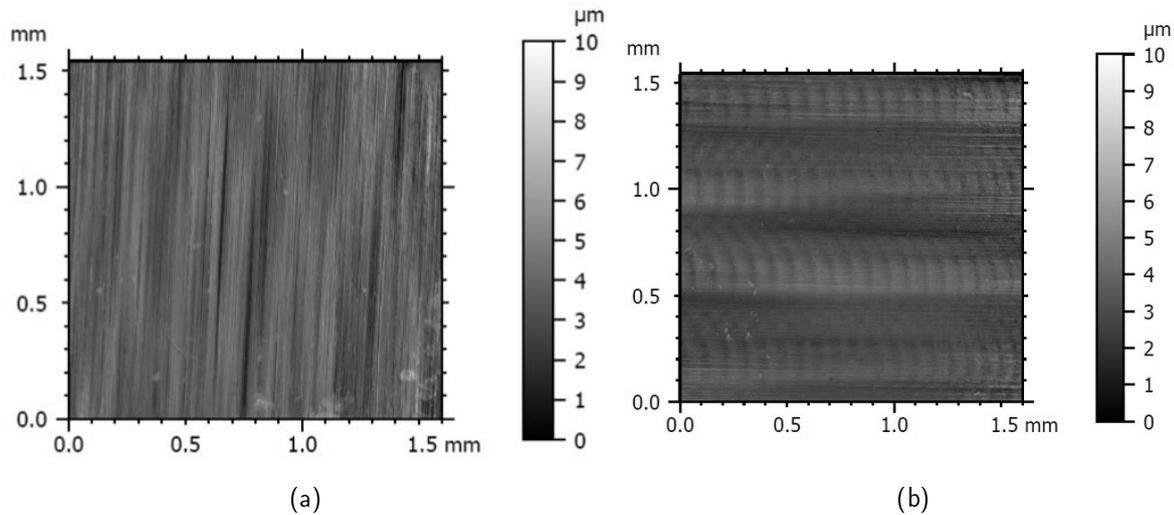


Abbildung 5.1: Vergleich der Oberflächentopographie von 42CrMo4 V450 a) im Ausgangszustand; b) parallel zur Vorschubrichtung.

-400 MPa, x_0 befindet sich in einer Tiefe von etwa $230 \mu\text{m}$. Die Form der Eigenspannungstiefenverläufe ist unterschiedlich, senkrecht zur Bearbeitungsrichtung ist das Maximum der Druckeigenspannungen an der Oberfläche, also $\sigma_{OF,p}^{ES} = \sigma_{max,p}^{ES}$. Parallel zur Bearbeitungsrichtung kommt es zu einem Maximum unterhalb der Oberfläche bei etwa $x_{max,p} = 50 \mu\text{m}$ mit $\sigma_{max,p}^{ES} = -500 \text{ MPa}$. Ab einer Tiefe von etwa $125 \mu\text{m}$ liegt ein isotroper Eigenspannungszustand vor. Die Halbwertsbreite entspricht an der Oberfläche etwa dem Ausgangswert und nimmt in die Tiefe hin langsamer als im Ausgangszustand ab. Zwischen $100 \mu\text{m}$ und $150 \mu\text{m}$ liegen die Werte bei $2,9^\circ$ und sinken anschließend weiter bis auf $2,8^\circ$ in $250 \mu\text{m}$ Tiefe.

5.1 Einfluss der Amplitude auf den Randschichtzustand

Um den Einfluss der Amplitude auf den Randschichtzustand zu untersuchen, wurden drei verschiedene Amplituden verwendet. Die Amplituden betragen im frei schwingenden Zustand nominell $15 \mu\text{m}$, $18 \mu\text{m}$ und $24 \mu\text{m}$. Die genauen Prozessparameter sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

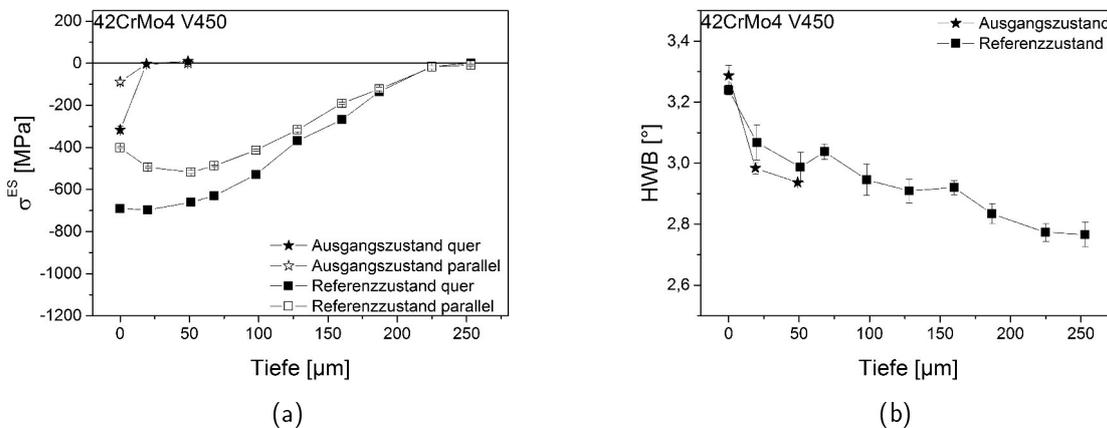


Abbildung 5.2: Vergleich der a) Eigenspannungstiefenverläufe und b) Halbwertsbreitentiefenverläufe von 42CrMo4 V450 im Ausgangszustand und im Referenzzustand [114].

Tabelle 5.2: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einflusses der Amplitude auf den Randschichtzustand.

				Referenz
Amplitude in μm	15	18	24	18
Hammerkopfdurchmesser in mm	5			5
Hammerkopfmateriale	100Cr6			100Cr6
Vorschubgeschwindigkeit in mm/s	50			50
Frequenz in Hz	500			500
Bahnabstand in μm	100			400
Tastverhältnis	0,5			0,5

5.1.1 Rauheit

Die Oberflächentopographien nach der Bearbeitung sind in Abbildung 5.3 einander gegenüber gestellt. Bei allen drei Amplituden sind eindeutig Bearbeitungsriefen zu erkennen. Bei $a=15\mu\text{m}$ und $a=18\mu\text{m}$ sind wie im Referenzzustand noch die einzelnen Hammerkopfeindrücke zu erkennen, bei $a=24\mu\text{m}$ dominieren die Bearbeitungsriefen. Die resultierenden gemittelten Rautiefen Rz nach dem Piezopeening sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Die Amplituden $15\mu\text{m}$ und $18\mu\text{m}$ führen zu einer Verringerung der Rauheit um etwa 18% gegenüber dem Ausgangszustand und sind mit dem Referenzzustand vergleichbar. Die Amplitude $24\mu\text{m}$ bewirkt eine deutliche Erhöhung der Rauheit um 67%.

5. Parametervariationen beim Piezopeening

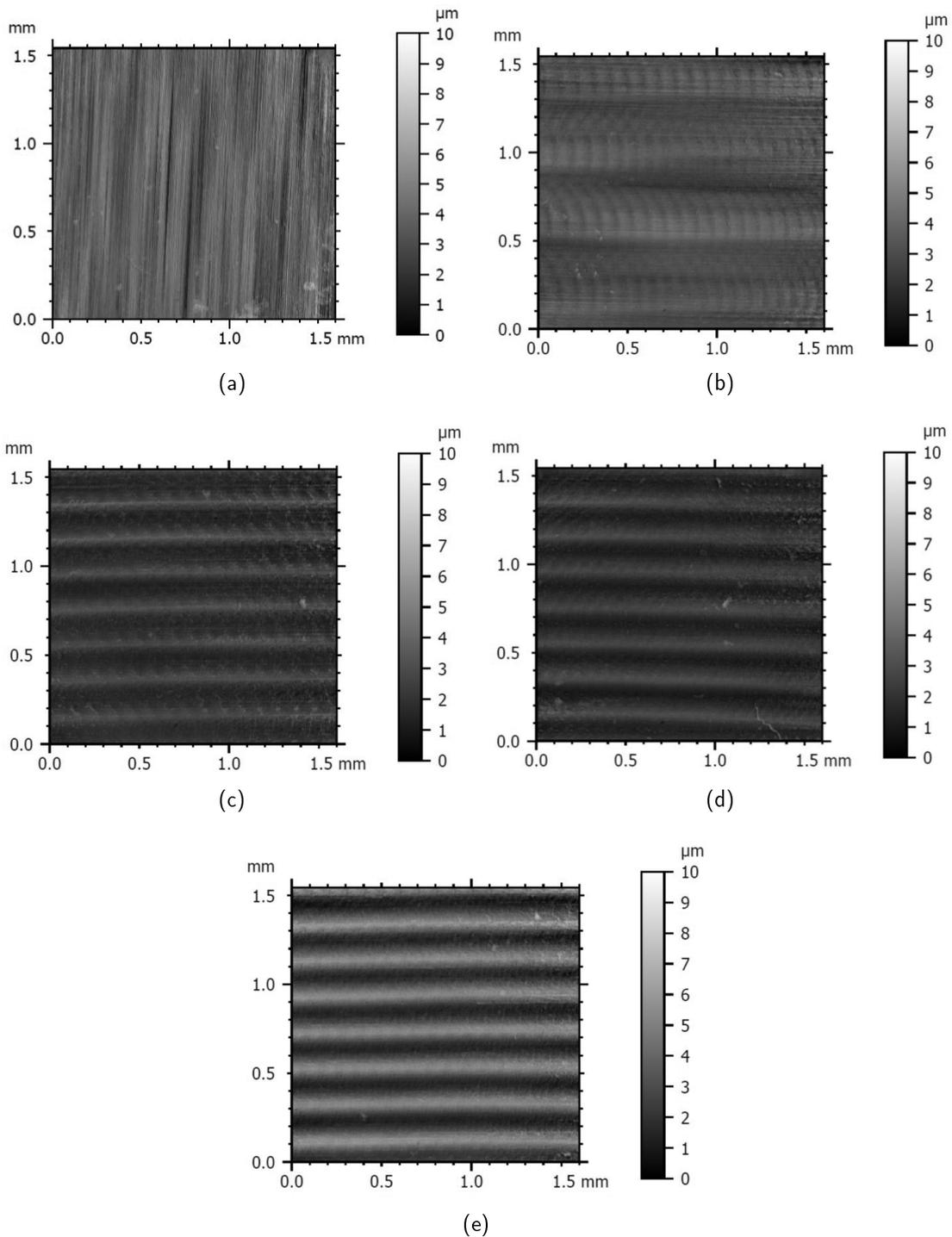


Abbildung 5.3: Übersicht der Oberflächenaufnahmen nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Amplitude: a) Ausgangszustand; b) Referenzzustand; c) Amplitude 15 μm ; d) Amplitude 18 μm ; e) Amplitude 24 μm .

Tabelle 5.3: Rauheiten Rz in Abhängigkeit der Amplitude.

Amplitude in μm	Ausgangsz.	Referenz	15	18	24
Rauheit Rz	2,7	2,18	2,23	2,17	4,52
in μm	$\pm 0,231$	$\pm 0,268$	$\pm 0,391$	$\pm 0,268$	$\pm 0,338$

5.1.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Druckeigenspannungen und deren Eindringtiefe sind deutlich größer als im Referenzzustand. Für die drei unterschiedlichen Amplituden sind senkrecht etwa gleich große Druckeigenspannungen von etwa $\sigma_{OF,s}^{ES} = -1100$ MPa an der Oberfläche zu messen, siehe Abbildung 5.4a. Der Nulldurchgang erfolgt für $a=15\ \mu\text{m}$ und $a=18\ \mu\text{m}$ bei $x_0=550\ \mu\text{m}$, bei $a=24\ \mu\text{m}$ kann eine Eindringtiefe von $x_0=700\ \mu\text{m}$ beobachtet werden. Die Form der Tiefenverläufe unterscheidet sich von der des Referenzzustandes, bei etwa der halben Eindringtiefe kommt es zur Ausbildung von einer Art Wendepunkt oder sogar zu einem Plateau. Aus diesem Grund wird ein weiterer charakteristischer Wert, die Tiefe des Wendepunktes/Mitte des Plateaus x_{WP} eingeführt. Da dieser Verlauf nur senkrecht zur Bearbeitungsrichtung beobachtet wird, bezieht sich x_{WP} immer auf diese Eigenspannungskomponente. Bei $a=15\ \mu\text{m}$ und $a=18\ \mu\text{m}$ liegt x_{WP} bei etwa $150\ \mu\text{m}$, bei $a=24\ \mu\text{m}$ ist die Mitte des Plateaus bei $x_{WP}=300\ \mu\text{m}$. In paralleler Richtung ist $\sigma_{OF,p}^{ES} = -350$ MPa ebenfalls für alle drei Amplituden vergleichbar. In diesen Fall weisen die Eigenspannungstiefenverläufe das Maximum unterhalb der Oberfläche auf. Bei $a=15\ \mu\text{m}$ liegt bei $x_{max}=50\ \mu\text{m}$ ein Maximum von $\sigma_{max,p}^{ES} = -400$ MPa, bei $a=18\ \mu\text{m}$ bei $x_{max}=200\ \mu\text{m}$ ein Maximum von $\sigma_{max,p}^{ES} = -450$ MPa und bei $a=24\ \mu\text{m}$ in einer Tiefe von $x_{max}=350\ \mu\text{m}$ ein $\sigma_{max,p}^{ES} = -500$ MPa vor. Wie schon beim Referenzzustand in Abbildung 5.2a zu erkennen, liegt auch hier ab einer gewissen Tiefe ein isotroper Eigenspannungszustand vor, so dass der Nulldurchgang der beiden gemessenen Spannungskomponenten in der selben Tiefe gemessen wird.

5.1.3 Verfestigungszustand

Die Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening mit verschiedenen Amplituden sind in Abbildung 5.5 aufgetragen. Bei den Halbwertsbreitentiefenverläufen ist festzuhalten, dass an der Oberfläche alle Werte der bearbeiteten Proben unterhalb dem Wert des Ausgangszustands von $3,3^\circ$ liegen. Allgemein ist festzuhalten, dass die Unterschiede relativ gering sind und größtenteils im Bereich der Messunsicherheiten liegen. Allen Verläufen ist jedoch gemeinsam, dass zunächst ein Abfall mit anschlie-

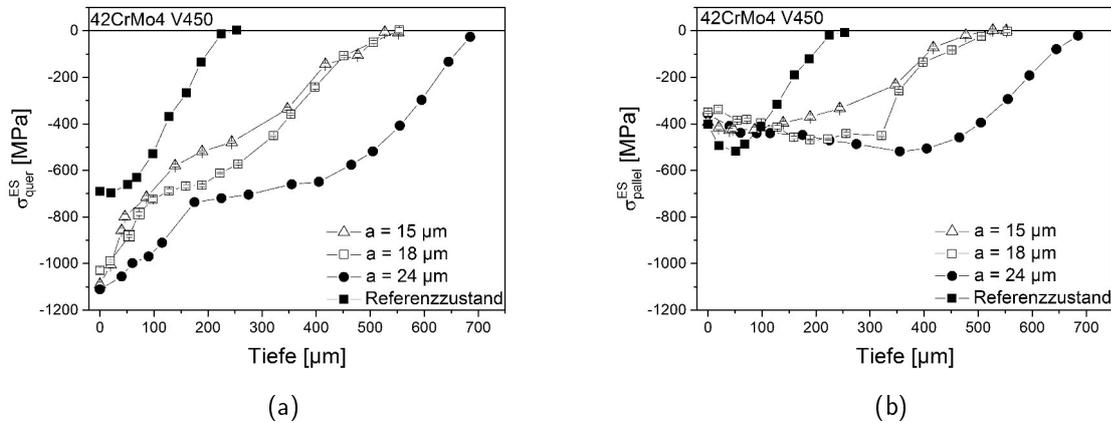


Abbildung 5.4: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Amplitude a) senkrecht zur Vorschubrichtung; b) parallel zur Vorschubrichtung [114].

Bendem Anstieg der HWB zu verzeichnen ist. Der Oberflächenwert ist für $a=15\ \mu\text{m}$ am höchsten, für $a=18\ \mu\text{m}$ am geringsten. Allerdings ist das Niveau im Probeninneren um $0,3^\circ$ geringer als bei den anderen beide Amplituden.

5.2 Einfluss des Bahnabstands auf den Randschichtzustand

Um den Einfluss des Bahnabstands auf den Randschichtzustand zu untersuchen, wurden fünf verschiedene Bahnabstände s untersucht. Diese wurden nach der Messung der Breite einer Bahn ausgewählt. Unter Verwendung der Parameter aus Tabelle 5.4 ergibt sich bei einmaliger Verfestigung eine Bahnbreite von etwa $750\ \mu\text{m}$. Es wurden daraufhin Bahnabstände von $100\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, $400\ \mu\text{m}$, $600\ \mu\text{m}$ und $800\ \mu\text{m}$ untersucht.

5.2.1 Rauheit

In Abbildung 5.6 können die unterschiedlichen Oberflächen nach der Bearbeitung verglichen werden. Es können abhängig vom jeweiligen Bahnabstand die Bearbeitungsriefen und die einzelnen Eindrücke beobachtet werden. Zudem sind auch die Schleifriefen der Probenherstellung noch zu sehen, mit zunehmender Überdeckung also geringer werdendem Bahnabstand ist die ursprüngliche Oberfläche weniger erkennbar. Die

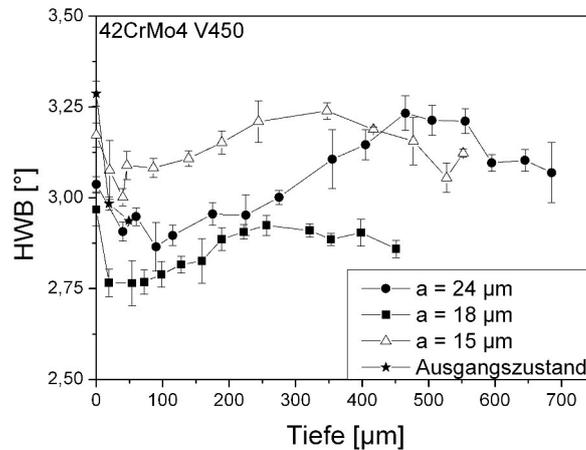


Abbildung 5.5: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Amplitude [114].

Tabelle 5.4: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einfluss des Bahnabstands auf den Randschichtzustand.

		Referenz		
Amplitude in μm	18	18	18	
Hammerkopfdurchmesser in mm	5	5	5	
Hammerkopfmaterial	100Cr6	100Cr6	100Cr6	
Vorschubgeschwindigkeit in mm/s	50	50	50	
Frequenz in Hz	500	500	500	
Bahnabstand in μm	100 200	400	600	800
Tastverhältnis	0,5	0,5	0,5	

resultierenden Rauheiten nach dem Piezopeening sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Der Wert für 800 μm ist jedoch aufgrund der Grenzwellenlänge von 800 μm nur bedingt aussagekräftig, da in diesem Fall die Bearbeitungsbahnen als Welligkeit herausgefiltert werden. Für die Werte bis zu einem Bahnabstand von 600 μm lässt sich beobachten, dass mit steigendem Bahnabstand zunächst eine deutliche Verringerung der Rauheit erreicht werden kann. Die größte Abnahme der Rauheit wurde bei 200 μm gemessen, anschließend erfolgt wieder eine Zunahme der Rauheit, die bei 600 μm sogar den Ausgangswert übersteigt.

5. Parametervariationen beim Piezopeening

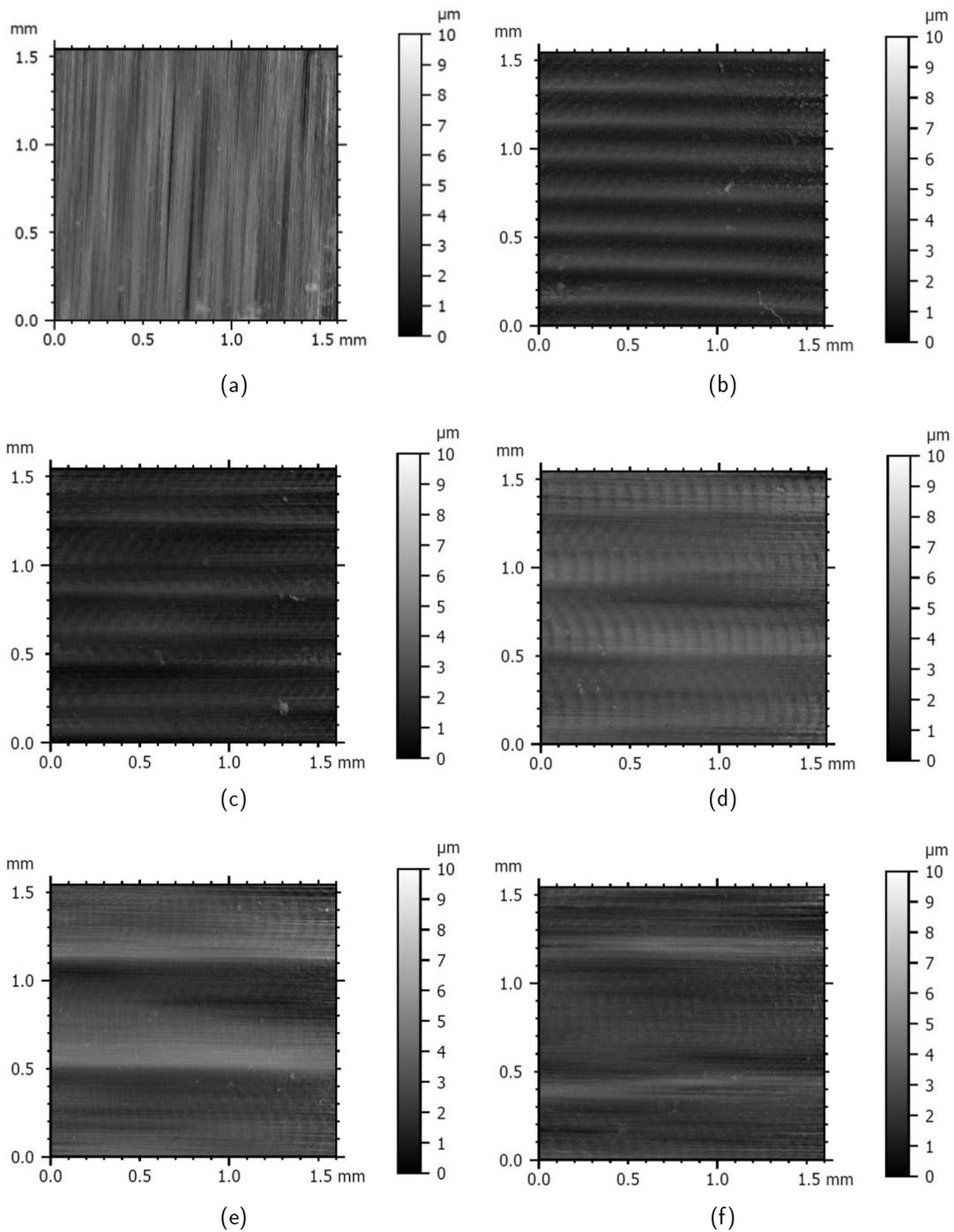


Abbildung 5.6: Übersicht der Oberflächenaufnahmen nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Bahnabstands: a) Ausgangszustand; b) Bahnabstand 100 μm ; c) Bahnabstand 200 μm ; d) Bahnabstand 400 μm (Referenzzustand); e) Bahnabstand 600 μm ; f) Bahnabstand 800 μm .

Tabelle 5.5: Rauheiten Rz in Abhängigkeit des Bahnabstands.

Bahnabstand in μm	Ausgangsz.	100	200	400 (Referenz)	600	800
Rauheit Rz in μm	2,7 $\pm 0,231$	2,17 $\pm 0,268$	2,02 $\pm 0,38$	2,18 $\pm 0,268$	2,91 $\pm 0,326$	(2,62) $\pm 0,217$

5.2.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Es ist ein deutlicher Einfluss des Bahnabstands zu erkennen. Senkrecht zur Vorschubrichtung liegen die maximalen Eigenspannungen für alle Bahnabstände an der Oberfläche, unterscheiden sich jedoch deutlich. Von $s=800\ \mu\text{m}$ bis $s=400\ \mu\text{m}$ steigen die Druckeigenspannungen von $\sigma_{OF,s}^{ES}=-600\ \text{MPa}$ bis $-700\ \text{MPa}$, für $s=200\ \mu\text{m}$ liegt $\sigma_{OF,s}^{ES}$ knapp unter $-1000\ \text{MPa}$, für $s=100\ \mu\text{m}$ bei $\sigma_{OF,s}^{ES}=-1050\ \text{MPa}$. Der Nulldurchgang sinkt mit steigendem Bahnabstand von $x_0=500\ \mu\text{m}$ bei $s=100\ \mu\text{m}$ bis auf $x_0=80\ \mu\text{m}$ bei $s=800\ \mu\text{m}$. Des Weiteren ist bei $s=100\ \mu\text{m}$ bei $x_{WP}=150\ \mu\text{m}$ und $s=200\ \mu\text{m}$ bei $x_{WP}=120\ \mu\text{m}$ ein Wendepunkt zu beobachten. Parallel zur Vorschubrichtung liegt $\sigma_{OF,p}^{ES}$ im Bereich von -300 bis $-500\ \text{MPa}$. Die Form der einzelnen Tiefenverläufe unterscheidet sich prinzipiell. Bei $s=600\ \mu\text{m}$ und $s=800\ \mu\text{m}$ kommt es zu einer monotonen Abnahme der Druckeigenspannungen, bei den anderen Tiefenverläufen tritt ein Eigenspannungsmaximum unter der Oberfläche auf. x_{max} von $s=200\ \mu\text{m}$ und $s=400\ \mu\text{m}$ liegt in einer Tiefe von etwa $50\ \mu\text{m}$, bei $s=100\ \mu\text{m}$ in einer Tiefe von etwa $200\ \mu\text{m}$.

5.2.3 Verfestigungszustand

Die Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening mit verschiedenen Amplituden sind in Abbildung 5.8 aufgetragen. Die HWB-Verläufe der Bahnabstände $s=400$ - $800\ \mu\text{m}$ sind sehr ähnlich. Sie beginnen an der Oberfläche etwa auf dem Niveau des Ausgangsmaterials bei $3,3^\circ$ und fallen dann im weiteren Verlauf ab. Bei $s=200\ \mu\text{m}$ liegt der Wert an der Oberfläche etwas niedriger, bei $3,1^\circ$, und fällt dann ebenfalls ab. Der HWB-Tiefenverlauf für $s=100\ \mu\text{m}$ wurde bereits in Abschnitt 5.1.3 beschrieben. Er hat die geringste HWB an der Oberfläche und endet im weiteren Verlauf etwa auf dem Niveau der anderen Proben.

5. Parametervariationen beim Piezopeening

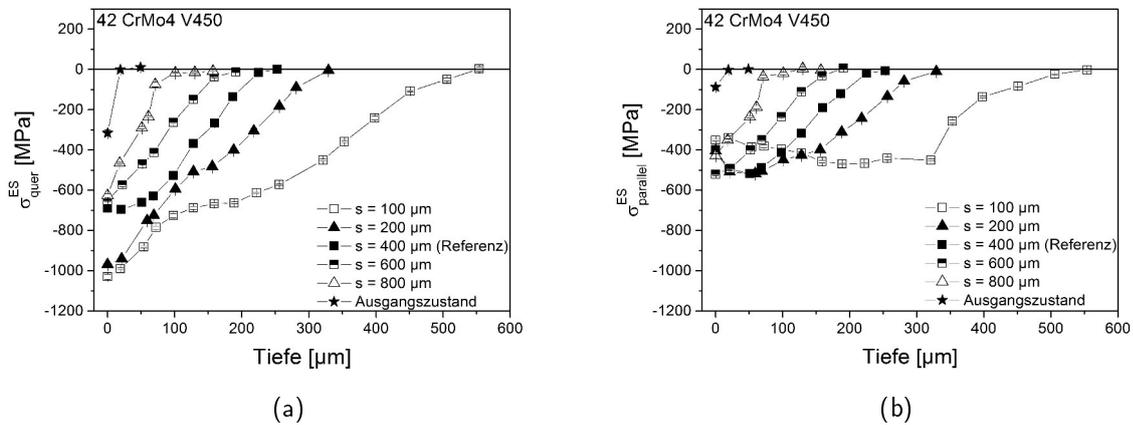


Abbildung 5.7: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Bahnabstands a) senkrecht zur Vorschubrichtung; b) parallel zur Vorschubrichtung [114].

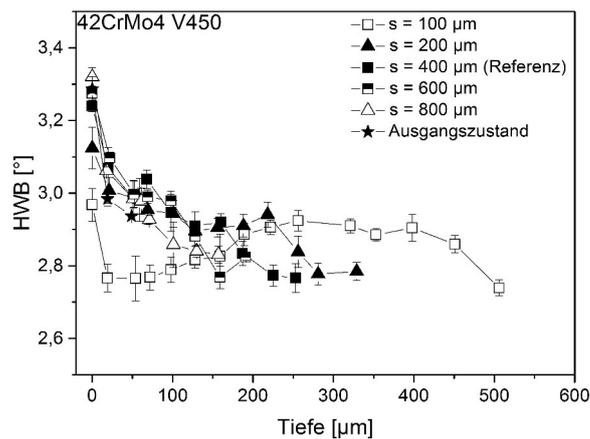


Abbildung 5.8: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Bahnabstands [114].

5.3 Einfluss des Vorschubs auf den Randschichtzustand

Um den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Randschichtzustand zu bestimmen wurden für drei verschiedene Bahnabstände zwei Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Es wurden für die Bahnabstände 400 μm , 600 μm und 800 μm die Vorschubgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$ und $v = 50 \text{ mm/s}$ verwendet. Die anderen Prozessparameter wurden konstant gehalten und können Tabelle 5.6 entnommen werden.

Tabelle 5.6: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Randschichtzustand.

				Referenz			
Amplitude in μm	18			18	18		
Hammerkopfdurchmesser in mm	5			5	5		
Hammerkopfmateri	100Cr6			100Cr6	100Cr6		
Vorschub in mm/s	1			50	50		
Frequenz in Hz	500			500	500		
Bahnabstand in μm	400	600	800	400	600	800	
Tastverhältnis	0,5			0,5	0,5		

5.3.1 Rauheit

Der Vorschub hat einen deutlichen Einfluss auf die Ausprägung der Oberflächentopographie nach der Bearbeitung, siehe Abb. 5.9. Bei $v=50 \text{ mm/s}$ sind einzelne Abdrücke erkennbar und die Bearbeitungsriefen nur schwach ausgeprägt, die Schleifriefen der unbearbeiteten Oberfläche können noch erkannt werden. Bei $v=1 \text{ mm/s}$ können keine Einschläge identifiziert werden. Die Ausprägung der Bearbeitungsriefen ist deutlich stärker, die Schleifriefen sind nur bei $s=800 \mu\text{m}$ noch zu erahnen. Die resultierenden Rauheiten nach dem Piezopeening sind in Tabelle 5.7 dargestellt. Die Rauheiten für den geringeren Vorschub $v=1 \text{ mm/s}$ sind zum einen höher als die Rauheit im Ausgangszustand, zum anderen mehr als doppelt so hoch wie für die höhere Vorschubgeschwindigkeit. Des Weiteren wird auch für 1 mm/s bestätigt, dass mit zunehmendem Bahnabstand die Rauheit zunimmt. Die Werte für den Bahnabstand 800 μm sind, wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, nicht repräsentativ, da aufgrund der Grenzwellenlänge die Bearbeitungsriefen als Welligkeit interpretiert werden.

5. Parametervariationen beim Piezopeening

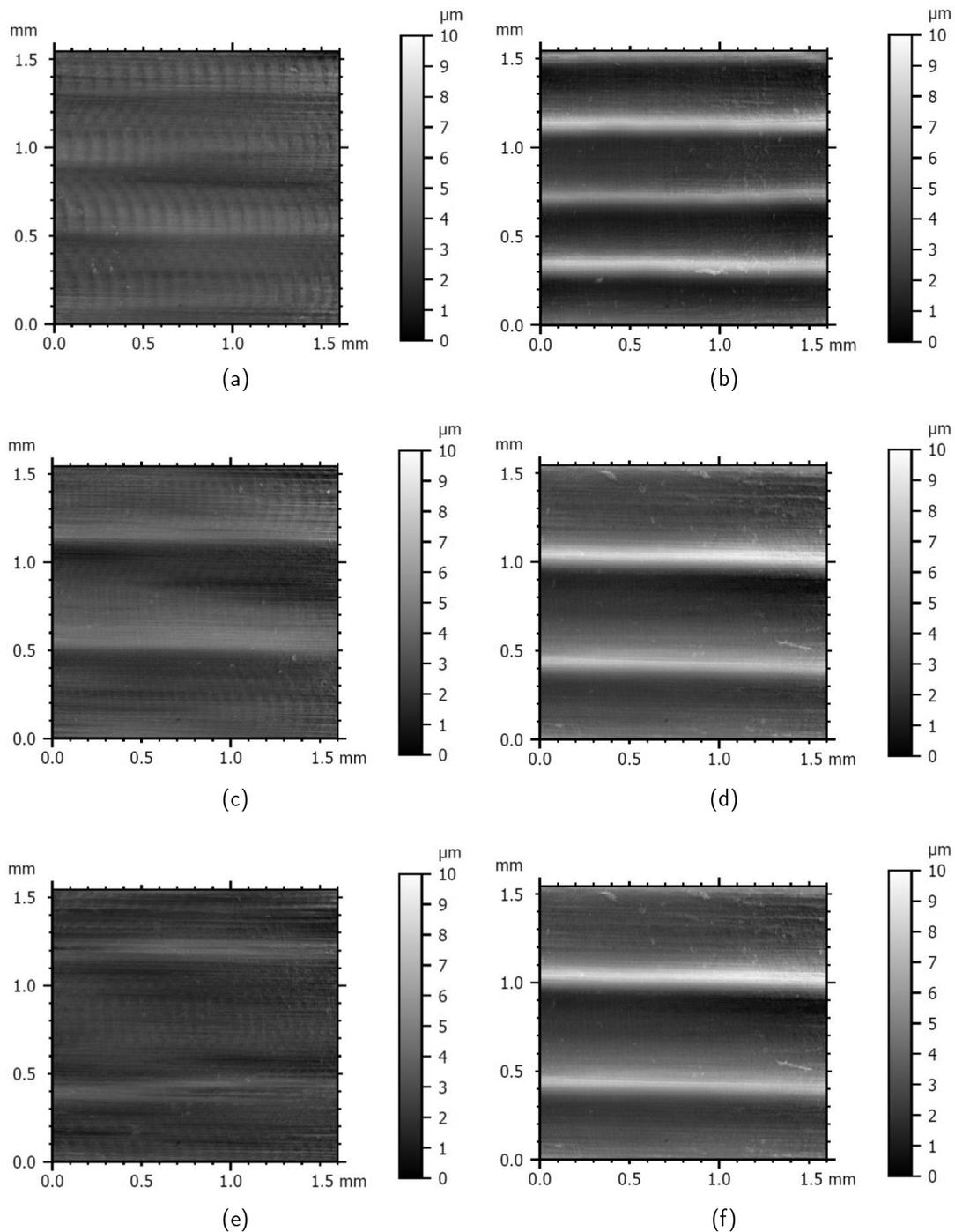


Abbildung 5.9: Übersicht der Oberflächenaufnahmen nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Vorschubs: a) $v = 50 \text{ mm/s}$, $s = 400 \mu\text{m}$ (Referenzzustand); b) $v = 1 \text{ mm/s}$, $s = 400 \mu\text{m}$; c) $v = 50 \text{ mm/s}$, $s = 600 \mu\text{m}$; d) $v = 1 \text{ mm/s}$, $s = 600 \mu\text{m}$; e) $v = 50 \text{ mm/s}$, $s = 800 \mu\text{m}$; f) $v = 1 \text{ mm/s}$, $s = 800 \mu\text{m}$.

Tabelle 5.7: Rauheiten Rz in Abhängigkeit des Vorschubs.

Ausgangszustand	Rz = $2,7 \pm 0,231 \mu\text{m}$		
Vorschub $v = 1 \text{ mm/s}$	$s = 400 \mu\text{m}$	$s = 600 \mu\text{m}$	$s = 800 \mu\text{m}$
Rauheit Rz in μm	$6,06 \pm 0,265$	$6,62 \pm 0,348$	$3,87 \pm 0,278$
Vorschub $v = 50 \text{ mm/s}$	$s = 400 \mu\text{m}$	$s = 600 \mu\text{m}$	$s = 800 \mu\text{m}$
Rauheit Rz in μm	$2,18 \pm 0,268$	$2,91 \pm 0,326$	$2,62 \pm 0,217$

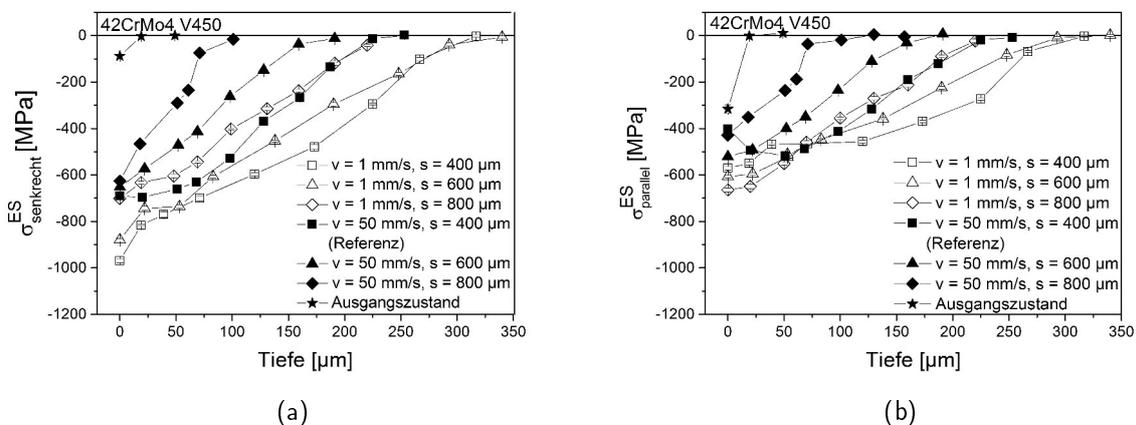


Abbildung 5.10: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Vorschubs a) senkrecht zur Vorschubrichtung; b) parallel zur Vorschubrichtung [114].

5.3.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Abbildung 5.10a zeigt, dass bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/s}$ im Vergleich zu $v = 50 \text{ mm/s}$ Eigenspannungstiefenverläufe in senkrechter Richtung zu höheren Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,s}^{ES}$ und höheren Eindringtiefen x_0 verschoben werden. Die Tiefenverläufe für $v=1 \text{ mm/s}$ zeigen einen Wendepunkt x_{WP} , der bei allen drei Bahnabständen etwa zwischen $25\text{-}50 \mu\text{m}$ liegt. Dieser Wendepunkt trat bei $v=50 \text{ mm/s}$ nur bei geringeren als den hier betrachteten Bahnabständen auf. In paralleler Richtung, siehe Abbildung 5.10b, kommt es bei dem geringeren Vorschub auch zu höheren Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,p}^{ES}$ und Eindringtiefen x_0 , wobei hier bei $v=1 \text{ mm/s}$ für alle drei Bahnabstände das Maximum der Druckeigenspannungen an der Oberfläche vorliegt. Einzig der Referenzzustand zeigt das Maximum $\sigma_{max,p}^{ES}$ unterhalb der Oberfläche.

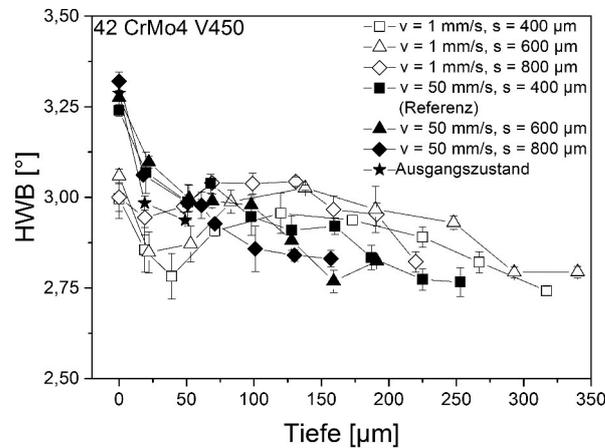


Abbildung 5.11: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Vorschubs [114].

5.3.3 Verfestigungszustand

Die Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening mit verschiedenen Vorschüben sind in Abbildung 5.11 aufgetragen. Die Halbwertsbreitentiefenverläufe bei $v = 50$ mm/s beginnen alle an der Oberfläche etwa beim Wert des Ausgangszustands und fallen dann auf etwa $2,8^\circ$ ab. Die Verläufe von $v = 1$ mm/s liegen an der Oberfläche niedriger als der Ausgangszustand bei etwa 3° , fallen in den ersten $50\ \mu\text{m}$ ab, je geringer der Bahnabstand umso stärker, steigen anschließend wieder auf das Ausgangsniveau und sinken dann ebenfalls bis auf etwa $2,8^\circ$.

5.4 Einfluss des Hammerkopfdurchmessers auf den Randschichtzustand

Um den Einfluss des Durchmessers des Hammerkopfs auf den Randschichtzustand zu untersuchen wurden drei verschiedene Durchmesser d verwendet: $2,5$ mm, 5 mm und 10 mm. Auch hier wurde zunächst für jeden Hammerkopf die resultierende Bahnweite bestimmt und der Bahnabstand so gewählt, dass er die Hälfte der Bahnweite beträgt. Die anderen Parameter wurden konstant gehalten und können Tabelle 5.8 entnommen werden.

Tabelle 5.8: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einfluss des Hammerkopfdurchmessers auf den Randschichtzustand.

	Referenz		
Amplitude in μm	18		
Hammerkopfdurchmesser in mm	2,5	5	10
Hammerkopfmateriale	100Cr6		
Vorschub in mm/s	50		
Frequenz in Hz	500		
Bahnabstand in μm	250	400	350
Tastverhältnis	0,5		

5.4.1 Rauheit

Die Einschläge der verschiedenen Hammerkopfdurchmesser zeichnen sich unterschiedlich stark auf der Probenoberfläche ab, siehe Abb. 5.12. Bei $d=2,5\text{ mm}$ entstehen ausgeprägt, tiefe Bearbeitungsriefen, die ursprünglichen Schleifriefen sind nicht mehr zu erkennen, einzelne Eindrücke können nur erahnt werden. Bei $d=5\text{ mm}$ sind die Eindrücke noch schwach zu erkennen und bei $d=10\text{ mm}$ sind keine eindeutigen Eindrücke mehr erkennbar, eine leichte Riefenstruktur ist noch zu sehen. Die resultierenden Rauheiten nach dem Piezopeening sind in Tabelle 5.9 aufgelistet. Die Rauheitswerte zeigen bei einem Hammerkopfdurchmesser von $d = 2,5\text{ mm}$ eine deutliche Erhöhung der Rauheit um einen Faktor 4. Mit größer werdendem Durchmesser wird die Rauheit verringert, die Werte von $d = 5\text{ mm}$ und $d = 10\text{ mm}$ liegen unterhalb des Ausgangswerts.

Tabelle 5.9: Rauheiten Rz in Abhängigkeit des Hammerkopfdurchmessers [122].

Hammerkopf- \varnothing in mm	Ausgangszustand	2,5	5 (Referenz)	10
Rauheit Rz in μm	$2,7 \pm 0,231$	$10,5 \pm 0,444$	$2,18 \pm 0,268$	$2,0 \pm 0,345$

5.4.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Senkrecht zur Vorschubrichtung werden mit dem $2,5\text{ mm}$ -Durchmesser die höchsten Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,s}^{ES}$ von -1100 MPa und die maximalen Druckspannungen σ_{max}^{ES} von -1200 MPa in einer Tiefe x_{max} von $100\text{ }\mu\text{m}$, sowie die größte Eindringtiefe x_0 von etwa 1 mm gemessen. Für die Durchmesser $d = 5\text{ mm}$ und $d = 10\text{ mm}$ liegt das Maximum der Eigenspannungen nur knapp unter der

5. Parametervariationen beim Piezopeening

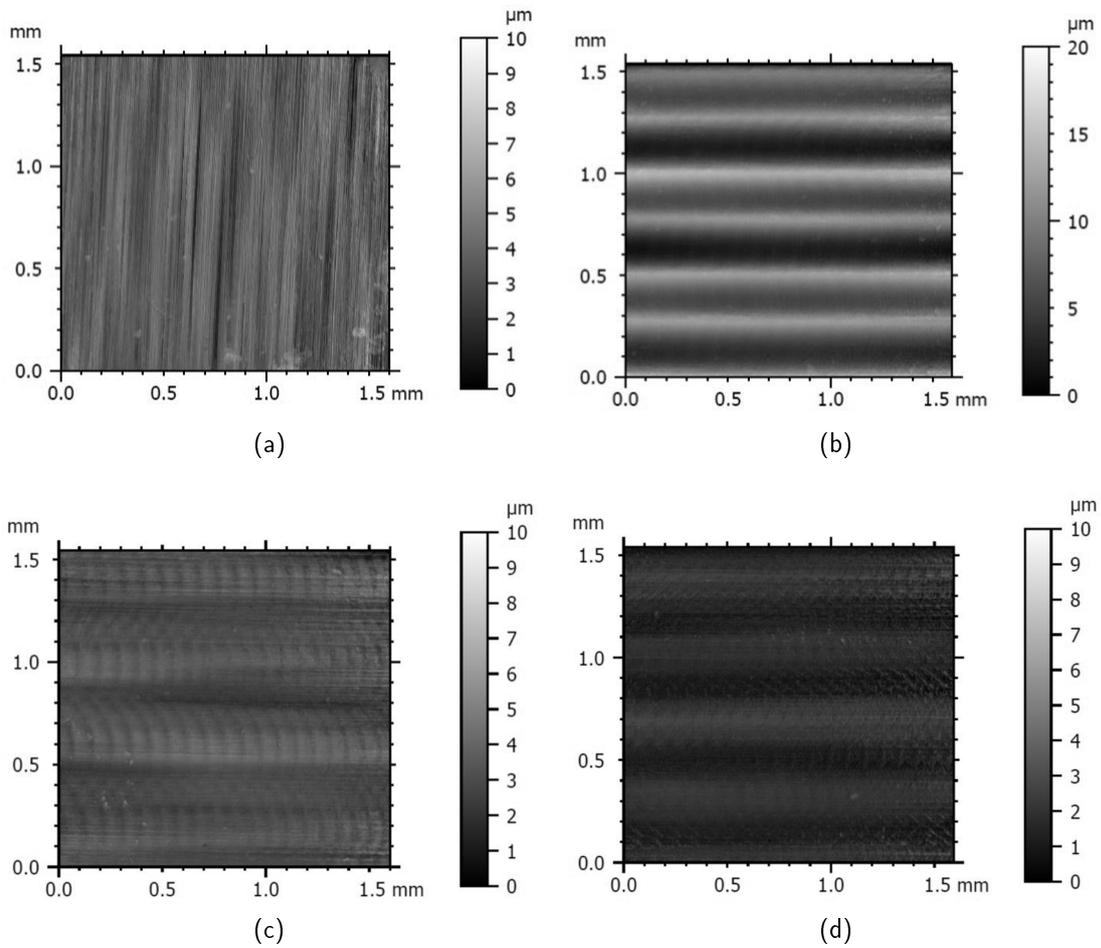


Abbildung 5.12: Übersicht der Oberflächenaufnahmen nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Hammerkopfdurchmessers: a) Ausgangszustand; b) Hammerkopfdurchmesser 2,5 mm; c) Hammerkopfdurchmesser 5 mm (Referenzzustand); d) Hammerkopfdurchmesser 10 mm.

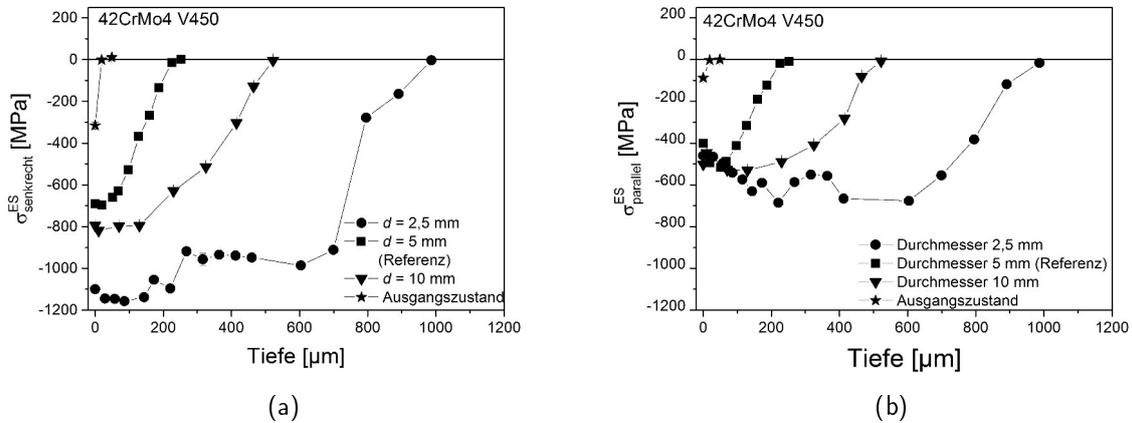


Abbildung 5.13: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Hammerkopfdurchmessers a) senkrecht zur Vorschubrichtung; b) parallel zur Vorschubrichtung [122].

Oberfläche. Allerdings weist der Tiefenverlauf der mit 10 mm Durchmesser bearbeiteten Probe höhere Eigenspannungen und eine höhere Eindringtiefe als die mit dem 5 mm Durchmesser bearbeitete Probe auf. In paralleler Richtung unterscheiden sich die Oberflächeneigenspannungen weniger. Auch hier wurden die niedrigsten Druckspannungen $\sigma_{OF,p}^{\text{ES}} = -400$ MPa durch den 5 mm-Hammerkopf induziert, der Wert für den 10 mm-Durchmesser ist mit $\sigma_{OF,p}^{\text{ES}} = -500$ MPa der größte und der für den 2,5 mm-Durchmesser liegt dazwischen. Das Maximum der Druckeigenspannungen ist für die großen Durchmesser bei ca. $\sigma_{max,p}^{\text{ES}} = -550$ MPa und liegt für den 5 mm-Hammerkopf etwa in einer Tiefe von $x_{max} = 50 \mu\text{m}$, für den 10 mm-Hammerkopf bei etwa $x_{max} = 100 \mu\text{m}$. Das Druckspannungmaximum von $\sigma_{max,p}^{\text{ES}} = -700$ MPa für den 2,5 mm Hammerkopf liegt zwischen $200 \mu\text{m}$ und $600 \mu\text{m}$. Es lässt sich demzufolge zunächst kein eindeutiger Einfluss des Hammerkopfdurchmessers auf den Eigenspannungszustand feststellen. Ausschlaggebend hierfür sind die verwendeten Prozessparameter, was im folgenden Abschnitt 5.6 noch diskutiert wird.

5.4.3 Verfestigungszustand

Die Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening mit verschiedenen Hammerkopfdurchmessern sind in Abbildung 5.14 aufgetragen. Die Halbwertsbreitenverläufe der unterschiedlichen Hammerkopfdurchmesser unterscheiden sich deutlich. Für $d = 2,5$ mm wird ein Oberflächenwert von $3,6^\circ$ erreicht und liegt somit $0,3^\circ$ über dem Ausgangswert. Im weiteren Verlauf nimmt die Halbwertsbreite ab und pendelt sich

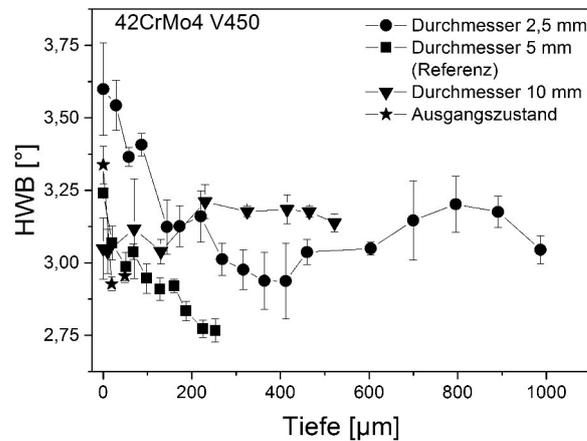


Abbildung 5.14: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Hammerkopfdurchmessers [122].

dann auf etwa $3,2^\circ$ ein. Der Verlauf für $d = 10$ mm Durchmesser beginnt bei $3,1^\circ$ an der Oberfläche und steigt anschließend leicht an. Der Tiefenverlauf für $d = 5$ mm liegt an der Oberflächen zwischen den anderen Verläufen, leicht unterhalb des Ausgangswertes und sinkt im folgenden Verlauf kontinuierlich.

5.5 Einfluss der Hammerkopfhärte auf den Randschichtzustand

Um den Einfluss der Härte des Hammerkopfs auf den Randschichtzustand zu untersuchen wurden drei verschiedene Hammerkopfhärten verwendet. Es wurde eine Kugel aus 100Cr6 (765 HV), eine Kugel aus 100Cr6, die für zwei Stunden bei 450°C angelassen wurde (555 HV) und eine Kugel aus Hartmetall (WC; 1500 HV) verwendet. Es wurde zunächst für jeden Hammerkopf die resultierende Bahnbreite bestimmt und der Bahnabstand so gewählt, dass er etwa die Hälfte der Bahnbreite beträgt. Die anderen Parameter wurden konstant gehalten und können Tabelle 5.10 entnommen werden.

5.5.1 Rauheit

Die Oberflächen nach der Bearbeitung sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Der Hammerkopf aus angelassenem 100Cr6 hinterlässt keine sichtbaren Eindrücke auf der Oberfläche, die Schleifriefen sind noch zu erkennen, sie werden jedoch eingeebnet.

Tabelle 5.10: Piezopeening-Parameter zur Bestimmung des Einfluss der Hammerkopfhärte auf den Randschichtzustand.

	Referenz		
Amplitude in μm	18		
Hammerkopfdurchmesser in mm	5		
Hammerkopfmaterial (Härte in HV)	100Cr6 ang. (555)	100 Cr6 (765)	Hartmetall (1500)
Vorschub in mm/s	50		
Frequenz in Hz	500		
Bahnabstand in μm	200	400	250
Tastverhältnis	0,5		

Der Hartmetall-Hammerkopf führt im Gegensatz dazu zu deutlichen Riefen. Die ursprünglichen Schleifriefen sind nicht mehr zu erkennen und es sind keine eindeutigen Hammerkopfeindrücke wie im Referenzzustand identifizierbar. Die resultierenden Rauheiten nach dem Piezopeening sind in Tabelle 5.11 dargestellt. Die Rauheitswerte zeigen, dass alle unterschiedlich harten Hammerköpfe zu einer Reduzierung der Rauheit führen. Der Hammerkopf mit der geringsten Härte führt auch zu der geringsten Rauheit, die anderen beiden Proben unterscheiden sich jedoch kaum voneinander.

Tabelle 5.11: Rauheiten Rz in Abhängigkeit der Hammerkopfhärte [122].

Hammerkopfhärte	Ausgangszustand	555 HV	765 HV	1500 HV
Rauheit Rz in μm	$2,7 \pm 0,231$	$1,47 \pm 0,526$	$2,18 \pm 0,268$	$2,16 \pm 0,236$

5.5.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Vorschubrichtung sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Die Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,s}^{ES}$ senkrecht zur Vorschubrichtung steigen mit der Härte des Hammerkopfes. Der Hammerkopf aus angelassenem 100Cr6 führt zu $\sigma_{OF,s}^{ES} = -300 \text{ MPa}$, mit WC lassen sich fast viermal so hohe Druckeigenspannungen an der Oberfläche einbringen. Des Weiteren führt der angelassene 100Cr6 Hammerkopf zu einem Druckspannungsmaximum $\sigma_{max,s}^{ES} = -450 \text{ MPa}$ unterhalb der Oberflächen bei $x_{max} = 50 \mu\text{m}$, bei den beiden härteren Hammerköpfen liegt das Maximum direkt an der Oberfläche. Der Nulldurchgang der Eigenspannungen liegt bei den beiden Hammerköpfen aus 100Cr6 bei etwa $x_0 = 200 \mu\text{m}$, bei dem Hammerkopf aus WC bei ca. $x_0 = 550 \mu\text{m}$. In paralleler Richtung sind die Unterschiede geringer, obwohl auch hier eine Zunahme der Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,p}^{ES}$ mit der Hammerkopfhärte zu beobachten ist. Hier weisen alle drei Tiefenverläufe ein

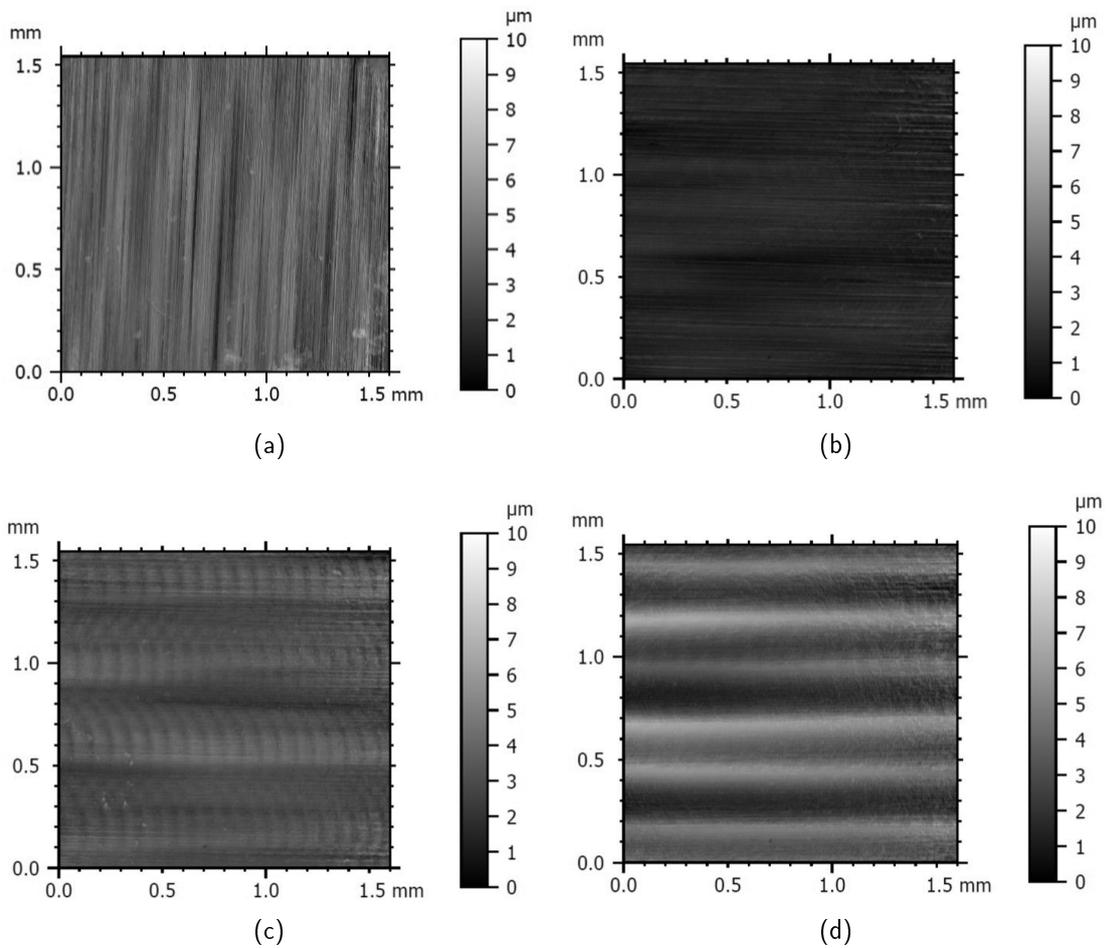


Abbildung 5.15: Übersicht der Oberflächenaufnahmen nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Hammerkopfhärte: a) Ausgangszustand; b) Hammerkopfhärte 555 HV; c) Hammerkopfhärte 765 HV (Referenzzustand); d) Hammerkopfhärte 1500 HV.

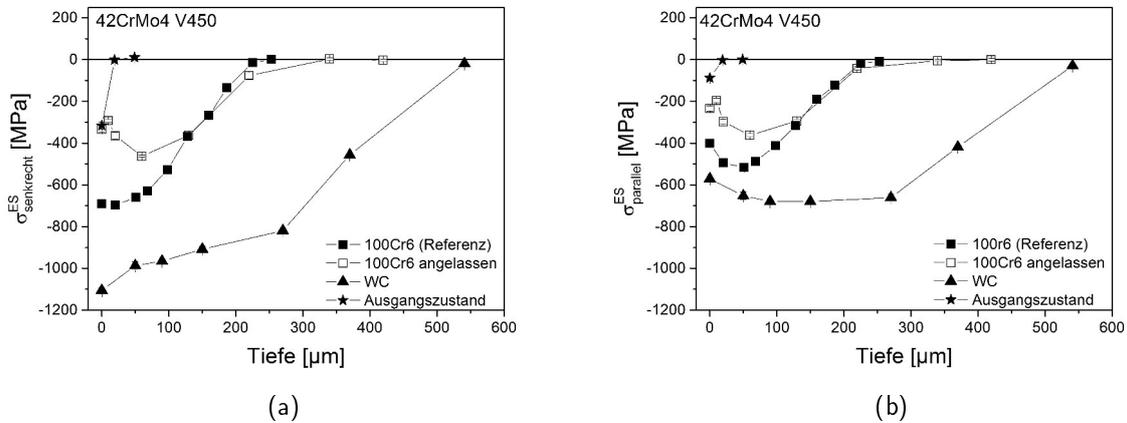


Abbildung 5.16: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Hammerkopfhärte a) senkrecht zur Vorschubrichtung; b) parallel zur Vorschubrichtung [122].

Druckspannungmaximum $\sigma_{max,p}^{ES}$ unterhalb der Oberfläche auf. Für die Hammerköpfe aus 100Cr6 liegt das jeweils bei etwa $x_{max}=50 \mu\text{m}$ mit $\sigma_{OF,p}^{ES}=-400 \text{ MPa}$ für den angelassenen Hammerkopf und $\sigma_{OF,p}^{ES}=-500 \text{ MPa}$ für den Referenzzustand, bei WC etwa bei $x_{max}=200 \mu\text{m}$ mit $\sigma_{OF,p}^{ES}=-700 \text{ MPa}$.

5.5.3 Verfestigungszustand

Die Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening mit verschiedenen Hammerkopfhärten sind in Abbildung 5.17 aufgetragen. Die Halbwertsbreiten unterscheiden sich an der Oberfläche nur geringfügig und sind etwa auf dem Niveau des Ausgangswerts. Mit zunehmender Tiefe oszillieren die Werte für WC und angelassenen 100Cr6 um $3,1^\circ$, der Wert für 100Cr6 sinkt stetig bis auf etwa $2,8^\circ$.

5.6 Diskussion des Einflusses verschiedener Prozessparameter

5.6.1 Amplitude

Die gewählte Amplitude beeinflusst in erster Linie die Geschwindigkeit $v_{\text{Aufschlag}}$ mit der der Hammerkopf auf die Werkstückoberfläche trifft. Sie lässt sich unter der Annahme,

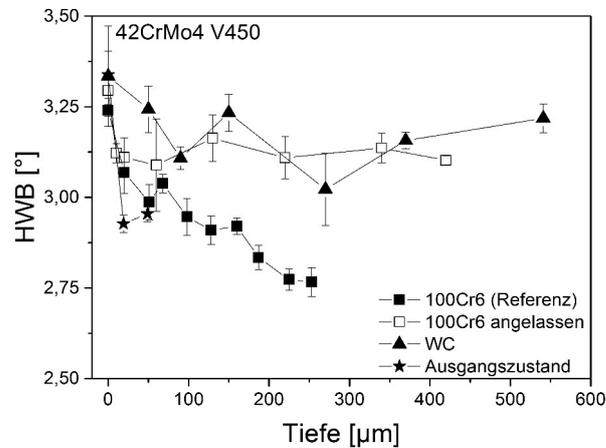


Abbildung 5.17: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Hammerkopfhärte [122].

dass das Tastverhältnis $T=0,5$ gilt und der Aufschlag mit der maximalen Geschwindigkeit geschieht, nach

$$v_{max} = a \cdot 2 \cdot \pi f \quad (5.1)$$

berechnen. Die hier maximal erreichbaren Auftreffgeschwindigkeiten für die verwendeten Amplituden können Tabelle 5.12 entnommen werden. Des Weiteren beeinflusst die

Tabelle 5.12: Maximale axiale Hammerkopfgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Amplitude.

Amplitude in μm	max. Geschwindigkeit in m/s
15	0,047
18	0,057
24	0,075

Amplitude auch die aufgebrachte Kraft und die Eindringtiefe des Hammerkopfes in das Werkstück. Dies resultiert aus dem linearen Zusammenhang zwischen Stellweg und Kraft bei der Piezokeramik.

5.6.1.1 Rauheit

Die höhere Eindringtiefe bei höherer Amplitude des Hammerkopfes führt zu einer größeren plastischen Verformung der Randschicht, auch die Eindruckdurchmesser und -tiefe steigen mit zunehmender Amplitude. Tiefere Eindrücke bei gleichbleibendem

Bahnabstand führen zu einer höheren Rauheit. Dies wird auch in der Literatur, vgl. [64], für das elektromagnetische MHP bestätigt. Im Gegensatz dazu konnte beim UIT die Rauheit mit höherer Amplitude geringfügig verbessert werden. Daraus und aus der Tatsache, dass kaum ein Unterschied zwischen den Rauheiten der Amplituden $15\ \mu\text{m}$ und $18\ \mu\text{m}$ beobachtet wird, kann abgeleitet werden, dass vergleichbar mit dem Einfluss der Festwalzkraft (siehe Abbildung 2.8), eine optimale Amplitude für eine minimale Rauheit existiert. Bei kleineren Amplituden findet nur eine geringe Einebnung der Oberfläche statt, bei höheren Amplituden hinterlässt die Bearbeitung zu starke Eindrücke, so dass die Rauheit wieder ansteigt.

5.6.1.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungen senkrecht zur Vorschubrichtung sind aufgrund des gerichteten Materialflusses höher als in paralleler Richtung. $\sigma_{OF,s}^{ES}$ zeigt an der Oberfläche nur geringe Unterschiede mit leicht ansteigender Tendenz für größere Amplituden. x_0 und x_{WP} sind für $a=15\ \mu\text{m}$ und $a=18\ \mu\text{m}$ ebenfalls ähnlich, bei $a=24\ \mu\text{m}$ sind beide tiefer unter der Oberfläche zu beobachten. Dies kann mit Hilfe der Hertz'schen Pressung erklärt werden. Unter der Annahme, dass das Eigenspannungstiefenprofil sich aus der Überlagerung von Hertz'scher Pressung und plastischer Streckung zusammensetzt, kommt es durch die plastische Streckung zu den hohen Eigenspannungen an der Oberfläche. Mit zunehmender Kraft, welche aus den größeren Amplituden resultiert, führt nach Gleichung 2.3 zu einem größeren Eindruck und damit auch zur Verschiebung der maximalen Hertz'schen Pressung in größere Tiefen. Dadurch kann ein Wendepunkt im Eigenspannungstiefenverlauf erzeugt werden. Die größere Eindringtiefe durch größere Amplituden stimmt mit den Ergebnissen von [27] zu UIT und [23] zum Einfluss der Festwalzkraft überein.

5.6.1.3 Verfestigungszustand

Die Änderungen der Halbwertsbreiten sind im Allgemeinen sehr gering, was für diesen Wärmebehandlungszustand auch beim Kugelstrahlen beobachtet wurde [16]. Des Weiteren scheinen sich die Halbwertsbreiten im Grundzustand je nach Wärmebehandlungscharge zu unterscheiden. Aus diesem Grund werden die Werte in Abbildung 5.18 auf die in größeren Tiefen gemittelten Halbwertsbreiten bezogen. Der Verlauf der HWB für $15\ \mu\text{m}$ und $18\ \mu\text{m}$ sind nun sehr ähnlich: An der Oberfläche ist die Halbwertsbreite leicht erhöht, es folgt eine Abnahme der Halbwertsbreite bis sich die Werte, etwa bei $200\ \mu\text{m}$, wieder beim Ausgangszustand einpendeln. Im Gegensatz dazu treten bei der

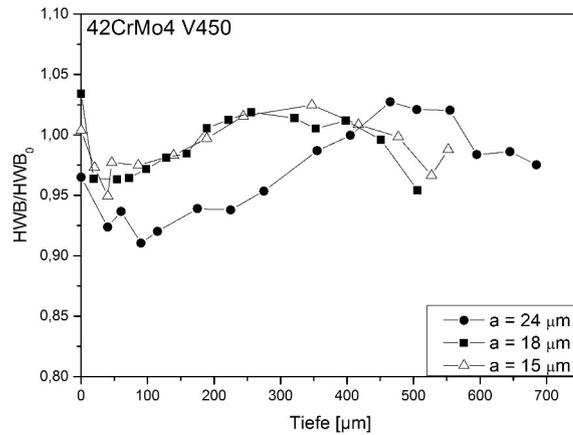


Abbildung 5.18: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Amplitude normiert auf die Halbwertsbreite in höheren Tiefen.

24 μm Amplitude bis 400 μm verringerte Halbwertsbreiten auf. Die größere plastische Verformung führt möglicherweise zu einer Entfestigung an der Oberfläche.

5.6.2 Bahnabstand

Eine Änderung des Bahnabstandes führt zu einer Änderung der Überdeckung senkrecht zur Vorschubrichtung. Eine Verringerung des Bahnabstandes bewirkt eine höhere Überdeckung. Dies bedeutet, dass bei einer Bahnbreite von 800 μm und einem Bahnabstand von 100 μm jeder Punkt senkrecht zur Vorschubrichtung Acht mal getroffen wird, bei einem Bahnabstand von 800 μm findet keine mehrfache Bearbeitung in dieser Richtung statt. Die Bahnbreite ist etwas geringer als 800 μm, somit wird nicht jeder Punkt acht Mal getroffen sondern einige nur sieben Mal. Da der Rest der Parameter nicht geändert wurde ist in allen Fällen die Überdeckung in Vorschubrichtung die selbe.

5.6.2.1 Rauheit

Tendenziell kommt es zu einer Abnahme der Rauheit mit sinkendem Bahnabstand, was mit den aus der Literatur bekannten Ergebnissen übereinstimmt, siehe Abschnitt 2.1.5. Die Unterschiede der Rauheit für die drei geringsten Bahnabstände liegen im Streubereich der Messwerte. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass hier für alle Fälle eine ähnlich gut Einglättung der Oberfläche möglich ist. Die Oberfläche ist hierbei

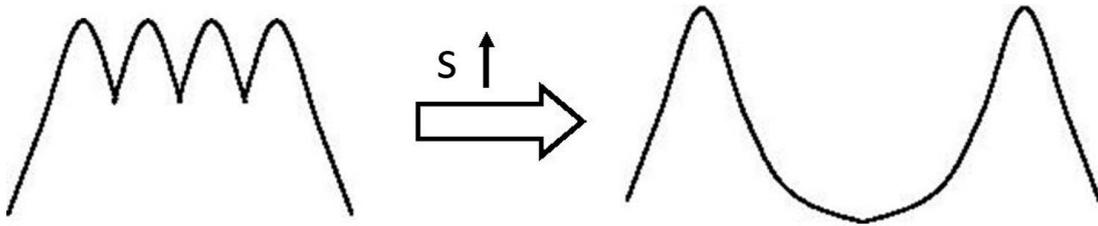


Abbildung 5.19: Schematische Darstellung des Einflusses des Bahnabstands auf die Oberflächentopographie.

hauptsächlich durch die Bearbeitungsriefen geprägt. Wie die Rauheit durch die Riefen zustande kommt ist in Abbildung 5.19 schematisch dargestellt. Bei kleinem Bahnabstand werden die Riefen aufeinander geschoben und es ist nur der obere Teil wirksam. Bei einem Bahnabstand in der Größenordnung der Bahnbreite geht die volle Höhe der Riefen in die Rauheit mit ein und sorgt somit für eine höhere Rauheit. Zusätzlich ist jedoch denkbar, dass die vorherige Riefe noch durch die Bearbeitung der nächsten Bahn beeinflusst und verformt werden kann. Dies könnte eine mögliche Begründung dafür sein, dass die Rauheit ein Minimum erreicht und bei ansonsten gleichbleibenden Parametern nicht weiter durch Verringerung des Bahnabstandes reduziert werden kann. Der Bahnabstand $800\ \mu\text{m}$ ist bei der Auswertung ein Sonderfall. Aufgrund der Grenzwellenlänge von $800\ \mu\text{m}$ wird ein Großteil der eingebrachten Oberflächentopographie als Welligkeit herausgerechnet, weshalb der Wert niedriger als die Rauheit für $600\ \mu\text{m}$ ist. Ein Vergleich der ungefilterten Daten Pz zeigt jedoch, dass der Wert von $s = 600\ \mu\text{m}$ bei $Pz = 5,44 \pm 1,22\ \mu\text{m}$ geringer ist als der Wert von $s = 800\ \mu\text{m}$, welcher bei $Pz = 8,03 \pm 0,613\ \mu\text{m}$ liegt. Bei noch größeren Bahnabständen ist kein weiterer Anstieg der Rauheit zu erwarten, die Rauheit wird sich dann eher dem Ausgangswert wieder annähern.

5.6.2.2 Eigenspannungszustand

Die Eigenspannungsmessungen senkrecht zur Vorschubrichtung zeigen die eindeutige Tendenz, dass mit geringer werdendem Bahnabstand, also zunehmender Überdeckung, die Oberflächeneigenspannungen $\sigma_{OF,s}^{ES}$ und die Eindringtiefe x_0 zunehmen. Im Bereich des MHP wurden bisher nur wenige Eigenspannungstiefenverläufe bestimmt, nur [84] erhielt bei der Kombination von höherem Bahnabstand und höherer Vorschubgeschwindigkeit geringere maximale Druckeigenspannungen. Beim Festwalzen führt eine Verringerung des Bahnabstandes (Erhöhung der Überrollzahl) zunächst auch zu einer Erhöhung der Oberflächeneigenspannungen und der Eindringtiefe [123]. Ab einem bestimmten Punkt wird eine Sättigung erreicht. Dies wird darauf zurückge-

führt, dass erst ab einer gewissen Überrollzahl die plastischen Fließvorgänge einen Sättigungszustand erreichen. Demnach kann daraus geschlussfolgert werden, dass die hier untersuchten Bahnabstände noch nicht den Sättigungsbereich der Überdeckung erreichen. Im Vergleich dazu ist beim Kugelstrahlen nur ein geringer Einfluss der Strahldauer zu beobachten, wenn der Überdeckungsgrad mehr als 100 % beträgt. Allerdings folgt aufgrund der Definition von 100 % Überdeckung (siehe ASTM B851 [15]), dass die meisten Punkte der Oberfläche dabei schon mehrfach getroffen wurden und somit makroskopisch der Sättigungsbereich bereits erreicht ist. In Vorschubrichtung kommt es mit zunehmender Überdeckung zu einer Verschiebung des Druckeigenstressmaximums in größere Tiefen.

5.6.2.3 Verfestigungszustand

Die normierten Halbwertsbreiten, siehe Abbildung 5.20, zeigen mit geringer werdendem Bahnabstand eine abnehmende Tendenz. Dies deutet abermals auf eine Entfestigung mit zunehmender Überdeckung oder Umordnung der Versetzungsstrukturen hin. Die Dehnraten beim Piezopeening liegen deutlich unter den Dehnraten beim Kugelstrahlen, so dass möglicherweise ähnlich wie beim Festwalzen die Behinderung des Quergleitens von Schraubenversetzungen nur gering ist und sich Versetzungsstrukturen bilden können [14]. Allerdings ist zu beachten, dass eine geringere Halbwertsbreite nicht zwangsläufig eine geringere Versetzungsdichte bedeuten muss. [19] beobachtet eine leichte Abnahme der Halbwertsbreite von 42CrMo4 V450 nach dem Kugelstrahlen. Eine genaue Analyse der mittleren Verzerrungen und Domänengrößen zeigte dabei jedoch, dass die totale Versetzungsdichte dennoch angestiegen ist.

5.6.3 Vorschub

Genau wie der Bahnabstand beeinflusst auch der Vorschub die Überdeckung. Je höher der Vorschub, desto größer ist der Abstand der einzelnen Einschläge in Vorschubrichtung und desto geringer die Überdeckung.

5.6.3.1 Rauheit

Der Vergleich der Rz-Werte für die Vorschubgeschwindigkeiten 1 mm/s und 50 mm/s zeigen die Tendenz, dass mit zunehmendem Vorschub die Rauheit abnimmt. Auch [54] stellte fest, dass zunächst mit zunehmendem Vorschub eine Verringerung der Rauheit

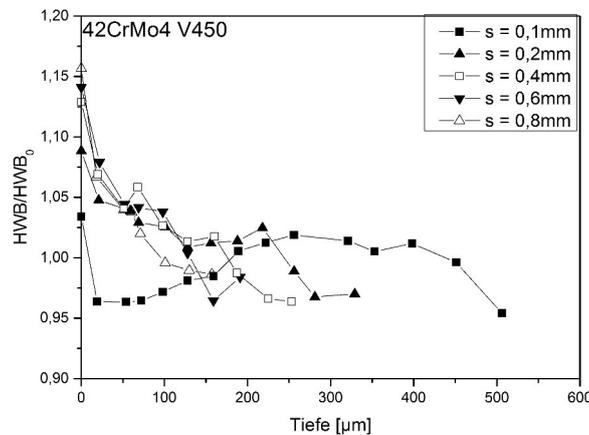


Abbildung 5.20: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Bahnabstands normiert auf die Halbwertsbreite in höheren Tiefen.

senkrecht zu den Bearbeitungsbahnen erreicht werden kann, bis schließlich eine Sättigung erreicht wird. Dies kann mit der geringeren Überdeckung erklärt werden. Aufgrund der geringeren Anzahl an Einschlägen kommt es zu weniger stark akkumulierten Materialaufwürfen, so dass die Bearbeitungsriefen schwächer ausgeprägt sind als bei einer hohen Überdeckung. Die gegenteiligen Ergebnisse von [63] sind nicht direkt vergleichbar, da beim USRP ein spiralförmiges Muster auf die Probe aufgebracht wird und dadurch eine andere Oberflächentopographie vorliegt.

5.6.3.2 Eigenspannungszustand

Die Oberflächeneigenspannungen σ_{max}^{ES} und auch die Eindringtiefe x_0 nehmen mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit sowohl senkrecht als auch parallel zur Vorschubrichtung zu. Diese Beobachtung stimmt mit den im Stand der Technik beschriebenen Effekten weitestgehend überein. Generell führen höhere Überdeckungen durch geringere Vorschubgeschwindigkeit, erhöhte Bearbeitungsdauer oder mehrfache Überdeckung zu höheren Druckeigenspannungen und Eindringtiefen, siehe 2.1.5. Eine Ausnahme ist [54], der keine Änderung bei zweifacher Bearbeitung feststellen konnte. Dies könnte einerseits bestätigen, dass es mit zunehmender Überdeckung zu weiteren Fließvorgängen im Material kommt, die sich einem Sättigungsbereich annähern. Andererseits ist jedoch zu beachten, dass es einen Unterschied gibt zwischen einer höheren Überdeckung durch verringerte Vorschubgeschwindigkeit und einer doppelten Bearbeitung der gesamten Probe. Bei der zweiten Bearbeitung wird ein bereits

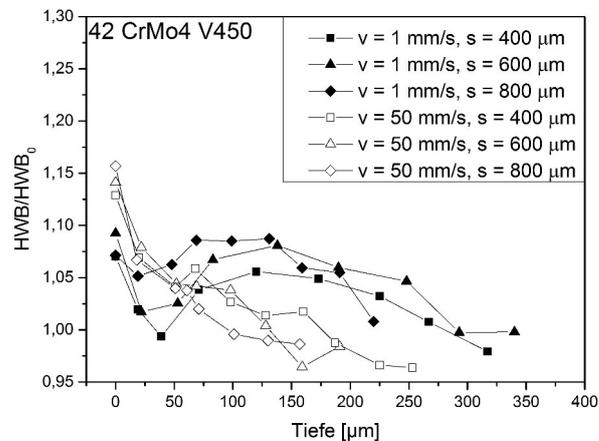


Abbildung 5.21: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Vorschubs normiert auf die Halbwertsbreite in höheren Tiefen.

einmal verfestigtes Material erneut verfestigt, bei einer höheren Überdeckung durch geringeren Vorschub trifft der Hammerkopf bei jedem Einschlag auf teilweise unverfestigtes Material. Der dadurch hervorgerufene Spannungszustand ist für beide Fälle unterschiedlich, da sich die Streckgrenze durch die Bearbeitung verändert.

5.6.3.3 Verfestigungszustand

Die normierten Tiefenverläufe der Halbwertsbreiten, siehe Abbildung 5.21, zeigen dass bei geringerer Vorschubgeschwindigkeit die oberflächennahen Werte unterhalb der mit 50 mm/s bearbeiteten Proben liegen. Auch hier deuten die Ergebnisse darauf hin, dass mit zunehmender Überdeckung eine Entfestigung bzw. eine Umordnung der Versetzungsstrukturen stattfindet. In der Literatur [95, 96] wird bei UNSM mit zunehmender Überdeckung eine ansteigende Härte von AISI 1045 beobachtet. Jedoch ist dieser Effekt materialabhängig und kann nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, so dass die auf Basis der für UNSM gefundenen Effekte nicht im Widerspruch zu den hier erhaltenen Ergebnissen steht. Bei Stählen spielt hier die vorangegangene Wärmebehandlung und die damit in das Material eingebrachte Versetzungsdichte eine große Rolle. Sind erst wenige Versetzungen vorhanden, können neue gebildet werden, ist die Versetzungsdichte bereits hoch, besteht die Möglichkeit der Versetzungsumordnung und -anihilation. Des Weiteren spielt auch das zyklische Materialverhalten eine Rolle, bei 42CrMo4 V450 ist bekannt, dass es zyklisch entfestigt [111].

5.6.4 Hammerkopfdurchmesser

Generell gibt es eine Reihe von Einflussgrößen, welche sich auf die Eindruckgröße auswirken: Ein wichtiger Faktor ist der Kugeldurchmesser. Da die Masse der Kugeln im Vergleich zur Masse des Aktors gering ist, kann der Einfluss des Durchmessers auf die kinetische Energie vernachlässigt werden. Es kann zudem aufgrund der Kinematik des Prozesses nicht, wie bei anderen MHP-Prozessen, die Umformarbeit mittels der kinetischen Energie beschrieben werden, vgl. [42]. Durch die vorgegebene Bewegung des Aktors kommt es zu einer Verformung der Oberfläche mit kontinuierlich geringer werdender, vorgegebener Geschwindigkeit. Dies führt demzufolge auch zu einer Verringerung der Dehnrate, welche im Gegensatz zu anderen MHP-Verfahren nicht aufgrund des Stoßimpulses zwischen Hammerkopf und Probe geschieht. Weiterhin gilt für den Piezoaktor, dass Stellweg und Kraft proportional zueinander sind. Bei jedem Einschlag wird sich deshalb ein Gleichgewicht zwischen Eindringtiefe und Kraft einstellen. Dazu kommt noch die Vorschubbewegung während des Einschlags, die bewirkt, dass wie beim Festwalzen Material von der Kugel nach vorne und zu den Seiten geschoben wird.

Rein mathematisch betrachtet, kann der Kontaktradius einer 5 mm Kugel mit der Eindringtiefe t nach der Formel

$$a = \sqrt{t(2r - t)} \quad (5.2)$$

berechnet werden. Für eine Eindringtiefe von $18 \mu\text{m}$ ergibt das einen Kontaktradius von $299 \mu\text{m}$. Dies ist geringer als der gemessene Wert. Hierbei wird jedoch von einer starren Kugel ausgegangen und piling-up/sinking-in Effekte im Material vernachlässigt. Für die hier verwendeten Kugeln aus 100Cr6 ist der E-Modul derselbe wie für die Proben aus 42CrMo4. Beim Kontakt der Materialien verformen sich beide elastisch und somit wird der effektive Durchmesser der Kugel vergrößert. Des Weiteren neigen Stähle im Allgemeinen zu piling-up [11], so dass dies dazu führt, dass der Eindruck größer erscheint. Entscheidend für die Eindruckgröße ist auch, ob das umliegende Material vollständig oder nur teilweise plastifiziert, wofür wie in Abschnitt 2.1.1 erwähnt $\bar{p} \approx 2,8R_{es}$ gelten muss. Die maximalen gemessenen Kräfte liegen bei etwa 800 N. Für diese Kraft ergibt sich für $d = 5 \text{ mm}$ ein $\bar{p}/R_{es} = 2,08$ und für $d = 10 \text{ mm}$ ein $\bar{p}/R_{es} = 1,31$, es ist demnach keine vollständige Plastifizierung zu erwarten. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 5.22a die Tiefenverläufe der Vergleichsspannung nach von Mises im Zentrum des Eindrucks für die verwendeten Durchmesser bei einer wirkenden Kraft von 600 N einander gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass im Falle des 10 mm-Durchmessers die Streckgrenze nur geringfügig in einem Bereich unterhalb der Oberfläche überschritten wird und deshalb keine vollständige Plastifizierung des gesamten oberflächennahen Bereich zu erwarten ist. Erst wenn die Vergleichsspannung

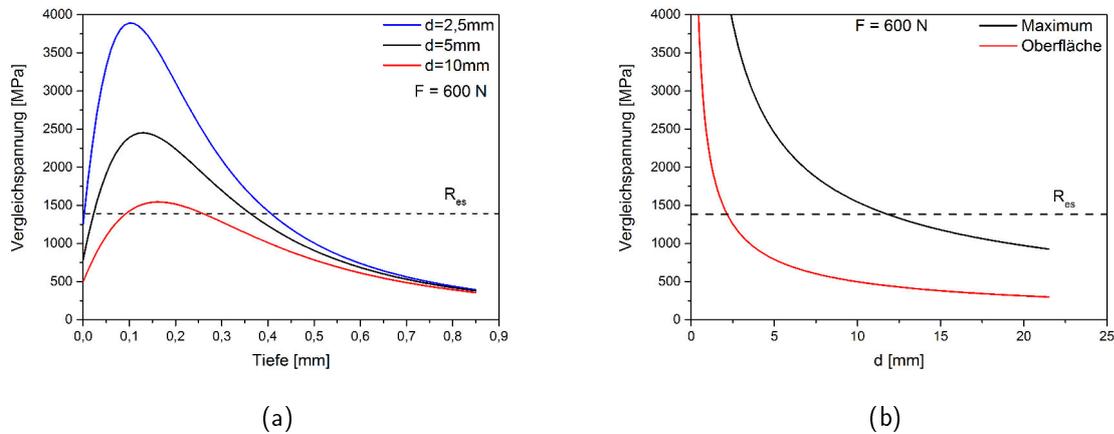


Abbildung 5.22: a) Verlauf der Vergleichsspannung nach von Mises für die Hammerkopfdurchmesser 2,5 mm, 5 mm und 10 mm bei einer Kraft von $F=600\text{ N}$. b) Abhängigkeit der Vergleichsspannung nach von Mises an der Oberfläche sowie der maximalen Vergleichsspannung vom Hammerkopfdurchmesser.

auch an der Oberfläche die Streckgrenze überschreitet, ist der gesamte Bereich bis an die Oberfläche plastisch verformt und ein größerer Hammerkopfdurchmesser würde zu einem größeren Eindruckdurchmesser führen. Im Bereich von $\bar{p} \approx 1,1R_{es}$ bis $\bar{p} \approx 2,8R_{es}$ ist laut [7] der Eindruckradius a proportional zu \bar{p}/R_{es} . Der bleibende Eindruck des Hammerkopfes kann aus diesem Grund geringer als der eines kleineren Hammerkopfes ausfallen.

5.6.4.1 Rauheit

Bei der 2,5 mm Kugel wirkt die aufgebrachte Kraft auf die kleinste Fläche, so dass es zu einem tiefen Eindruck sowie hohen Materialaufwürfen kommt. Die Oberfläche wird dadurch sehr stark plastisch verformt und die Rauheit im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich erhöht. Dies wurde auch von [38, 42] bestätigt. Je größer der Durchmesser der Kugel wird, desto flacher wird der hinterlassene Eindruck und desto geringer die Materialaufwürfe am Eindruckrand. Das führt dazu, dass mit größer werdendem Durchmesser die Rauheit geringer wird. Wenn der Kugeldurchmesser zu groß oder die Kraft zu gering ist, kommt es zu keiner plastischen Verformung im Material unterhalb der Oberfläche und die Probe verformt sich nur elastisch. Da die Oberfläche nach der Probenherstellung eine gewisse Rauheit aufweist, kann es dennoch direkt an der Oberfläche zum Einglätten der Rauheitsspitzen kommen, so dass die Rauheit reduziert wird. Diese Beobachtungen stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen, wel-

che beim Kugelstrahlen erhalten wurden. Im Fall des Druckluftkugelstrahlens steigt die Rauheit mit zunehmender Strahlmittelgröße an. Bei diesem Verfahren ist allerdings zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Größe die Masse der Strahlmittelpartikel und dadurch auch die kinetische Energie proportional zu r^3 ansteigt. Das resultiert darin, dass größere Partikel größere Abdrücke hinterlassen. Bei vergleichbarer kinetischer Energie hinterlässt eine größere Kugel flachere Eindrücke, weshalb die Rauheit geringer ist, siehe [124]. Bei sehr kleinen Kugeln ist der Abdruck so klein, dass er die Oberflächentopographie nicht entscheidend verändert und die Rauheit konstant bleibt oder sogar verringert wird (vgl. [125]). Bei größeren Kugeln kommt es anschließend zur Ausbildung einer sogenannten Kraterlandschaft aus regellos verteilten Eindrücken, welche die Rauheit der ursprünglichen Oberfläche im Allgemeinen deutlich erhöht.

5.6.4.2 Eigenspannungszustand

Die Ergebnisse zeigen keine eindeutige Tendenz der Abhängigkeit der Eigenspannungen von der Hammerkopfgröße. [27] beobachtet für eine kleine Kugel höhere Eigenspannungen als für eine große, allerdings wurden nur die Durchmesser 3 mm und 6 mm untersucht, was in etwa mit den hier verwendeten 2,5 mm und 5 mm vergleichbar ist. Werden nur diese beiden Ergebnisse miteinander verglichen, stimmen diese von der Tendenz her überein. Es stellt sich allerdings die Frage, wie die Ergebnisse der 10 mm-Kugel damit vereinbar sind. Eine Erhöhung des Durchmessers des Hammerkopfes bewirkt nach Gleichung 2.1 eine Verringerung der maximalen Hertzschen Pressung und nach Gleichung 2.3 eine Erhöhung der Tiefe der maximalen Hertzschen Pressung. Bei einer kleinen Kugel treten die maximalen Spannungen sehr oberflächennah auf. Allgemein sind die Spannungen jedoch sehr hoch, so dass eine große Tiefenwirkung erreicht werden kann, da selbst in höheren Tiefen noch die Streckgrenze überschritten wird, vgl. Abb. 5.22a. Der Bereich, in dem die Streckgrenze überschritten wird, ist für die 2,5 mm-Kugel am größten, was sich auch in der höchsten Eindringtiefe der Eigenspannungen widerspiegelt. Für die 5 mm- und die 10 mm-Hammerköpfe ist die Verformung vermutlich noch nicht bis an die Oberfläche plastisch, vgl. Abschnitt 5.6.4, der Bahndurchmesser des 10 mm-Hammerkopfes fällt deshalb kleiner als der des 5 mm-Hammerkopfes aus. Nach [126] sind die lateralen Ausmaße der plastischen Zone in etwa so groß wie die Kontaktfläche, was bedeutet, dass die effektive Überdeckung für die 10 mm-Kugel größer ist. Eine höhere Überdeckung führt wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben zu größeren Druckeigenspannungen und höheren Eindringtiefen. Dass keine eindeutige Tendenz zu erkennen ist liegt in diesem Fall daran, dass bei den verwendeten Kombinationen der Hammerkopfdurchmesser und Kräfte teilweise keine vollständige Plastifizierung des oberflächennahen Materials

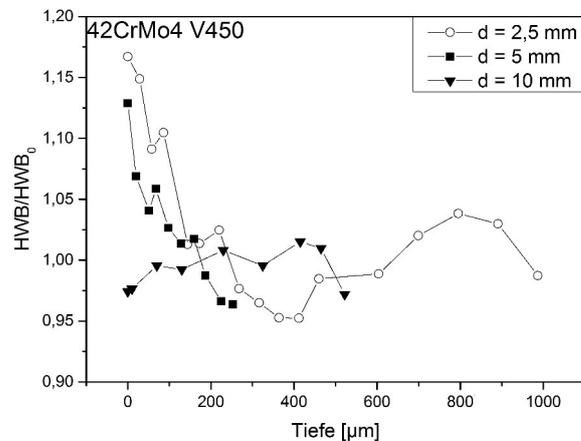


Abbildung 5.23: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation des Hammerkopfdurchmessers normiert auf die Halbwertsbreite in höheren Tiefen.

erreicht wird und deshalb zu unterschiedlichen Überdeckungen führt.

5.6.4.3 Verfestigungszustand

Der Vergleich der normierten Halbwertsbreiten, siehe Abbildung 5.23, zeigt die Tendenz, dass mit geringer werdendem Durchmesser die Halbwertsbreite an der Oberfläche ansteigt. Der Parametersatz mit dem 2,5 mm-Hammerkopf war zudem der einzige, bei dem die Halbwertsbreite im Vergleich zum Ausgangszustand erhöht werden konnte. Auch beim UIT-Verfahren wurde mit einer kleineren Kugel (3 mm) ein deutlicher Anstieg der HWB gemessen [27]. Und auch [42] und [89] messen eine höhere Härte für kleinere Hammerkopfdurchmesser. Dieser Effekt wird durch die größeren Dehnraten bei der kleineren Kugel hervorgerufen, die das Quergleiten der Schraubenversetzungen verhindern.

5.6.5 Hammerkopfhärte

Beim Einfluss der Hammerkopfhärte müssen zwei Einflussfaktoren getrennt voneinander betrachtet werden. Zum einen die Härte, welche im Allgemeinen proportional zur Streckgrenze und damit ein Maß dafür ist, ob und wie stark der Hammerkopf bei der Bearbeitung plastisch verformt wird. Zum anderen ist der Einfluss des E-Moduls

zu betrachten. Nach Gleichung 2.1 und 2.2 führt ein größerer E-Modul zu einer höheren maximalen Hertzschen Pressung. Allerdings resultiert ebenfalls eine Verringerung des Eindruckdurchmessers sowie der Tiefe der maximalen Hertzschen Pressung, siehe Gleichung 2.3. Die zwei Hammerköpfe aus 100Cr6 haben den gleichen E-Modul, aufgrund der Wärmebehandlung jedoch unterschiedliche Härten. Aus diesem Grund kommt es bei der Bearbeitung mit den selben Prozessparametern und gleichen Durchmessern zu unterschiedlichen Bahnbreiten für die verschiedenen Hammerköpfe. Der gleiche E-Modul der 100Cr6 Hammerköpfe sollte zu einem gleichen Eindruckdurchmesser führen. Jedoch kommt es bei der angelassenen Kugel durch die geringe Härte zu einer plastischen Verformung der Kugel während der Bearbeitung. Dies führt zu einer Abflachung der Kugel und damit zu einer Erhöhung des wirkenden Durchmessers. Demzufolge wird nach Gleichung 2.1 und 2.3 die Hertzsche Pressung reduziert und der Kontaktdurchmesser erhöht. Dies kann bei den wirkenden Kräften wie im vorigen Kapitel erläutert zu einem geringeren Eindruckdurchmesser führen. Der Hammerkopf aus Hartmetall führt aufgrund des höheren E-Moduls zu einem kleineren Eindruckdurchmesser als die 100Cr6 Kugel. Die Bahnbreite der WC-Kugel liegt unterhalb der berechneten, möglichen Kontaktfläche für starre Kugeln. Eine Bahnbreite von 500 μm entspricht in diesem Fall nach Gleichung 5.2 einer Eindringtiefe von 12,5 μm . Aus der Proportionalität von Stellweg und Kraft folgt bei einer maximalen Kraft von 4500 N und dem maximalen Stellweg von 60 μm für den verwendeten Piezoaktor eine Kraft von 412,4 N. Diese Kraft liegt im Bereich dessen, was gemessen wird. Die Werte für die WC-Kugel sind demzufolge durchaus plausibel. Nach diesen Überlegungen müsste der Eindruckdurchmesser der angelassenen 100Cr6 Kugel größer als der der WC-Kugel sein. Die wirkenden Spannungen führen aber gerade bei dem weichsten Hammerkopf dazu, dass es zu plastischen Verformungen kommt, die zu einem flacheren effektiven Radius des Hammerkopfes führen. Da wie in Abschnitt 5.6.4 erwähnt, mit zunehmendem Radius die Plastifizierung der Randschicht abnimmt, kann es dadurch zu einer weiteren Verringerung des Eindruckdurchmessers kommen. Zusätzlich kommt hinzu, dass die Bahnbreite aufgrund des flachen Eindrucks sehr schwer zu bestimmen ist. Es ist möglich, dass deshalb eine kleinere Bahnbreite gemessen wurde.

5.6.5.1 Rauheit

Der flache Eindruck des angelassenen 100Cr6 Hammerkopfes in Kombination mit geringen Materialaufwürfen führt dazu, dass mit dieser Kugel die Rauheit am stärksten reduziert werden kann. Bei den härteren Hammerköpfen hinterlässt die WC-Kugel kleine, tiefe Eindrücke, die 100Cr6-Kugel größere aber dafür flachere Eindrücke. Dadurch, dass der Bahnabstand für die WC-Kugel deutlich geringer gewählt wurde, was zur Ver-

ringierung der Rauheit führt, sind die resultierenden Rauheiten für beide Hammerköpfe im Endeffekt etwa gleich groß. In der Literatur sind keine Untersuchungen zum Einfluss der Hammerkopfhärte beim maschinellen Oberflächenhämmern bekannt. Beim Druckluftkugelstrahlen wird mit zunehmender Härte des Strahlmittels und dadurch geringer plastischer Verformung des Strahlmittels ein Anstieg der Härte verzeichnet [16]. Dieses Ergebnis unterstützt die beim Piezopeening gemachten Beobachtungen.

5.6.5.2 Eigenspannungszustand

Anhand der Eigenspannungstiefenverläufe sind die unterschiedlichen Effekte der Härte und des E-Moduls gut darzustellen. Die Eindringtiefe der Eigenspannungen x_0 ist für die beiden 100Cr6 Hammerköpfe in etwa gleich und deutlich geringer als für die Hartmetallkugel mit dem deutlich höheren E-Modul. Die Eindringtiefe wird demnach wesentlich vom E-Modul beeinflusst, allerdings darf nicht vernachlässigt werden, dass sich die Überdeckung der beiden 100Cr6 Hammerköpfe auch unterscheidet. In Vorschubrichtung ist die Überdeckung des Referenzhammerkopfes höher, senkrecht dazu vermutlich die des angelassenen Hammerkopfes. Die Oberflächeneigenspannungen σ_{OF}^{ES} sind für die WC-Kugel ebenfalls deutlich höher. Allerdings liegt hier senkrecht zur Bearbeitungsrichtung das Maximum der Eigenspannungen an der Oberfläche, für die anderen beiden Zustände leicht darunter. Bei geringerer Härte scheint die Hertz'sche Pressung mit Druckeigenspannungsmaximum unterhalb der Oberfläche zu dominieren. Bei höherer Härte kommt die plastische Streckung der Oberfläche stärker zum tragen und das Maximum der Druckeigenspannungen liegt an der Oberfläche. Zusätzlich kommt es durch die geringe Härte des angelassenen 100Cr6 bei der Bearbeitung zur plastischen Verformung des Hammerkopfes, was zu einer Verringerung der für die Verformung zur Verfügung stehenden Energie führt. Dies resultiert in geringeren Druckeigenspannungen für den angelassenen Hammerkopf im Vergleich zum Referenzzustand. Die Versuchsergebnisse von [16] zum Einfluss der Strahlmittelhärte auf den Eigenspannungstiefenverlauf zeigen ebenfalls mit zunehmender Härte zunehmende maximale Druckeigenspannungen und Eindringtiefen, die genaue Ausprägung hängt jedoch stark vom Wärmebehandlungszustand ab.

5.6.5.3 Verfestigungszustand

In Bezug auf die normierten Halbwertsbreiten lässt sich feststellen, dass bei der Hartmetallkugel keine Änderung der Halbwertsbreite zu beobachten ist. Die leicht erhöhte HWB an der Oberfläche wurde demnach abgebaut, was auf eine Entfestigung oder

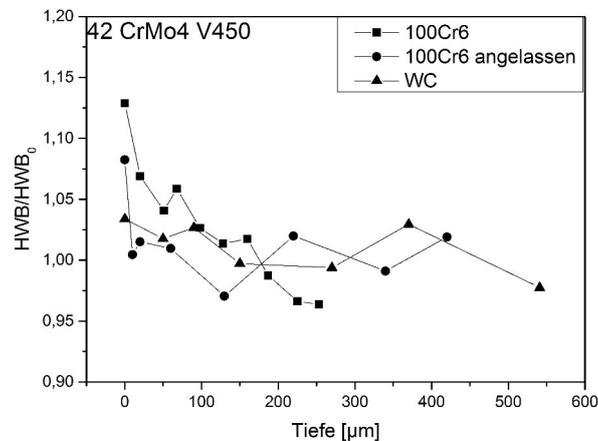


Abbildung 5.24: Halbwertsbreitentiefenverläufe nach dem Piezopeening von 42CrMo4 V450 bei Variation der Hammerkopfhärte normiert auf die Halbwertsbreite in höheren Tiefen.

Änderung der Versetzungsstruktur hindeutet. Die Verläufe der 100Cr6-Hammerköpfe weisen die leichte Erhöhung an der Oberfläche noch auf, da sie geringere plastische Verformungen in der Probe bewirken.

5.6.6 Zusammenfassung der Prozessparametereinflüsse

Generell lassen sich drei verschiedene Eigenspannungstiefenverlaufs- und Halbwertsbreitenkombinationen beobachten, sie sind in Abbildung 5.25 schematisch einander gegenübergestellt. Typ 1 (Abbildung 5.25a) ist gekennzeichnet durch geringe Eigenspannungen, das Maximum der Druckeigenspannungen liegt senkrecht wie parallel zur Bearbeitungsrichtung an der Oberfläche, $\sigma_{max}^{ES} = \sigma_{OF}^{ES}$. Der Tiefenverlauf ist monoton abnehmend und die Eindringtiefe ist vergleichsweise gering. Dazu weist der Halbwertsbreitentiefenverlauf eine leichte Erhöhung der Halbwertsbreite an der Oberfläche auf, die vergleichbar mit dem Ausgangszustand ist, jedoch etwas später wieder das Niveau des Grundmaterials erreicht. Dieser Typ tritt nur bei geringen Überdeckungen auf. Die wirkende Hertz'sche Pressung ist vergleichsweise gering und das Maximum sehr oberflächennah. Es gibt nur wenig plastische Verformung, es gibt kaum Änderungen des Halbwertsbreitentiefenverlaufs im Vergleich zum geschliffenen Zustand.

Bei Typ 2 (Abbildung 5.25b) unterscheiden sich die Eigenspannungstiefenverläufe senkrecht und parallel zur Bearbeitungsrichtung. Senkrecht zur Bearbeitungsrichtung liegt das Maximum der Eigenspannungen an der Oberfläche und der Wert bleibt

zunächst konstant bis es zu eine Abnahme der Eigenspannungen kommt. Parallel zur Bearbeitungsrichtung zeigt der Verlauf ein deutliches Eigenspannungsmaximum unterhalb der Oberfläche, das vom Betrag her geringer ist als $\sigma_{max,s}^{ES}$. Eine leichte Abwandlung dieses Typs ist, dass in beiden Richtungen ein Maximum unterhalb der Oberfläche auftritt, aber auch in diesem Fall sind die Eigenspannungen in Bearbeitungsrichtung geringer als senkrecht dazu. Die Eindringtiefe ist tendenziell größer als bei Typ 1. Die dazugehörigen Halbwertsbreitentiefenverläufe ähneln denen von Typ 1, jedoch sind die Oberflächenwerte etwas geringer und in der Tiefe zeigen sie länger höhere Werte. Typ 2 tritt bei den hier gezeigten Ergebnissen bei mittlerer Überdeckung und den weicheren Hammerköpfen auf. In diesem Fall dominiert die Hertz'sche Pressung, welche ihr Maximum unterhalb der Oberfläche hat. Die stärkere plastische Verformung an der Oberfläche und in Oberflächennähe führt zu einer Abnahme der Halbwertsbreite, tiefer im Material gibt es wie bei Typ 1 noch eine leichte Erhöhung.

Der Typ 3 (Abbildung 5.25c) ist durch hohe Oberflächeneigenspannungen ($\sigma_{max}^{ES} = \sigma_{OF}^{ES}$) in Querrichtung, sowie einem Plateau oder Wendepunkt und einer hohen Eindringtiefe gekennzeichnet. In Längsrichtung ist der Verlauf vergleichbar mit Typ 2, ein Maximum der Eigenspannungen unterhalb der Oberfläche. Die Halbwertsbreite ist an der Oberfläche deutlich niedriger als im Ausgangszustand, steigt mit zunehmender Tiefe an und pendelt sich dann auf dem Niveau des Grundmaterials ein. Dieser Verlauf ist bei großen Überdeckungen und hoher Härte des Hammerkopfes zu beobachten. Bei Typ 3 ist die Hertz'sche Pressung sehr groß und das Maximum deutlich unterhalb der Oberfläche. Durch einen zusätzlichen Anteil der plastischen Streckung kommt es in Querrichtung dennoch zum Maximum der Eigenspannungen an der Oberfläche. In Längsrichtung sind die Oberflächeneigenspannungen aufgrund von Reibungseffekten geringer, das Maximum liegt unterhalb der Oberfläche auf Höhe des Plateaus/Wendepunktes. Wegen der extremen plastischen Verformung kommt es zu einer Verringerung der Halbwertsbreiten im Vergleich zum Ausgangszustand, nur in der Tiefe kann eine leichte Erhöhung beobachtet werden. Eine Ausnahme ist der Halbwertsbreitentiefenverlauf des 2,5 mm-Hammerkopfes. Der kleine Hammerkopf führt durch höhere Dehnraten zu einem Anstieg der Halbwertsbreiten.

Die Auswirkung der untersuchten Prozessparameter auf die Rauheit sind in Abbildung 5.26 schematisch im Vergleich zu den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Zusammenhängen dargestellt. Die in dieser Arbeit abgeleiteten Zusammenhänge sind: Große Hammerkopfdurchmesser und Vorschubgeschwindigkeiten führen zu einer Verringerung der Rauheit. Große Bahnabstände, Amplituden und eine hohe Hammerkopfhärte führen zu einer Erhöhung der Rauheit. Dies gilt jedoch nur in gewissen Grenzen. Generell lässt sich jedoch sagen, dass eine höhere Überdeckung zu einer geringeren Rauheit führt. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Rauheit bestätigt die

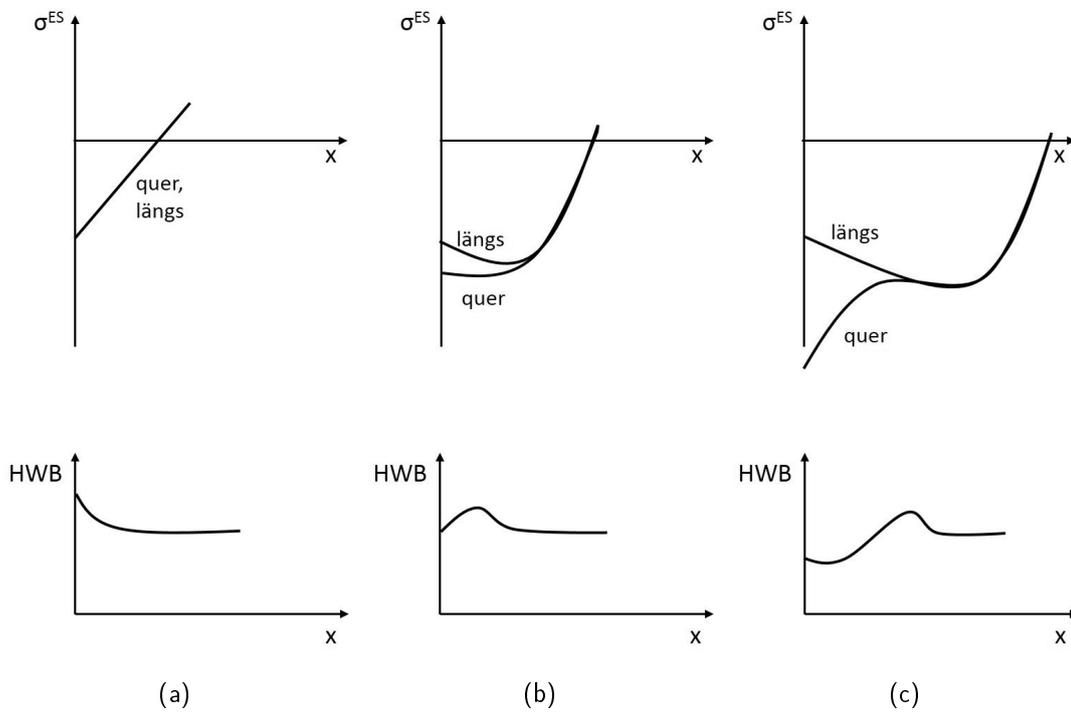


Abbildung 5.25: Schematische Darstellung der verschiedenen Typen der beobachteten Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverläufe (a) Typ 1 (b) Typ 2 (c) Typ 3.

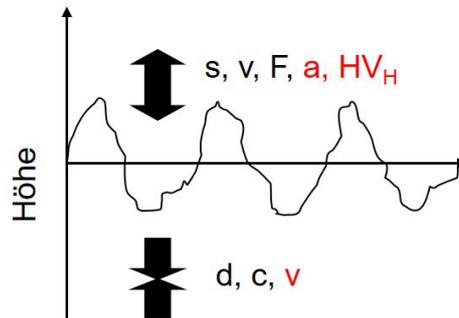


Abbildung 5.26: Schematische Darstellung des Einflusses der MHP-Prozessparameter auf die Rauheit, die untersuchten Piezopeening-Parameter sind rot markiert.

Ergebnisse des E-MHPs [54]. In Abbildung 5.27 ist der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die Eigenspannungen und die Halbwertsbreite analog zum Kugelstrahlen (vgl. Abbildung 2.7) zusammenfassend im Vergleich zu den in Abschnitt 2.1.5 belegten Parametereinflüssen dargestellt. Der Einfachheit halber, wird die Anisotropie der Eigenspannungen vernachlässigt. Eine größere Amplitude und ein härterer Hammerkopf führen zu einer höheren Eindringtiefe der Eigenspannungen und größeren maximalen Eigenspannungen. Durch größere Bahnabstände und Vorschubgeschwindigkeiten wird die Eindringtiefe und die maximalen Eigenspannungen verringert. Die bereits beobachteten Zusammenhänge werden dadurch teilweise bestätigt und ergänzt. Der Einfluss des Durchmessers des Hammerkopfes ist nicht ohne weiteres zu benennen. Hier ist auch die aufgebrachte Last mitentscheidend, ob die Randschicht vollständig plastifiziert wird und ob es zu höheren oder geringeren Eindringtiefen und maximale Eigenspannungen kommt. Die Änderungen der Halbwertsbreite sind nur sehr gering ausgefallen. Die Tendenzen der Versuche in dieser Arbeit deuten jedoch darauf hin, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit, Hammerkopfhärte und Bahnabstand die Halbwertsbreite ansteigt, mit zunehmender Amplitude und zunehmendem Hammerkopfdurchmesser eine Abnahme der Halbwertsbreite erfolgt. Dies steht teilweise im Gegensatz zu den in der Literatur gemachten Beobachtungen. Der Grund dafür ist vermutlich hauptsächlich in der Materialabhängigkeit dieser Effekte zu sehen. Bei zyklisch verfestigenden Materialien führt eine höhere Überdeckung prinzipiell zu einer stärkeren Verfestigung und damit zu höheren Halbwertsbreiten. Bei dem hier verwendeten 42CrMo4 V450 führt eine höhere Überdeckung tendenziell zu geringeren Halbwertsbreiten. Eine generelle Ableitung der Effekte der Prozessparameter auf die Härte bzw. Halbwertsbreite ist deswegen nicht möglich, hier beeinflusst vor allem das Material des Werkstücks die auftretenden Zusammenhänge.

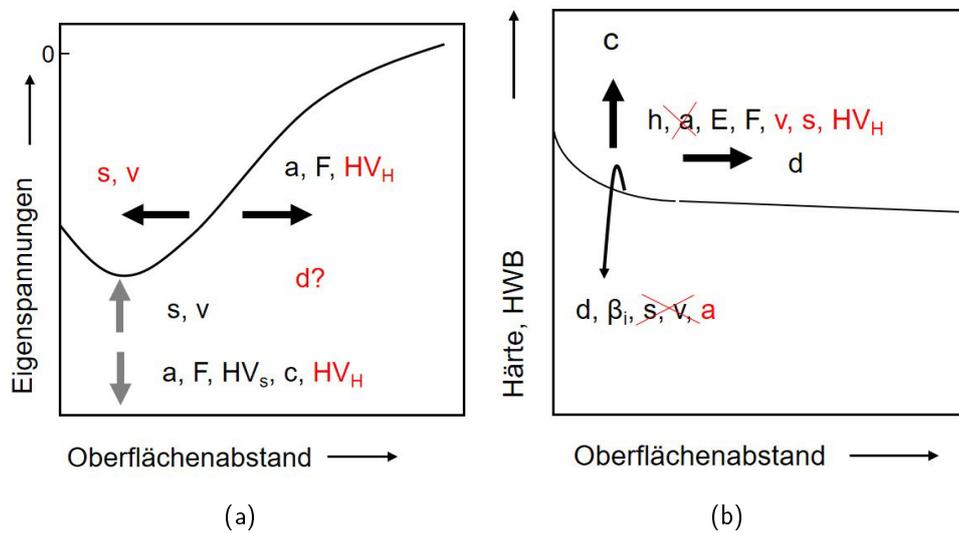


Abbildung 5.27: Schematische Darstellung der Änderung des Eigenspannungstiefenverlaufs (a) und des Halbwertsbreitentiefenverlaufs (b) durch MHP, analog [18]. Die durch Piezopeening abgeleiteten Einflüsse sind rot markiert.

6 Lebensdaueruntersuchungen

Um das neu entwickelte Piezopeening-Verfahren hinsichtlich der Steigerung der Schwingfestigkeit bewerten zu können, wurde ein Vergleich mit den konventionellen mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren Kugelstrahlen und Festwalzen durchgeführt. Die Ergebnisse der Parametervariationen und die ermittelten Wöhlerkurven werden im folgenden für alle drei Verfahren dargestellt.

6.1 Piezopeening

Basierend auf den Ergebnissen der Parametervariationen aus Kapitel 5 und deren Einfluss auf den Randschichtzustand wurden verschiedene Parameterkombinationen ausgewählt, um die Rundproben für die Zug-Druck-Versuche zu bearbeiten. Aufgrund der Drehzahl des Motors zur Rotation der Proben und der minimalen und maximalen Verfahrgeschwindigkeiten der Lineareinheiten konnten jedoch nicht alle Prozessparameter im gleichen Bereich wie bei den Flachproben eingestellt werden. Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 6.1 die verwendeten Prozessparameter wiederholt dargestellt. Die Ergebnisse des Vergleichs der Lebensdauer bei 650 MPa sind in Abbildung 6.1 aufgetragen. Der Parametersatz P6 mit den Parametern $a = 18 \mu\text{m}$, $f = 500 \text{ Hz}$, $T = 0,5$, $d = 5 \text{ mm}$, $HV_H = 765 \text{ HV}$, $v = 36,7 \text{ mm/s}$ und $s = 0,24 \text{ mm}$ wies die höchste Lebensdauer auf und wurde deshalb für die weiteren Versuche ausgewählt. Die Rauheiten liegen nach der Bearbeitung größtenteils unterhalb des Ausgangszustands, weisen teilweise aber deutliche Streuungen auf, wie Abbildung 6.2 entnommen werden kann. Die niedrigste Rauheit wurde bei Parametersatz P6 gemessen. Die Eigenspannungen und Halbwertsbreiten wurden aufgrund mangelnden Probenmaterials nicht für alle Parametersätze gemessen, dies wurde für die festgewalzten Proben exemplarisch an der Oberfläche durchgeführt.

Die Oberfläche nach dem Piezopeening mit den ausgewählten Parametern ist in Abbildung 6.3b dargestellt. Die Drehriefen von der Probenherstellung sind noch deutlich sichtbar, sie wurden durch das Piezopeening nur eingeebnet. Die Rauheit beträgt $R_z = 2,04 \pm 0,11 \mu\text{m}$ und ist somit deutlich geringer als im Ausgangszustand. Das Dia-

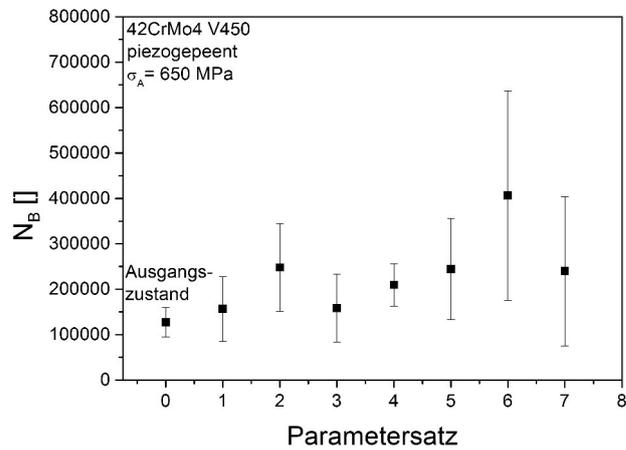


Abbildung 6.1: Vergleich der Bruchlastspielzahlen bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa für verschiedene Piezopeening-Parametersätze.

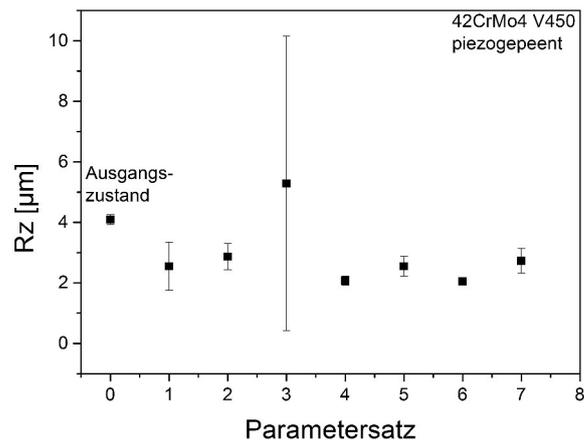


Abbildung 6.2: Vergleich der Rauheiten von 42CrMo4 V450 für die Piezopeening-Parametersätze.

Tabelle 6.1: Piezopeeningparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Amplitude [μm]	18						
Frequenz [Hz]	500						
Tastverhältnis [-]	0,5						
Hammerkopfdurchmesser [mm]	5						
Hammerkopfhärte [HV]	756	1500	555	555	1500	765	555
Vorschub [mm/s]	18,3				36,7		
Bahnabstand [mm]	0,24	0,24	0,24	0,48	0,12	0,24	0,24

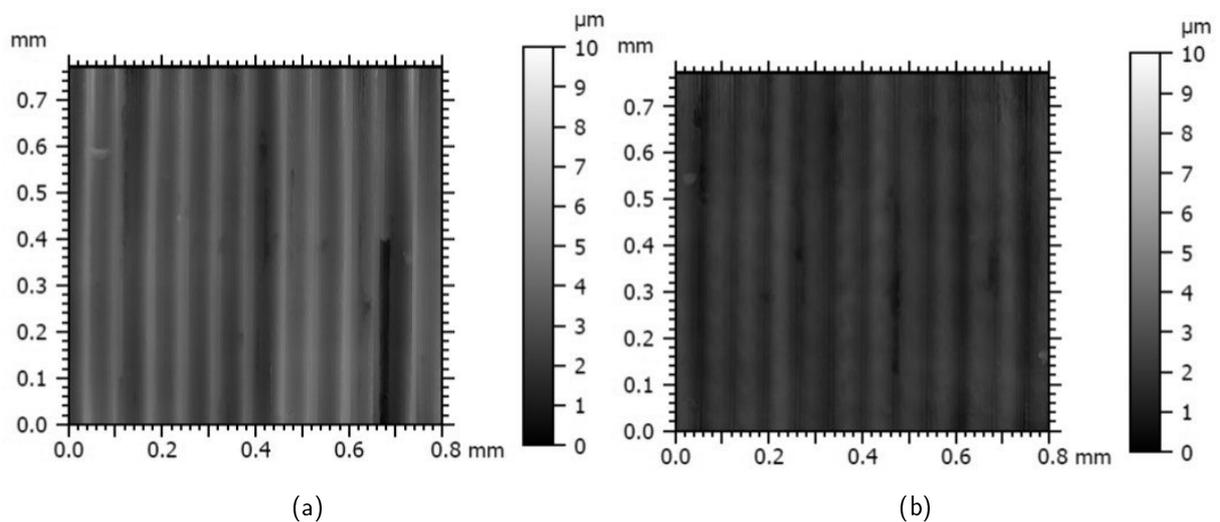


Abbildung 6.3: Vergleich der Oberflächentopographien der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 a) im Ausgangszustand und b) nach dem Piezopeening mit Parametersatz P6.

gramm in Abbildung 6.4 zeigt den Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf nach dem Piezopeening in axialer Richtung. An der Oberfläche werden die maximalen Druckeigenspannungen von etwa -800 MPa erreicht. Im weiteren Verlauf nehmen die Eigenspannungen kontinuierlich ab, bis sie bei einer Tiefe von 100 μm auf 0 MPa gesunken sind. An der Oberfläche beträgt die Halbwertsbreite 3,9 $^\circ$ und sinkt anschließend auf 3,3 $^\circ$ in der Tiefe.

Zusätzlich zum Eigenspannungstiefenverlauf wurden die axialen Oberflächeneigenspannungen in 45 $^\circ$ -Schritten entlang des Umfangs gemessen, um den Einfluss der ungleichmäßigen Bearbeitung aufgrund des Spiels der Proben zu untersuchen. Die gemessenen Eigenspannungen in axialer Richtung sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Es wurden Unterschiede von etwa 80 MPa gemessen, was im Bereich der Messunsi-

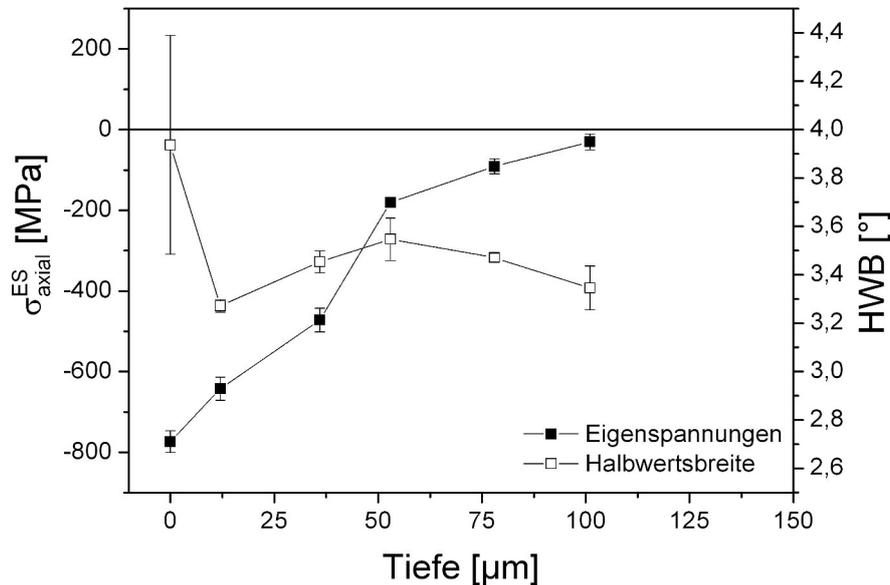


Abbildung 6.4: Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der Rundprobe aus 42Cr-Mo4 V450 nach dem Piezopeenen mit Parametersatz P6 [115].

cherheit der Messung an einer Rundprobe liegt.

Für den ausgewählten Parametersatz wurden die Wöhlerkurven bestimmt, siehe Abbildung 6.6. Es wird eine Steigerung der Bruchwahrscheinlichkeiten im Vergleich zum Ausgangszustand im Zeitfestigkeitsbereich (LCF-Bereich) erreicht. Im Wechselfestigkeitsbereich (HCF-bereich) ergibt sich 535 MPa für die 5% Bruchwahrscheinlichkeit und jeweils 560 MPa und 580 MPa für die 50% und die 95% Bruchwahrscheinlichkeiten. Somit kann für das Piezopeening eine deutliche Verringerung der Streuung und eine Erhöhung der 5% Bruchwahrscheinlichkeit im Wechselfestigkeitsbereich festgestellt werden. Der Wert für 50% Bruchwahrscheinlichkeit ist jedoch vergleichbar mit dem unbearbeiteten Zustand und der Wert für $R_w(95\%)$ ist sogar niedriger.

Durch die mechanische Oberflächenbearbeitung konnte bei einem Großteil der Proben, vor allem bei niedrigeren Spannungsamplituden, der Anrissort von der Probeneroberfläche in das Probenvolumen verlagert werden. Die Bruchfläche einer Probe mit Volumenriss ist in Abbildung 6.7 gezeigt. Auf der Bruchfläche ist ein heller Kreis zu erkennen, ein sogenanntes Fish-eye, in dessen Mitte sich ein kleiner schwarzer Fleck befindet. Dieser schwarze Fleck stellt eine Fehlstelle im Gefüge dar, von der der Riss ausgeht. Mittels EDX-Analyse konnten die Elemente Sauerstoff, Aluminium, Kalzium und Zirkonium nachgewiesen werden. Es handelt sich somit um einen oxidischen Einschluss der von der Herstellung herrührt. Bei allen gebrochenen Proben wurde un-

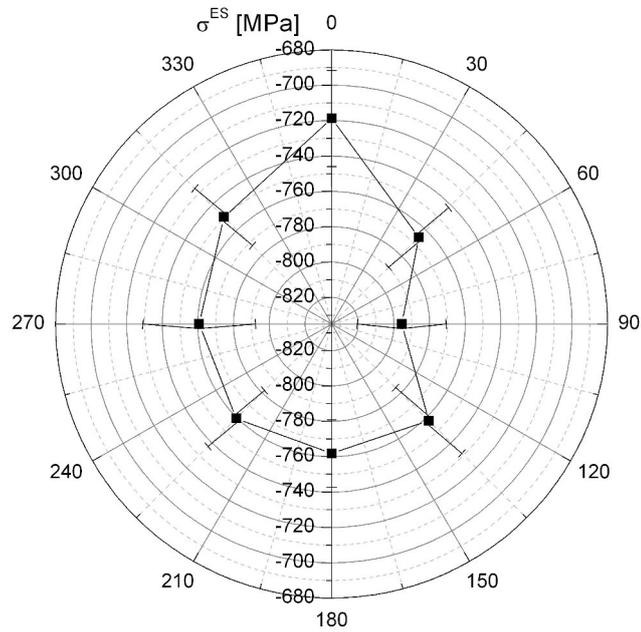


Abbildung 6.5: Oberflächeneigenspannungen in axialer Richtung entlang des Umfangs der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 nach dem Piezopeening mit Parametersatz P6.

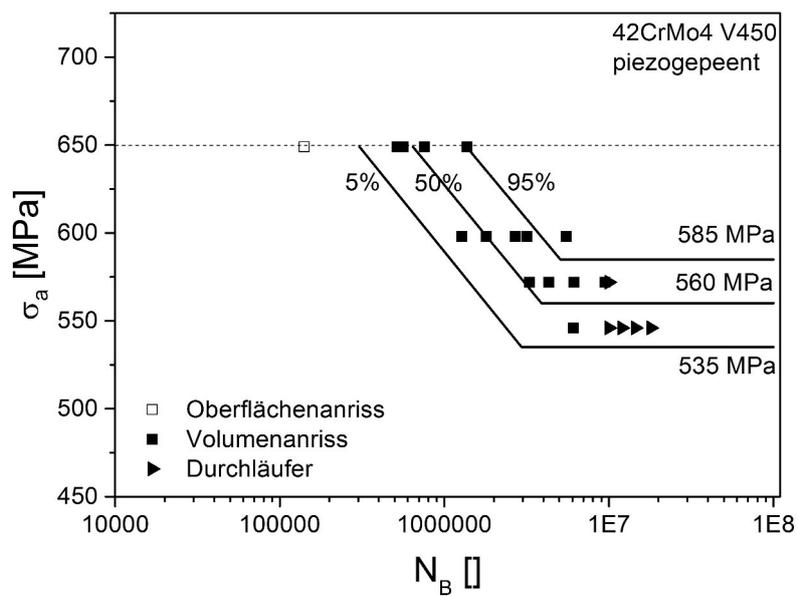


Abbildung 6.6: Wöhlerkurve von piezogepeentem 42CrMo4 V450 mit Parametersatz P6 [115].

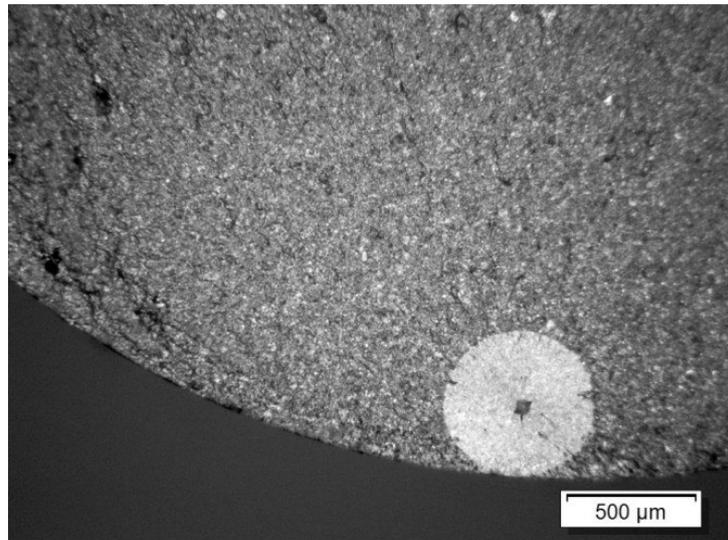


Abbildung 6.7: Makroskopische Aufnahme der Bruchfläche einer gebrochenen, mit Parametersatz P6 piezogepeenten Zug-Druck-Probe.

tersucht, wo sich der Rissausgangsort befindet. Im Falle eines Volumenrisses wurde ebenfalls der Abstand des Anrissortes von der Probenoberfläche vermessen. Die Häufigkeit der Anrisse in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand ist in Abbildung 6.8 aufgetragen. Die Fehlstellen, welche zum entscheidenden Riss führen, liegen alle in einem Abstand von mindestens 100 µm von der Oberfläche. Ein Zusammenhang des Anrissortes mit der verwendeten Spannungsamplitude konnte nicht festgestellt werden.

6.2 Vergleichende Zustände

6.2.1 Randschichtzustand und Wöhlerkurve nach dem Kugelstrahlen

Die verwendeten Kugelstrahlparameter sind ebenfalls zur besseren Übersichtlichkeit erneut in Tabelle 6.2 dargestellt. In Abbildung 6.9 sind die Bruchlastspielzahlen bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa für mit unterschiedlichen Almenintensitäten gestrahlten Rundproben dargestellt. Für alle gestrahlten Proben konnte eine Steigerung der mittleren Bruchlastspielzahl im Vergleich zum Ausgangszustand festgestellt werden. Es ergibt sich hier ein Maximum bei K3 mit 0,21 mmA. Die höchste mittlere Bruchlastspielzahl wurde mit dem Parametersatz K3 und einer Almenintensität von 0,21 mmA erreicht. Prinzipiell ist die höchste Steigerung eines einzelnen Wertes für

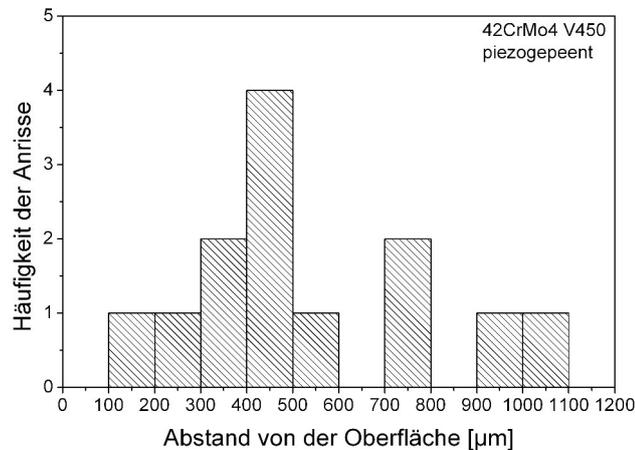


Abbildung 6.8: Tiefe des Rissausgangsorts der gebrochenen Zug-Druck-Proben aus piezogepeentem 42CrMo4 V450 mit Parametersatz P6.

den Parametersatz K4 zu verzeichnen, allerdings ist hier die Streuung sehr groß. Das führt dazu, dass der Mittelwert unterhalb der Parametersätze K3 und K5 liegt. Aus diesem Grund wurde für das weitere Vorgehen der Parametersatz K3 gewählt. Die durch die unterschiedlichen Parametersätze eingestellten Oberflächenrauheiten sind in Abbildung 6.10 in Abhängigkeit der Almenintensität dargestellt. Die Rauheiten liegen alle über der Ausgangsrauheit. Mit zunehmender Almenintensität kommt es zu größeren Rauheiten, allerdings scheint ab der Almenintensität von 0,29 mmA eine Sättigung erreicht.

Tabelle 6.2: Kugelstrahlparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	K1	K2	K3	K4	K5
Strahlmittel	S170 46 HRC				
Düsendurchmesser [mm]	4				
Abstand Düse-Werkstück [mm]	80				
Strahl Druck [bar]	1,2	1,6	1	1	1,6
Massendurchsatz [kg/min]	1	1,5	1,5	2	4
Almenintensität [mmA]	0,29	0,36	0,21	0,18	0,21
Überdeckung	100 %				

Die Oberfläche nach dem Kugelstrahlen mit Parametersatz K3 ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Von der ursprünglichen Oberflächenstruktur nach dem Drehen, siehe Abbildung 3.4a, ist nichts mehr zu sehen, die Oberfläche ist von den Kratern der Kugeleinschläge geprägt. Die Rauheit beträgt $R_z = 8,06 \pm 0,38 \mu\text{m}$ und liegt damit über der Rauheit des

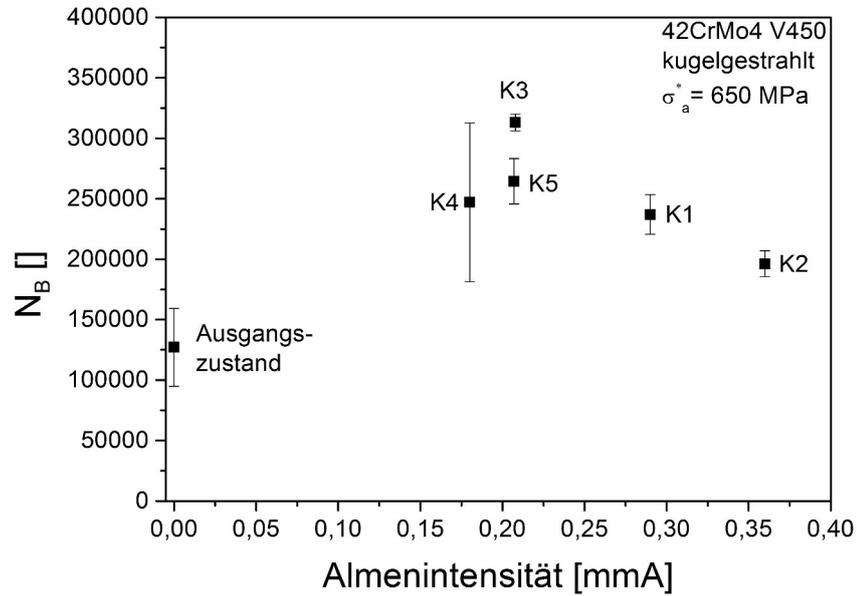


Abbildung 6.9: Einfluss der Almenintensität auf die Bruchlastspielzahl bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa bei kugelgestrahltem 42CrMo4 V450.

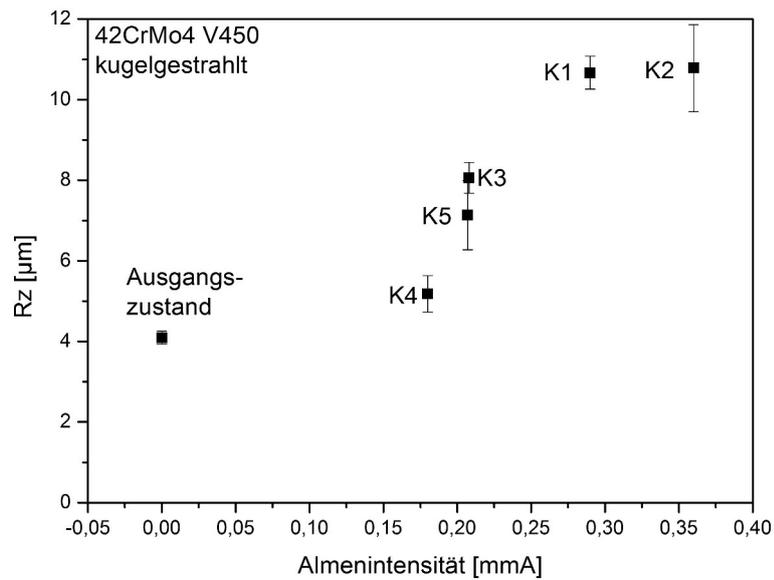


Abbildung 6.10: Einfluss des Almenintensität auf die Oberflächenrauheit von 42CrMo4 V450.

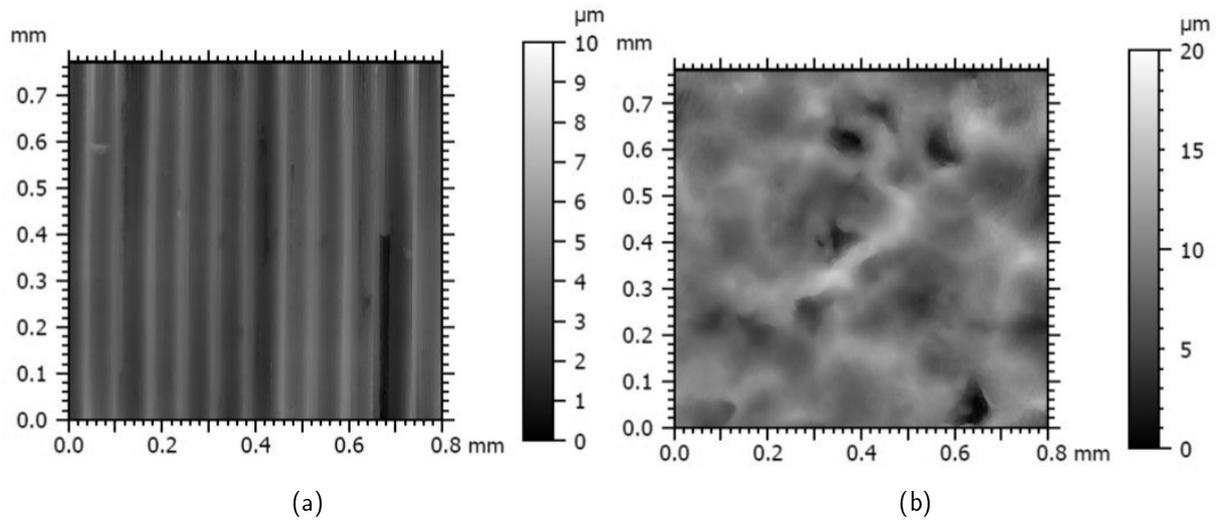


Abbildung 6.11: Vergleich der Oberflächentopographien der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 a) im Ausgangszustand und b) nach dem Kugelstrahlen mit Parametersatz K3.

Ausgangszustandes.

Abbildung 6.12 zeigt den Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf in axialer Richtung nach dem Kugelstrahlen mit Parametersatz K3. An der Oberfläche liegen Druckeigenspannungen von -650 MPa vor, zwischen 50 µm und 100 µm liegt das Druckspannungmaximum von -700 MPa und bei etwa 150 µm erfolgt der Nulldurchgang der Eigenspannungen. Die Halbwertsbreite beträgt an der Oberfläche 3,2 °, fällt in den ersten 100 µm auf 2,6 ° ab, um nachfolgend konstant auf einem Level von 2,8 ° zu bleiben. Für die kugelgestrahlten Proben wurde exemplarisch für eine Lastspielzahl von N bei $\sigma_a = 600$ MPa die Eigenspannungen an der Oberfläche gemessen um einen groben Anhaltspunkt für den Eigenspannungsabbau zu erhalten. Die Eigenspannungen betragen noch $\sigma_{ES,abb}^{OF} = -340$ MPa, was einem Eigenspannungsabbau von $\Delta\sigma_{ES}^{Of} = 300$ MPa entspricht.

Die mit dem Parametersatz K3 resultierende Wöhlerkurve ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Es wurden die Wöhlerkurven für 5 %, 50 % und 95 % Bruchwahrscheinlichkeit berechnet. Sie betragen im Wechselfestigkeitsbereich je 511 MPa, 546 MPa und 580 MPa. Im Vergleich zum unbearbeiteten Zustand ist festzustellen (siehe Abb.3.5), dass die Streubreite deutlich kleiner ist. Der Wert für 5 % Bruchwahrscheinlichkeit liegt etwa 10 % über dem unbearbeiteten Zustand, der Wert für 50 % liegt jedoch 10 MPa unter dem Vergleichswert.

Ein Teil der Proben zeigte auch hier einen Volumenriss. Die Grenze zwischen Oberflächenanriss und Volumenriss liegt etwa bei der Bruchlastspielzahl 10^6 . Bei den

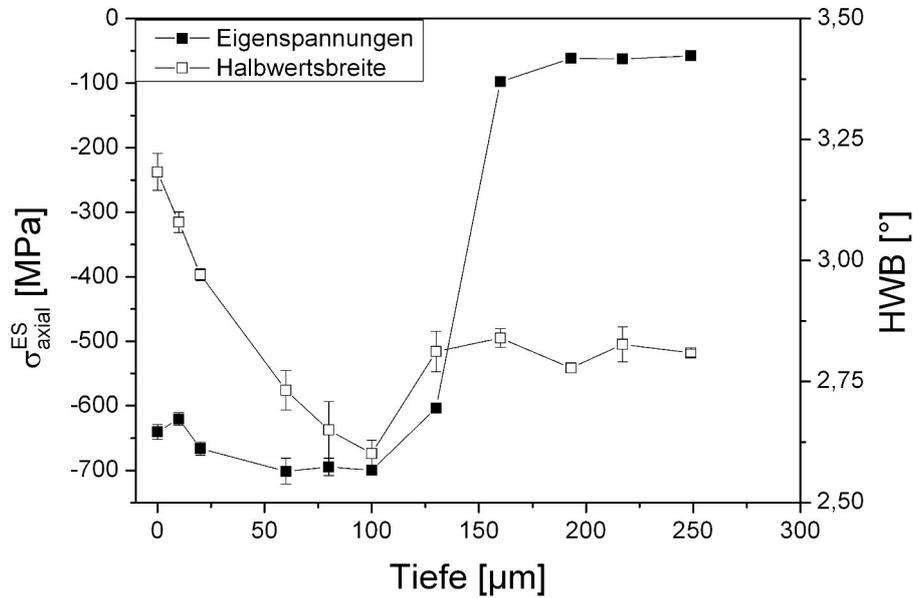


Abbildung 6.12: Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 nach dem Kugelstrahlen mit Parametersatz K3 (0,21 mmA) [115].

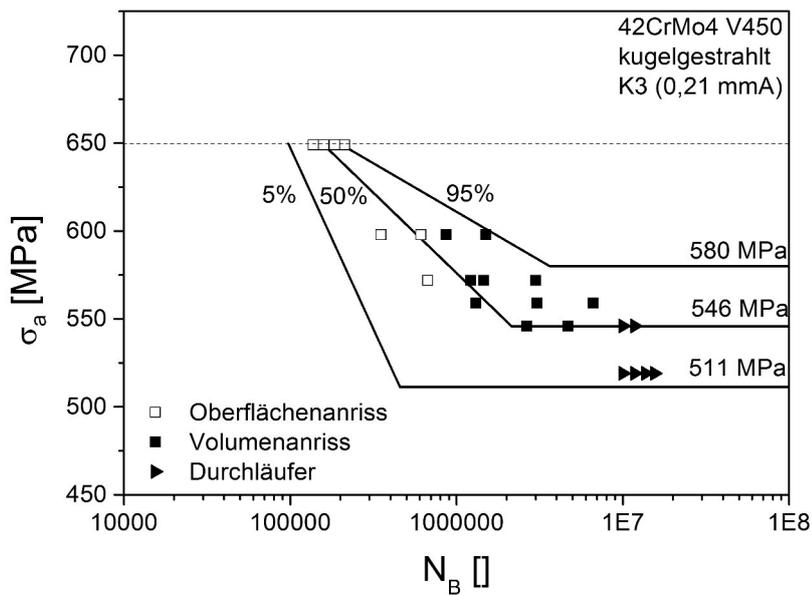


Abbildung 6.13: Wöhlerkurve von kugelgestrahltem 42CrMo4 V450 mit Parametersatz K3 [115].

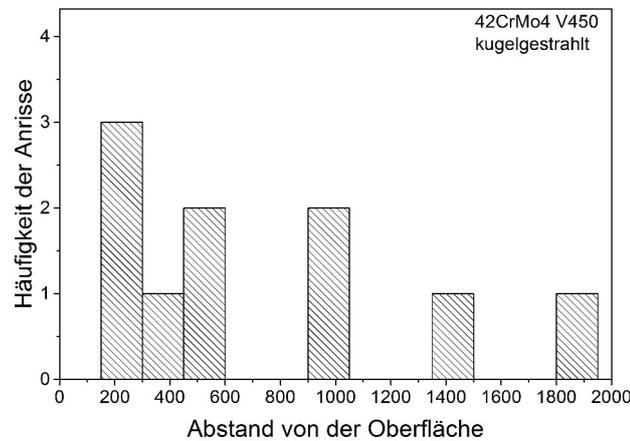


Abbildung 6.14: Tiefe des Rissausgangsorts der gebrochenen Zug-Druck-Proben aus kugelgestrahltem 42CrMo4 V450.

Proben, die vorher gebrochen sind, konnte in der Regel ein Oberflächenanriss festgestellt werden, bei den Proben, die später gebrochen sind, ein Volumenanriss. In Abbildung 6.14 ist die Häufigkeit über die Tiefe des Anrissortes aufgetragen. Die Volumenrisse treten in diesem Fall erst ab einer Tiefe von 150 μm auf.

6.2.2 Randschichtzustand und Wöhlerkurve nach dem Festwalzen

Der Übersicht halber sind die verwendeten Festwalzparameter in Tabelle 6.3 wiederholt dargestellt. In Abbildung 6.15 ist die Änderung der Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit des Festwalzdrucks aufgetragen. Es liegen alle Werte oberhalb des Ausgangszustands. Zunächst steigt die mittlere Bruchlastspielzahl mit zunehmendem Festwalzdruck an, bis bei 200 bar ein Maximum erreicht wird. Anschließend fällt die mittlere Bruchlastspielzahl, wenn der Festwalzdruck weiter erhöht wird. Daher wurde der Parametersatz F4 Festwalzdruck von 200 bar für die Wöhlerkurve ausgewählt. Festwalzen führt zu einer Abnahme der Rauheit. Wie in Abbildung 6.16 erkennbar, ist die Rauheit bei 100 bar Festwalzdruck am geringsten und steigt mit zunehmendem Druck an. Die Abhängigkeit von Oberflächeneigenstressungen und Halbwertsbreiten vom Festwalzdruck sind in Abbildung 6.17 dargestellt. Die Eigenstressungen für 100 bar Festwalzdruck liegen bei -600 MPa und nehmen mit steigendem Druck bis auf -1000 MPa bei 250 bar zu. An dieser Stelle scheint die Sättigung erreicht, bei 300 bar kommt es zu keiner weiteren Steigerung der Eigenstressungen. Die Halbwertsbreiten liegen für alle Zustände unterhalb des Ausgangswertes und weisen ein Maximum bei 175-200 bar auf.

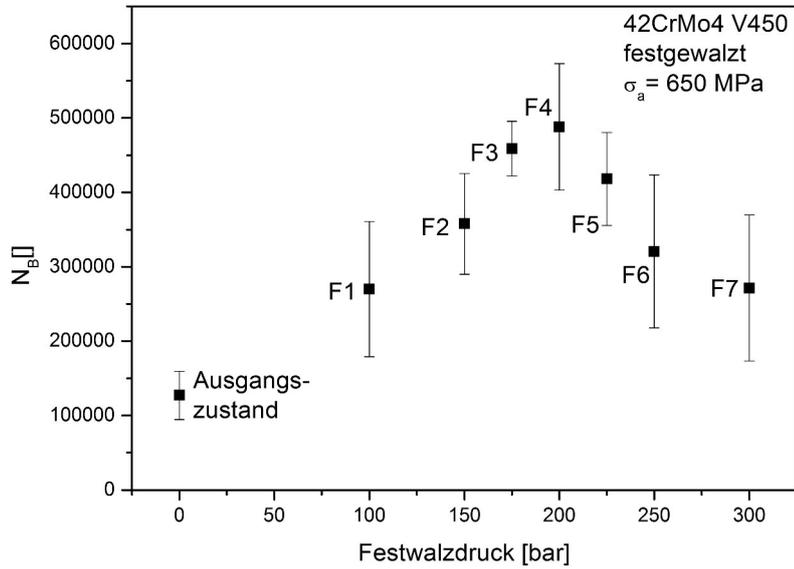


Abbildung 6.15: Einfluss des Festwalzdrucks auf die Bruchlastspielzahl bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa bei festgewaltem 42CrMo4 V450.

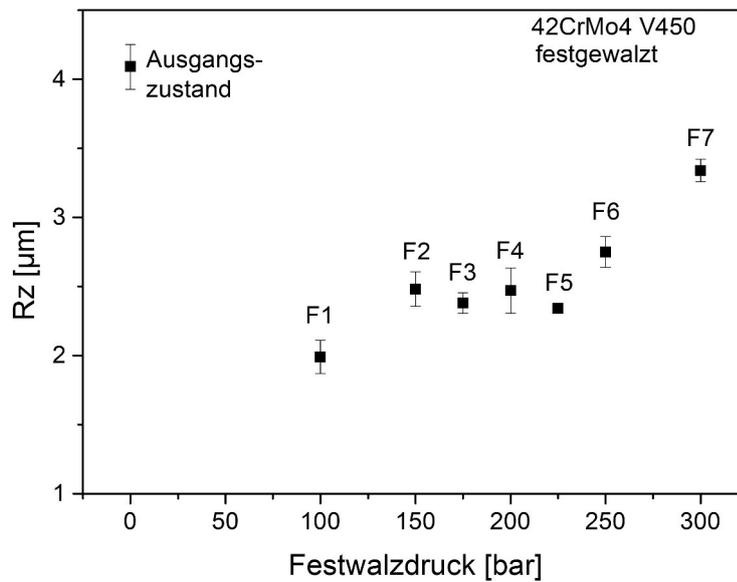


Abbildung 6.16: Einfluss des Festwalzdrucks auf die Oberflächenrauheit von 42CrMo4 V450.

Tabelle 6.3: Festwalzparameter zur Bestimmung der Parameterkombination mit der höchsten Lebensdauer bei einer Spannungsamplitude von 650 MPa.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Kugeldurchmesser [mm]	6,35						
Vorschub [mm/Umdrehung]	0,315						
Drehzahl [U/min]	80						
Festwalzdruck [bar]	100	150	175	200	225	250	300

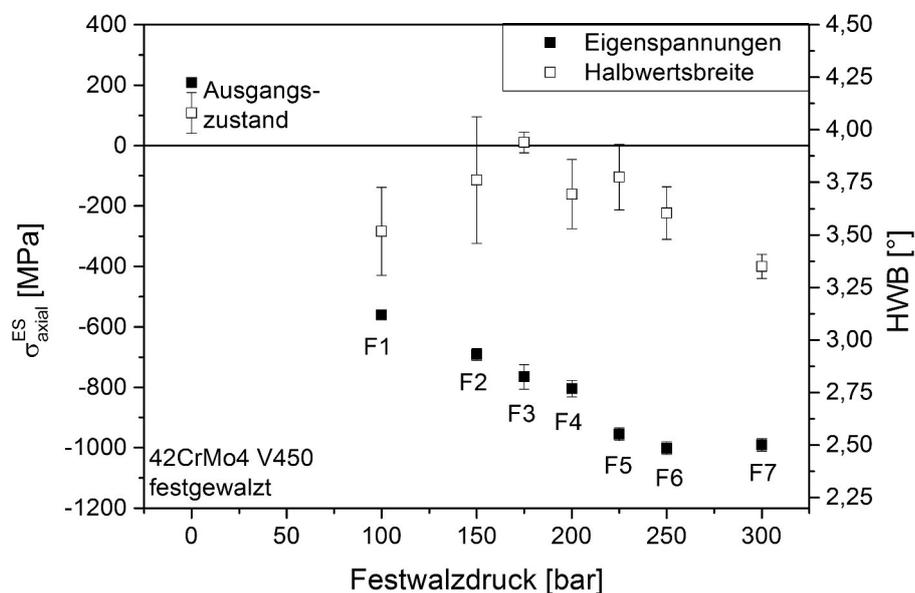


Abbildung 6.17: Einfluss des Festwalzdrucks auf die Oberflächeneigenspannungen und Halbwertsbreiten von 42CrMo4 V450 [115].

Die Nanofokusaufnahme der Oberfläche von 42CrMo4 V450 nach dem Festwalzen mit 200 bar ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Die Oberflächentopographie ist geprägt von den Festwalzbahnen. Die Riefen, welche durch das Drehen der Proben entstanden sind, sind nicht mehr sichtbar, dafür sind die Festwalzbahnen mit seitlichen Materialaufwürfen zu erkennen. Die Rauheit ist mit $Rz = 2,47 \pm 0,17 \mu\text{m}$ geringer als im Ausgangszustand.

In Abbildung 6.19 ist der Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der festgewalzten Probe aufgetragen. An der Oberfläche betragen die eingebrachten Druckeigenspannungen -800 MPa, erreichen ihr Maximum von -900 MPa bei ca. 60 μm und sinken anschließend bis sie bei 450 μm etwa 0 MPa erreichen. Die Halbwertsbreite zeigt einen leicht schwankenden Verlauf mit abnehmender Tendenz. Der Oberflächen-

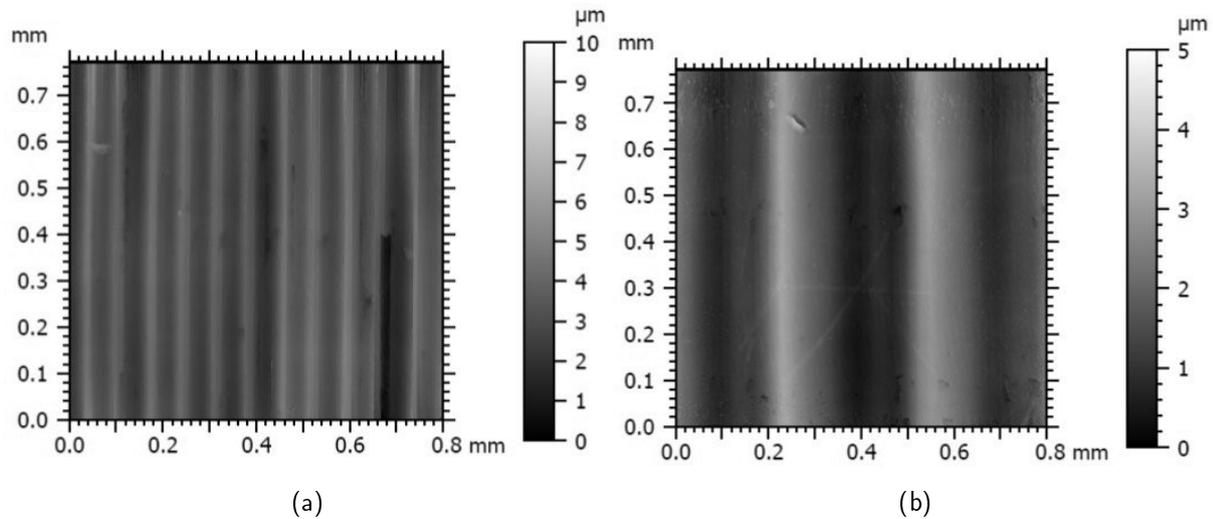


Abbildung 6.18: Vergleich der Oberflächentopographien der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 a) im Ausgangszustand und b) nach dem Festwalzen mit Parametersatz F4.

wert liegt bei 3,7 °, im Verlauf bis 450 μm fällt der Wert auf 3 °.

Die Wöhlerkurve für den Festwalzdruck von 200 bar ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Es kommt zu einer Steigerung der Bruchlastspielzahlen im Zeitfestigkeitsbereich im Vergleich zum Ausgangszustand. Im Wechselfestigkeitsbereich kommt es wie auch beim Kugelstrahlen zu einer deutlichen Verringerung des Streubereichs. Die 5 % Bruchwahrscheinlichkeit liegt mit 494 MPa über dem Ausgangswert, die 50 % und 95 % Bruchwahrscheinlichkeiten mit 519 MPa und 543 MPa sind dagegen deutlich geringer als beim unbearbeiteten Zustand.

Bei den gebrochenen Proben wurden fast ausnahmslos Volumenrisse festgestellt. Wie bei den piezogepeenten Proben konnten die Rissausgangsorte anhand der Fish-eyes festgestellt werden. Die Häufigkeit des Anrisses in Abhängigkeit des Abstands zur Oberfläche ist in Abbildung 6.21 aufgetragen. Im Bereich der ersten 450 μm sind drei Anrisse beobachtet worden, alle anderen sind in größeren Tiefen entstanden.

6.3 Diskussion

6.3.1 Auswahl des Zustands mit der höchsten Lebensdauer

Piezopeening Die unterschiedlichen Überdeckungen und Hammerkopfhärten zeigen nur geringen Einfluss auf die Lastspielzahl, nur Parametersatz P6 zeigt eine deutliche-

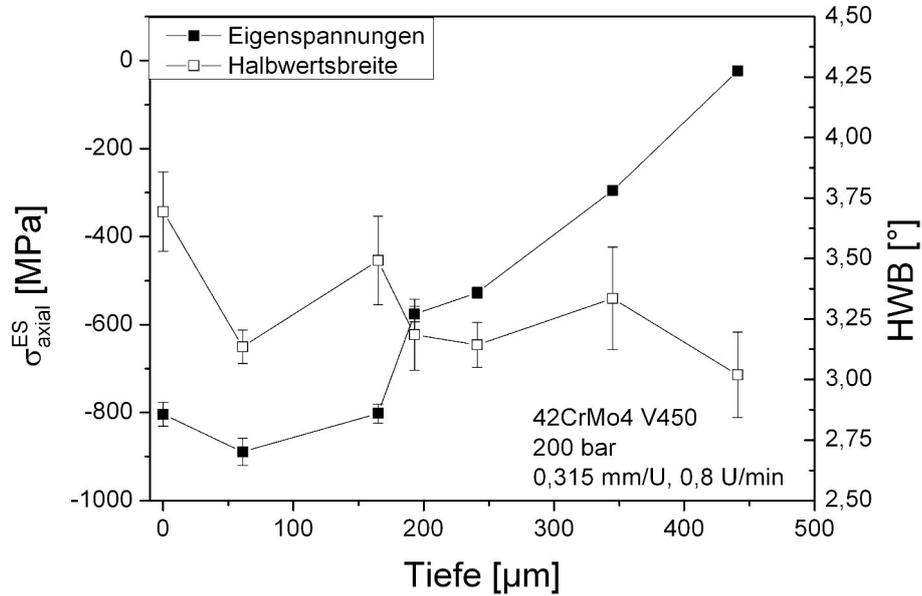


Abbildung 6.19: Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverlauf der Rundprobe aus 42CrMo4 V450 nach dem Festwalzen mit Parametersatz F4 (200 bar) [115].

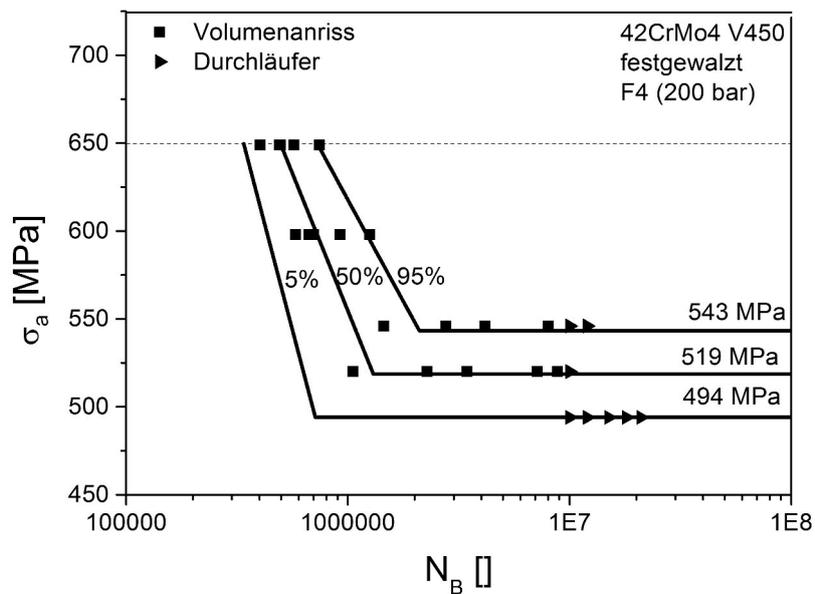


Abbildung 6.20: Wöhlerkurve von mit Parametersatz F4 (200 bar) festgewalztem 42CrMo4 V450 [115].

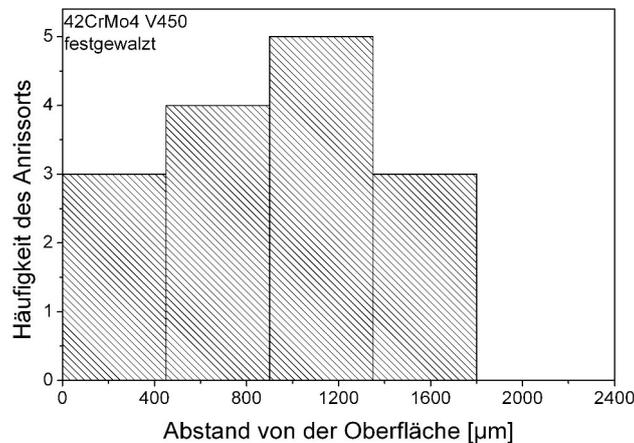


Abbildung 6.21: Tiefe des Rissausgangsorts der gebrochenen Zug-Druck-Proben aus mit Parametersatz F4 festgewalztem 42CrMo4 V450.

re Abweichung nach oben. Eine mögliche Ursache dafür könnte die Empfindlichkeit des Prozesses bezüglich der Exzentrizität der Rundproben sein. Bei großem Spiel wird ein Teil der Probe mit einem deutlich geringeren Tastverhältnis bearbeitet als ein anderer. Dies wurde bei der Umfangsmessung nicht bestätigt, es kann dennoch bei anderen Proben einen größeren Effekt haben. Generell ist die Streuung der Werte der Wöhlerkurve nicht größer als beim Kugelstrahlen und Festwalzen, was demzufolge nicht für eine starke Streuung der Randschichtzustände spricht.

Was jedoch vermutlich eine nicht vernachlässigbare Rolle spielt, ist die Oberflächenstruktur der Proben vor der Bearbeitung. Das Piezopeening führt nur zu einer Einglättung der ursprünglichen Oberflächenstruktur. Das bedeutet, die Rauheitsspitzen werden eingelätet, vorhandene Kerben werden dadurch kaum beeinflusst. Die ursprüngliche Struktur ist immer noch erkennbar, allerdings wird die Rauheit verringert. Bei Parametersatz P6 kommt es bei einer Probe zu einem Oberflächenanriss und bei den anderen Proben zu Volumenarissen. Die Proben mit Volumenarissen weisen eine deutlich größere Bruchlastspielzahl als solche mit Oberflächenariss auf. Bei den weiteren Parametersätzen ist der Oberflächenanriss die Regel. Bei einem Volumenariss ist im Gegensatz zu den Oberflächenarissen die Oberflächenstruktur nicht mehr versagensrelevant. Für das Versagen an der Oberfläche ist die Kerbe mit der höchsten Spannungsüberhöhung ausschlaggebend. Die Rauheitswerte nach der Bearbeitung unterscheiden sich für die Parametersätze nur geringfügig. Bei der Bestimmung der Rauheit wird nur ein Ausschnitt der Oberfläche betrachtet, der versagensrelevante Teil ist nicht zwangsläufig dabei. Dies lässt den Schluss zu, dass die guten Ergebnisse bei P6 wesentlich durch die Oberflächenstruktur vor der Bearbeitung beeinflusst werden

und nicht explizit von den gewählten Prozessparametern.

Kugelstrahlen Die mit zunehmender Almenintensität steigende Rauheit begünstigt die Rissinitiierung. Es wurde nicht für alle Zustände die Oberflächeneigenspannungen und die Halbwertsbreite an der Oberfläche gemessen. Laut [16] ist bei 42CrMo4 V450 durch Kugelstrahlen auch nicht mit einer Änderung der Halbwertsbreite zu rechnen. Die untersuchte Probe des Parametersatz K3 zeigt jedoch eine Abnahme der Halbwertsbreite an der Oberfläche im Vergleich zum Ausgangszustand. [127] zeigte für einen 50 °C höher angelassenen 42CrMo4, dass mit zunehmender Almenintensität es tendenziell zu geringeren Halbwertsbreiten kommt. Somit ist davon auszugehen, dass auch im vorliegenden Fall bei höheren Almenintensitäten eine stärkere Abnahme der Halbwertsbreite vorliegt. Ein zur Rauheit gegenläufiger Verlauf der Verfestigung, welche die Rissinitiierung hemmt [104], führt zu einem Maximum der Bruchlastspielzahl bei einer mittleren Almenintensität. Bei Parametersatz P4 gab es die größte Steigerung der Bruchlastspielzahl, allerdings kommt es bei geringen Drücken und hohem Massendurchsatz dazu, dass die Düse zum Verstopfen neigt und die Ergebnisse stark schwanken. Deshalb wurde dieser Parametersatz von der Auswahl ausgeschlossen.

Festwalzen Die Bruchlastspielzahlen bei 650 MPa für verschiedene Festwalzdrücke zeigen ein Maximum bei 200 MPa. Die Oberflächenrauheit ist dabei für den niedrigsten Druck am geringsten und steigt mit zunehmendem Festwalzdruck an. Dies liegt daran, dass mit zunehmendem Druck die Festwalzbahnen ausgeprägter werden und dadurch Riefen in der Oberfläche entstehen. Diese sind senkrecht zur Beanspruchung ausgerichtet und besitzen somit eine Kerbwirkung. Die Druckeigenspannungen an der Oberfläche steigen mit zunehmendem Druck, bis sie ab 250 MPa eine Sättigung erreichen und die HWBs haben ihr Maximum etwa bei 175 MPa. Rauheit und Druckeigenspannungen verhalten sich demnach gegenläufig, so dass der beste Zustand etwa in der Mitte liegt, wo auch die HWB ihr Maximum aufweisen.

6.3.2 Randschichtzustand nach Piezopeening

Im Folgenden wird der Randschichtzustand der Rundprobe im Vergleich zum Referenzzustand der Flachprobe diskutiert. Die Amplitude, die Frequenz, der Hammerkopf und das Tastverhältnis sind dieselben wie beim Referenzzustand. Der Vorschub und der Bahnabstand sind jedoch geringer, so dass die Überdeckung theoretisch etwas höher ist. Durch das Piezopeening wurde bei den Rundproben nur eine Einglättung der Drehriefen erreicht, keine komplette plastische Verformung der Oberfläche, siehe

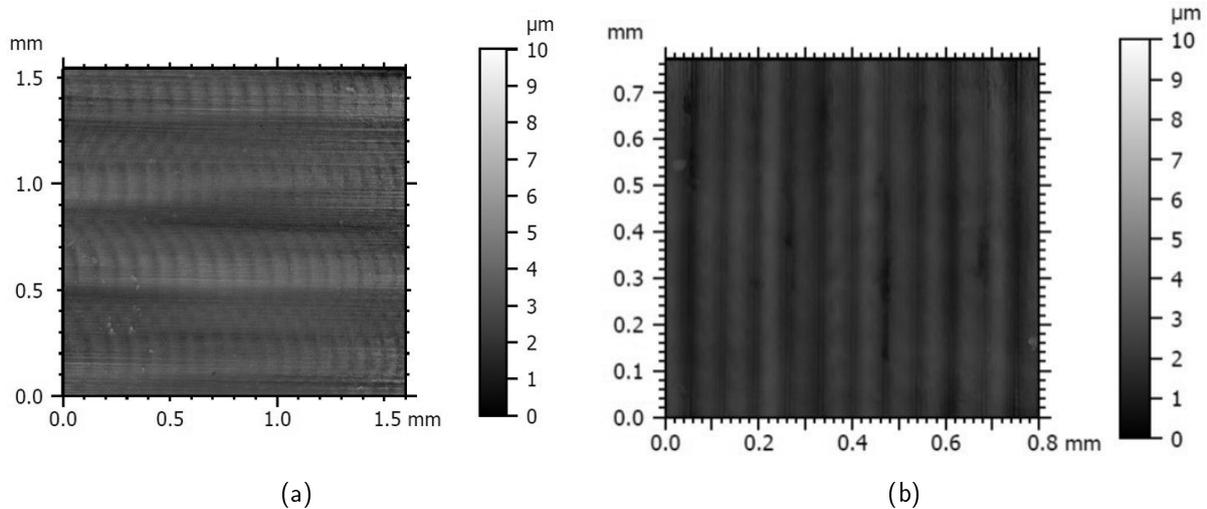


Abbildung 6.22: Vergleich der Oberflächentopographien der piezogepeenten Proben aus 42Cr-Mo4 V450: a) Flachprobe bearbeitet mit den Parametern des Referenzzustandes und b) Rundprobe bearbeitet mit Parametersatz P6.

Abb. 6.22b. Im Gegensatz dazu sind beim Referenzzustand einzelne Hammerkopfeindrücke auf der Oberfläche erkennbar, siehe Abb. 6.22a. Das deutet bereits auf eine relativ geringe Wirkung der eingestellten Parameter beim Piezopeening der Rundproben hin. In beiden Fällen konnte dennoch die Rauheit im Vergleich zum Ausgangszustand verringert werden. Die Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverläufe sind in Abb. 6.23 vergleichend dargestellt. Die Oberflächeneigenspannungen der Rundprobe $\sigma_{OF,Rundprobe}^{ES}$ sind mit -800 MPa etwas höher als beim Referenzzustand. Die Eindringtiefe ist mit $x_0 = 80 \mu\text{m}$ deutlich geringer als anhand der Ergebnisse der Flachproben zu erwarten gewesen wäre. Vor allem da die Überdeckung eigentlich größer ist und mit zunehmender Überdeckung größere Eindringtiefen erwartet werden. Die Auswirkungen auf die Oberflächentopographie lassen jedoch schon erahnen, dass die plastische Verformung bei der Rundprobe geringer ausfällt als bei der Flachprobe. Eine Betrachtung der aufgezeichneten Kräfte, vgl. Abschnitt 4.1.1.3, zeigt, dass bei den Rundproben die Kräfte im Bereich von 100-200 N liegen. Die Kräfte, welche bei den Flachproben gemessen wurden, liegen je nach Parameter bei 300 - 800 N. Der Grund dafür ist mit der unterschiedlichen Lagerung der Proben bei der Bearbeitung verbunden. Die Flachproben sind in einem Schraubstock eingespannt und liegen mit einem Großteil der Fläche auf einer Unterlegplatte auf. Sie können nicht nachgeben und sich nach unten durchbiegen. Die Rundproben sind im Bereich der späteren Einspannung auf Prismen gelagert, der zu bearbeitende Teil hängt frei in der Luft. Wenn der Hammerkopf auf die Probe einschlägt, geht ein Teil der Energie aufgrund der elastischen Durchbiegung der Rundprobe verloren. Nur ein geringer Teil der Schlagenergie kann

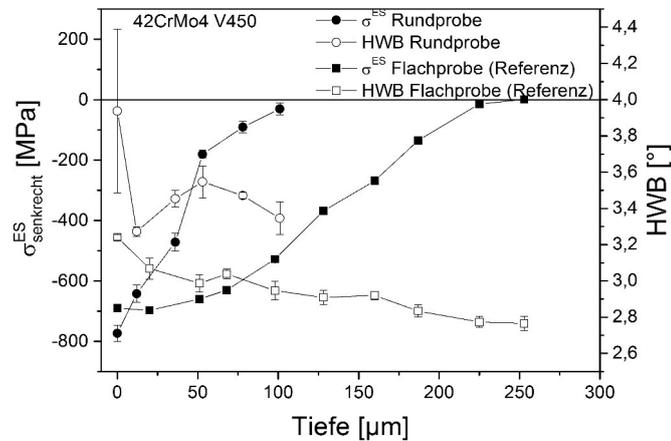


Abbildung 6.23: Vergleich der Eigenspannungs- und Halbwertsbreitentiefenverläufe von 42CrMo4 V450 a) Flachprobe bearbeitet mit den Parametern des Referenzzustandes und b) Rundprobe bearbeitet mit Parametersatz P6.

zur plastischen Verformung der Randschicht genutzt werden. Zudem kommt es dadurch, dass die Proben nicht perfekt rund sind, sondern eine gewisse Exzentrizität aufweisen, zu Schwankungen des Randschichtzustands entlang des Probenumfangs, wie beispielsweise für die Eigenspannungen bestimmt. Wegen der geringen Amplitude des Piezoaktors wirken sich hier schon geringe Abweichungen aus. Die Regelung ist aufgrund ihrer Trägheit nicht in der Lage die Schwankungen in Umfangsrichtung auszugleichen. Die Schwankungen der Eigenspannungen liegen aber durchaus im Rahmen der Messungenauigkeit. Die höhere Überdeckung im Vergleich zum Referenzzustand führt vermutlich zu den hohen Oberflächeneigenspannungen, die geringeren Kräfte führen jedoch zu einer deutlich geringeren Eindringtiefe. Der Halbwertsbreitentiefenverlauf zeigt bei der Rundprobe nur einen hohen Wert direkt an der Oberfläche, welcher noch vom Drehprozess herrührt. Die weiteren Werte scheinen um den Wert des Grundzustands zu schwanken. Dies zeugt ebenfalls von der geringen plastischen Verformung der Randschicht im Vergleich zur Flachprobe, bei der zumindest eine leichte Erhöhung der Halbwertsbreite auch in nach dem Oberflächenwert erkennbar ist.

6.3.3 Vergleich des Randschichtzustands

In Abbildung 6.24 sind die Oberflächenrauheiten des Ausgangszustands mit den bearbeiteten Zuständen verglichen. Nach dem Kugelstrahlen ist die Rauheit im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich erhöht, Festwalzen führt zu einer geringeren Rauheit, jedoch mit ausgeprägten Festwalzbahnen. Das Einglätten der Drehbahnen durch das

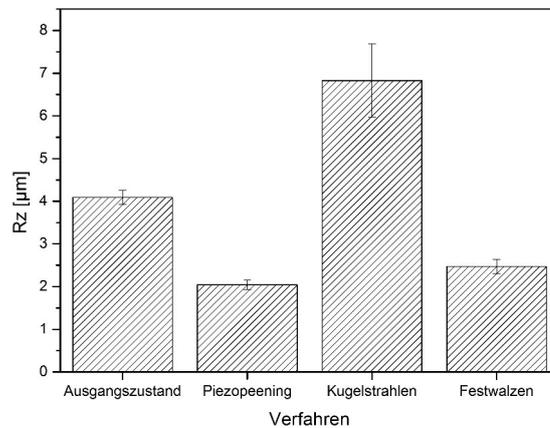


Abbildung 6.24: Vergleich der Rauheiten der piezogepeenten, kugelgestrahlten und festgewalzten Rundproben aus 42CrMo4 V450 [115].

Piezopeening resultiert in der geringsten Oberflächenrauheit. Eine Gegenüberstellung der Eigenspannungstiefenverläufe, vergleiche Abbildung 6.25, zeigt, dass Kugelstrahlen die geringsten Druckeigenspannungen an der Oberfläche hervorruft, die Eindringtiefe liegt zwischen der des Festwalzens und der des Piezopeenings. Festwalzen induziert die höchsten Druckeigenspannungen, das Maximum liegt dabei leicht unter der Oberfläche und die Eindringtiefe ist deutlich größer als beim Piezopeening und beim Kugelstrahlen. Piezopeening führt zu den selben Druckeigenspannungen an der Oberfläche wie Festwalzen, zeigt aber mit Abstand die geringste Eindringtiefe. Die in Abbildung 6.26 dargestellten HWB-Tiefenverläufe weisen nur geringe Unterschiede, vor allem an der Oberfläche auf. Nach dem Piezopeening ist die Halbwertsbreite am höchsten, nach dem Kugelstrahlen am geringsten, die nach dem Festwalzen liegt etwa in der Mitte.

6.3.4 Vergleich der Wöhlerkurven

Die Wöhlerkurven für die Bruchwahrscheinlichkeit 5% der verschiedenen Verfahren sind in Abbildung 6.27 miteinander verglichen. Alle Verfahren führen zu einer Steigerung der Lebensdauer im Vergleich zum Ausgangszustand, sowohl im Low cycle fatigue (LCF) Bereich als auch im High cycle fatigue (HCF) Bereich. Diese beiden Bereiche sollen im folgenden einzeln genauer betrachtet werden.

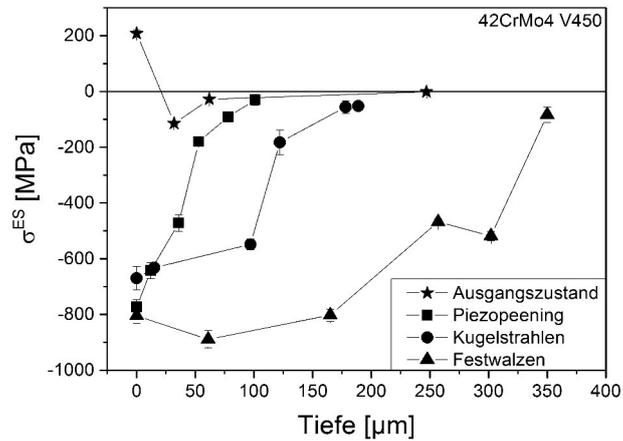


Abbildung 6.25: Vergleich der Eigenspannungstiefenverläufe in axialer Richtung der piezogepeenten, kugelgestrahlten und festgewalzten Rundproben aus 42CrMo4 V450 [115].

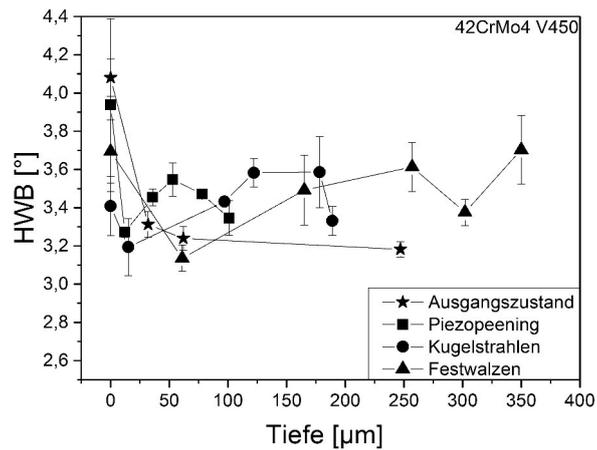


Abbildung 6.26: Vergleich der Halbwertsbreitentiefenverläufe der piezogepeenten, kugelgestrahlten und festgewalzten Rundproben aus 42CrMo4 V450 [115].

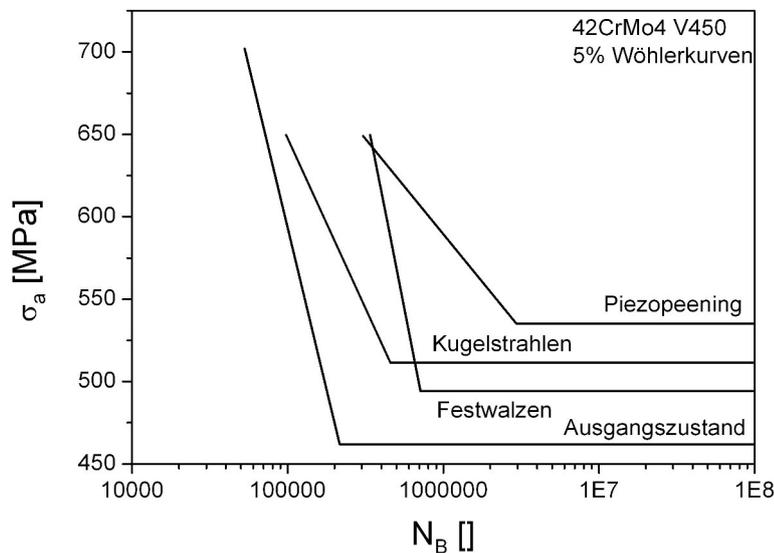


Abbildung 6.27: Vergleich der 5 % Wöhlerkurven von 42CrMo4 V450 im Ausgangszustand mit denen nach mechanischer Oberflächenbehandlung [115].

6.3.4.1 LCF Bereich

Im LCF Bereich sind die Lastspannungen vergleichsweise hoch, so dass es zum Abbau eines Teils der Druckeigenstressungen kommt. Aus diesem Grund sind die Eigenstressungen nicht mehr voll wirksam, so dass die Oberflächenrauheit sowie der Verfestigungszustand ausschlaggebend für die Lebensdauer sind. Da durch Kugelstrahlen die Rauheit erhöht und die niedrigste HWB gemessen wurde, ist für diese Bearbeitung die geringste Lebensdauer zu erwarten. Die leichte Erhöhung der Lebensdauer im Vergleich zum Ausgangszustand ist auf die noch vorhandenen Druckeigenstressungen zurückzuführen, da HWB und Rauheit schlechter als im Ausgangszustand sind. Die festgewalzten Proben weisen eine deutliche Verbesserung der Rauheit auf, die HWB liegt auf einem erhöhten Niveau in der Mitte zwischen den kugelgestrahlten und piezogepeenten Proben. Ein Teil der festgewalzten Proben weist in diesem Bereich sogar Anrisse im Probeninneren auf. Die Oberfläche konnte durch die Bearbeitung demnach deutlich gestärkt werden, so dass auch eine deutliche Steigerung der Lebensdauer erreicht werden konnte. Für die piezogepeenten Proben gilt ähnliches: Die Rauheit ist etwas geringer als nach dem Festwalzen und die HWB leicht höher, so dass es ebenfalls zur teilweisen Verlagerung des Anrissortes unter die Oberfläche und somit zu einer deutlichen Steigerung der Schwingfestigkeit kommt.

6.3.4.2 HCF Bereich

Im HCF Bereich wurden für alle mechanisch oberflächenbehandelten Proben, bis auf wenige Ausnahmen, nur Risse mit Rissausgangsort unter der Oberfläche beobachtet. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auch hier die Randschicht durch die Bearbeitung soweit gestärkt wurde, dass sie nicht mehr versagensrelevant ist. Die Auswertung der Rissausgangsorte und der Vergleich mit der Eindringtiefe der Druckeigenstressungen zeigt, dass die überwiegende Mehrheit der Risse nicht im Bereich der Druckeigenstressungen entstehen. Wird zudem noch berücksichtigt, dass die Eigenstressumlagerungen durch den Abtrag in den Abbildungen nicht mit eingerechnet wurden, verringert sich die Eindringtiefe der Druckeigenstressungen wahrscheinlich zusätzlich. Der Bereich, in dem die aus Gleichgewichtsgründen induzierten Zugspannungen herrschen, ist demzufolge ausschlaggebend für die Rissinitiierung. Zur Bewertung der Wechselfestigkeit kann auf die Goodman-Gerade

$$R_w = R_w^0 \left(1 - \frac{\sigma_{ES}}{R_m} \right) \quad (6.1)$$

zurück gegriffen werden. Die Zugeigenstressungen und deren Verlauf im Probeninneren sind aufgrund des schichtweisen elektrolytischen Abtrags nicht röntgenographisch messbar. Möglich wäre eine Messung mittels Synchrotronstrahlung, wie es beispielsweise von [128] für eine kugelgestrahlte Probe aus normalem 42CrMo4 durchgeführt wurde. Die Zugspannungen scheinen in diesem Fall einen konstanten Wert über die Tiefe zu besitzen. Unter den Annahmen, dass der Tiefenverlauf im vorliegenden Fall genauso aussieht, dass der Einfluss der Spannungsumlagerungen beim Abtragen und der mechanische Eigenstressabbau vernachlässigbar ist, können die Zugspannungen im Probeninneren abgeschätzt werden. Dazu wird der Querschnitt der Rundprobe in zwei Bereiche unterteilt, einen äußeren Ring in dem Druckspannungen herrschen und einen Kreis im Inneren, der unter Zugspannungen steht. Durch Integration über den Tiefenverlauf bis zum Nulldurchgang kann ein Mittelwert für die Druckspannungen berechnet werden. Aus Gleichgewichtsgründen muss das Integral über die Zugspannungen den gleichen Wert besitzen. Anhand der Flächenanteile kann daraus ein Mittelwert für die Zugspannungen ermittelt werden. Die verwendeten Ausgangsgrößen und Ergebnisse der Zugspannungen sind in Tabelle 6.4 zusammenfassend dargestellt.

Für das Piezopeening und das Kugelstrahlen sind die Zugspannungen verhältnismäßig gering, beim Festwalzen führt die Approximation zu einem größeren Wert. Um in diesem Fall dem Effekt der Eigenstressumlagerung ein wenig Rechnung zu tragen, wird zur Abschätzung der Wechselfestigkeit nach Goodman ein weiterer Wert mit geringeren Zugspannungen von 100 MPa verwendet. Dieser Wert ist willkürlich

Tabelle 6.4: Übersicht über die zur Abschätzung der Zugspannungen verwendeten Tiefen des Nulldurchgangs, der ermittelten Spannungswerte und der daraus abgeschätzten Wechselfestigkeiten nach Goodman. Beim Festwalzen können wegen des Eigenspannungsabbau geringere Zugspannungen angenommen werden, die Werte sind in Klammern aufgeführt.

	Piezopeening	Kugelstrahlen	Festwalzen
Tiefe Nulldurchgang [μm]	80	180	350
Mittelwert Druckspannungen [MPa]	-385	-410	-670
Mittelwert Zugspannungen [MPa]	20	45	160 (100)
R_W (experimentell) [MPa]	560	546	519
R_W (abgeschätzt) [MPa]	549	539	493 (517)

gewählt und in der Tabelle in Klammern eingetragen. Er dient nur der Veranschaulichung des Einflusses des Eigenspannungsabbaus. Nach Gleichung 6.1 gilt, je größer die Zugspannungen im Probeninneren, desto geringer die Wechselfestigkeit. Um mit der Goodman-Gleichung konkrete Werte für die Wechselfestigkeiten auswerten zu können, würde ein Wert für die Wechselfestigkeit des unbearbeiteten Materials für Volumenrisse benötigt. Ansonsten sind die Werte nicht miteinander vergleichbar, da andere Mechanismen wirken. Die Abstufung der Werte können jedoch damit qualitativ bestätigt werden, was in Abbildung 6.28 veranschaulicht wird.

Weiterhin ist allgemein für alle drei bearbeiteten Zustände eine deutliche Verringerung des Streubereichs zwischen den 5 % und 95 % Bruchwahrscheinlichkeiten festzustellen. Zum einen ist der Streubereich der unbehandelten Proben sehr groß. Das ist vermutlich auf das große untersuchte Messvolumen zurückzuführen. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein versagensauslösender Defekt an der Oberfläche befindet sehr groß. Zum Anderen wird durch die mechanische Oberflächenbehandlung nun ein gleichmäßiger und deshalb definierterer Randschichtzustand eingestellt und dadurch die Streuung reduziert.

Fazit: Um die Lebensdauer eines Bauteils zu erhöhen, müssen verschiedenste Faktoren berücksichtigt werden, es reicht beispielsweise nicht, nur möglichst hohe Druckspannungen an der Oberfläche zu erzeugen. Der Randschichtzustand muss für die jeweilige Probengeometrie und Beanspruchungsart optimiert werden. Sobald die Oberfläche nicht mehr Rissausgangsort ist, ist bei der gewählten, axialen Beanspruchung der Zustand mit den geringsten Zugeigenspannungen im Probeninneren der beste. In dieser Arbeit konnte der Randschichtzustand durch Piezopeening am besten für Zug-Druck-Beanspruchung optimiert werden. Bei einer anderen Beanspruchungsart, wie zum Beispiel Umlaufbiegung, würden auf Grund des Verlaufs der Lastspannung die

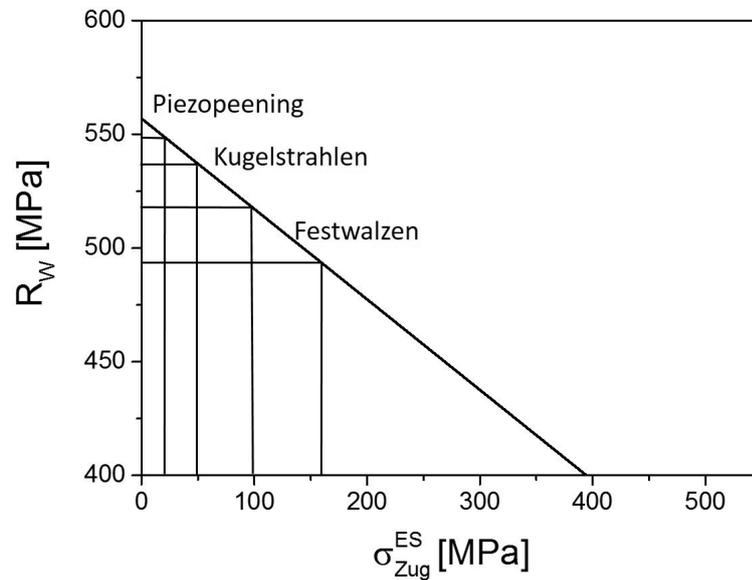


Abbildung 6.28: Ausschnitt der Goodman-Gerade für 42CrMo4 V450 zur Darstellung des Einflusses der im Probeninneren vorherrschenden Zugspannungen auf die Wechselfestigkeit.

Zugspannungen im Inneren kaum eine Rolle spielen, so dass hier ein deutlich größeres Potential zur Erhöhung der Lebensdauer vorliegt.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss verschiedener Prozessparameter des Piezopeeningprozesses auf den Randschichtzustand untersucht. Des Weiteren wurde ein Vergleich des Piezopeenings mit den konventionellen mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren Kugelstrahlen und Festwalzen bezüglich der Auswirkung der Verfahren auf die Schwingfestigkeit von axial beanspruchten Rundproben durchgeführt.

Die untersuchten Parameter waren die Amplitude, der Bahnabstand, die Vorschubgeschwindigkeit, der Hammerkopfdurchmesser und die Hammerkopfhärte. Es wurden jeweils der Einfluss auf die Oberflächenrauheit, den Eigenspannungs- und den Verfestigungszustand untersucht. Die wesentlichen Effekte werden im Folgenden zusammengefasst:

- **Rauheit:** Die Oberflächenrauheit steigt bei großen Amplituden an. Der Energieeintrag steigt mit zunehmender Amplitude, was zu tieferen Eindrücken führt. Dasselbe gilt für eine höhere Härte des Hammerkopfes, je härter der Hammerkopf, desto höher der Energieeintrag in das Material und desto höher die resultierende Oberflächenrauheit. Ebenfalls eine Erhöhung bewirkt ein größer werdender Bahnabstand, da in diesem Fall die einzelnen Bahnen die Topographie dominieren. Eine Erhöhung des Hammerkopfdurchmessers führt zu flacheren Eindrücken mit geringeren Materialaufwürfen, so dass die Rauheit geringer wird. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt im untersuchten Bereich zu einer Verringerung der Rauheit, da auch hier die seitlichen Materialaufwürfe reduziert werden. Bei sehr geringen Vorschüben, also großen Abständen der einzelnen Eindruckmittelpunkte, kann jedoch auch eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit zu geringeren Rauheiten führen.
- **Eigenspannungen:** Prinzipiell werden durch das deterministische Verfahren Piezopeening anisotrope Eigenspannungszustände hervorgerufen. Senkrecht zur Vorschubrichtung sind die Eigenspannungen größer als parallel dazu. Höhere maximale Eigenspannungen und höhere Eindringtiefen können mit zunehmender Überdeckung erreicht werden. Das bedeutet, die Eigenspannungen steigen mit abnehmendem Bahnabstand und abnehmender Vorschubgeschwindigkeit.

Eine Erhöhung der eingebrachten Energie über größere Amplituden führt auch zu einem Anstieg der Eigenspannungen. Genauso bewirkt eine höhere Härte des Hammerkopfes größere Eigenspannungen aufgrund der höheren Hertzschen Pressung und der geringeren Eindruckfläche. Wenn die Härte und der E-Modul des Hammerkopfes nicht deutlich größer als die des Werkstückes sind, kommt es zu einem Abflachen des Hammerkopfes beim Eindruck sowie zur plastischen Verformung des Hammerkopfes. Im Falle des Hammerkopfdurchmessers zeigte sich bei den Untersuchungen, dass wahrscheinlich für die Durchmesser 5 mm und 10 mm keine vollständige Plastifizierung der Randschicht erreicht werden konnte. Aus diesem Grund kann keine eindeutige Abhängigkeit festgestellt werden.

- **Verfestigung:** Das gewählte Material 42CrMo4 zeigt im Vergütungszustand nur sehr geringe Änderungen der Halbwertsbreiten und verhält sich bei einachsiger Beanspruchung zyklisch entfestigend [111]. Tendenziell können für hohe Vorschubgeschwindigkeiten, Bahnabstände und Hammerkopfhärten höhere Halbwertsbreiten, für höhere Amplituden und Hammerkopfdurchmesser geringere Halbwertsbreiten beobachtet werden.

Zum Vergleich der Schwingfestigkeit wurde zunächst für die drei Verfahren Piezopeening, Kugelstrahlen und Festwalzen eine Parameterstudie durchgeführt. Es wurde der Parametersatz mit der höchsten Lebensdauer bei axialer Beanspruchung mit einer Spannungsamplitude von 650 MPa bei $R=-1$ bestimmt. Da aufgrund der unterschiedlichen Lagerung keine direkte Übertragung der Piezopeeningparameter möglich war, musste auch für das Piezopeening eine neue Parameterstudie durchgeführt werden. Für die Parameter mit der höchsten mittleren Bruchlastspielzahl wurde jeweils eine Wöhlerkurve ermittelt. Bei der Parameterstudie des Piezopeening zeigte sich, dass bei diesem Verfahren der Ausgangszustand der Proben einen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis hat, da die Oberflächenstruktur nicht deutlich verändert, sondern nur eingeglättet wird. Der Vergleich der 5%-Bruchwahrscheinlichkeitskurven zeigt, dass alle drei Verfahren zu einer Steigerung der Lebensdauer und der Wechselfestigkeit führen. Die größte Steigerung wird jeweils durch das Piezopeening erreicht, die geringste im LCF Bereich durch Kugelstrahlen, im HCF Bereich durch das Festwalzen.

Im LCF Bereich kommt es zu einem deutlichen Eigenspannungsabbau, so dass vor allem Oberflächenrauheit und Verfestigungszustand für das Versagen ausschlaggebend sind. Kugelstrahlen führt zu einer erhöhten Oberflächenrauheit, die Halbwertsbreite ist im mittleren Bereich, so dass die Proben im Vergleich die geringste Lebensdauer haben. Die Rauheit wird durch Festwalzen und Piezopeening etwa ähnlich reduziert, allerdings ist die HWB nach dem Festwalzen geringer, so dass sich die Reihenfolge

damit begründen lässt.

Im HCF Bereich liegen fast ausschließlich Volumenrisse vor, die in größerer Tiefe liegen als der Nulldurchgang der Druckspannungen. Die Randschicht wurde von allen drei Verfahren soweit verstärkt, dass sie kaum noch versagensrelevant ist. In diesem Spannungsbereich sind die resultierenden Zugspannungen im Probeninneren ausschlaggebend, da sie die angelegte Lastspannung in Zugrichtung erhöhen. Aufgrund der durch das Festwalzen induzierten hohen Eigenspannungen und hohen Eindringtiefe führt das zu hohen Zugspannungen im Probeninneren und somit zur geringsten Steigerung der Lebensdauer. Die Eindringtiefe der Eigenspannungen nach dem Piezopeening ist mit 50-80 μm vergleichsweise gering und hat deshalb die höchste Steigerung der Wechselfestigkeit zur Folge.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Wohlfahrt: *Mechanische Oberflächenbehandlungen : Grundlagen, Bauteileigenschaften, Anwendungen*. Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [2] V. Schulze: *Modern mechanical surface treatment: states, stability, effects*. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [3] V. Schulze, F. Bleicher, Y.B. Groche, P. Guo und Y. Pyoun: *Surface Modification by Hammer Peening and Burnishing*. {CIRP} Annals - Manufacturing Technology, 65(2):809 – 832, 2016.
- [4] H. Hertz: *Über die Berührung Fester Elastischer Körper (on the Contact of Elastic Solids)*. Zeitschrift für reine und angewandte Mathematik, 92:156, 1881.
- [5] H. Wohlfahrt: *Eigenstressen*, Kapitel Ein Modell zur Vorhersage kugelstrahlbedingter Eigenstresszustände, Seiten 301–319. DGM-Informationsgesellschaft Oberursel, 1983.
- [6] Kenneth L. Johnson: *Contact mechanics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, repr. Auflage, 1994.
- [7] D. Tabor: *The hardness of solids*. Review of physics in technology, 1(3):145, 1970.
- [8] H. J. Böhmer: *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen und Dünnschichten, Bauteilen und Konstruktionen*, Kapitel Wälzverschleiß und -ermüdung von Bauteilen und Maßnahmen zu ihrer Einschränkung, Seiten 81–119. expert Verlag, 2010.
- [9] G.M. Hamilton und L.E. Goodman: *The stress field created by a circular sliding contact*. Trans. ASME J. Appl. Mech, 33:371, 1966.
- [10] B. Scholtes und E. Macherauch: *Auswirkungen mechanischer Randschichtverformungen auf das Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe*. Zeitschrift für Metallkunde, 77(5):322–337, 1986.

- [11] G. Pintaude, A. R. Hoechele und G. L. Cipriano: *Relation between strain hardening exponent of metals and residual profiles of deep spherical indentation*. Materials Science and Technology, 28(9-10):1051–1054, 2012.
- [12] S.T.S. Al-Hassani: *Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening*. In: A Niku-Lari (Herausgeber): *Proceedings of the Interantional Conference on Shot Peening 1*, Band 1, Seiten 583–602, 1981.
- [13] B. Hoffmann, O. Vöhringer und E. Macherauch: *Effect of compressive plastic deformation on mean lattice strains, dislocation densities and flow stresses of martensitically hardened steels*. Materials Science and Engineering: A, 319 - 321(0):299 – 303, 2001.
- [14] B. Scholtes und E. Macherauch: *Randschichtzustände von normalisiertem und vergütetem 42CrMo4 nach konsekutiven Kugelstrahlen- und Festwalzbehandlungen*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 23:388–394, 1992.
- [15] *ASTM B851: Standard specification for automated controlled shot peening of metallic articles prior to nickel, autocatalytic nickel, or chromium plating, or as final finish*.
- [16] H. Holzapfel, A. Wick, V. Schulze und O. Vöhringer: *Einfluss der Kugelstrahlparameter auf die Randschichteigenschaften von 42CrMo4*. Härtereitechnische Mitteilungen, 53(3):155–163, 1998.
- [17] P. Martin: *Beitrag zur Ermittlung der Einflußgrößen beim Kugelstrahlen durch Einzelkornversuche*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1980.
- [18] O. Vöhringer: *Changes in the state of the material by shot peening*. In: H Wohlfahrt, R Kopp und O Vöhringer (Herausgeber): *Shot peening, Proceedings of the International Conference on Shot Peening 3*, Band 3, Seiten 185–204. DGM.Informationsgesellschaft, 1987.
- [19] F. Burgahn, O. Voehringer und E. Macherauch: *Mikro-eigen Spannungszustände kugelgestrahlter Randschichten von 42CrMo4*. Zeitschrift für Metallkunde, 84(4):224–229, 1993.
- [20] *VDI-Richtlinie 3177, Oberflächen-Feinwalzen*, VDI-Verlag, 1983.
- [21] Goetz G. Feldmann: *Verbesserte mechanische Oberflächenverfestigung von Schaufeln an integral beschauften Hochdruckverdichterrotoren*. Dissertation, TU Cottbus, 2012.
- [22] B. Scholtes: *Eigen Spannungen in mechanisch randschichtverformten Werkstoff-*

- zuständen: Ursachen-Ermittlung-Bewertung.* DGM-Informationsgesellschaft, 1990.
- [23] B. Fuchsbauer: *Untersuchungen zur Schwingfestigkeitsoptimierung bauteilähnlicher Proben unterschiedlicher Größen durch Festwalzen.* Dissertation, TH Darmstadt, 1983.
- [24] I. Altenberger: *Mikrostrukturelle Untersuchungen mechanisch randschichtverfestigter Bereiche schwingend beanspruchter metallischer Werkstoffe.* Dissertation, Universität Kassel, 2000.
- [25] S. Gruber, G. Holzheimer und H. Naundorf: *Glatt- und Festwalzen an PKW Fahrgestell- und Antriebsbauteilen.* Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 15(2):41–45, 1984.
- [26] *Richtlinien zur Terminologie für das Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung "Maschinelles Oberflächenhämmern",* 2014.
- [27] R. Hessert, J. Bamberg, W. Satzger und T. Taxer: *Ultrasonic Impact Treatment for Surface Hardening of the Aero-Engine Material IN718.* In: *10th International Conference on Shot Peening*, 2008.
- [28] Y.S. Pyoun, C.M. Suh, I.H. Cho, H.T. Kim, I.S. Cho, Y.C. Lee, D.H. Park und J.S. Jung: *The Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology And It's Application To Improve Fatigue Strength, Wear Resistance.* In: *Conf Proc: ICSP-10 Tokyo, Japan*, 2008.
- [29] T. Wang, D. Wang, L. Huo und Y. Zhang: *Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT).* International Journal of Fatigue, 31(4):644 – 650, 2009.
- [30] E. S. Statnikov, O. V. Korolkov und V. N. Vityazev: *Physics and mechanism of ultrasonic impact.* Ultrasonics, 44:533–538, 2006.
- [31] E. Statnikov: *Effects and mechanisms of Ultrasonic Impact Treatment.* International Institute of Welding, XIII-2004-04, 2004.
- [32] M. Bousseau und T. Millot: *Fatigue life improvement of welded structures by UNP compared to TIG dressing.* International Institute of Welding, XIII-2125-06, 2006.
- [33] B. N. Mordyuk und G. I. Prokopenko: *Ultrasonic impact peening for the surface properties' management.* Journal of Sound and Vibration, 308(3-5):855–866, 2007, ISSN 0022-460X. 1st International Conference On Vibro-impact Systems, Loughborough, England, Jul 20-22, 2006.

- [34] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, L. Lobanov, V. Knysh und G. Propenko: *Fatigue life improvement of welded elements by Ultrasonic Peening*. International Institute of Welding, XIII-2010-04, 2004.
- [35] W. Gust, H.I. Prokopenko, A.V. Kozlov, B.N. Mordyuk und V.O. Abramov: *Ultrasonic shock treatment of welded joints*. Materials Science, 35(5):678–683, 2000.
- [36] B. N. Mordyuk und G. I. Prokopenko: *Fatigue life improvement of alpha-titanium by novel ultrasonically assisted technique*. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 437(2):396–405, 2006.
- [37] C. M. Suh, G. H. Song, M. S. Suh und Y. S. Pyoun: *Fatigue and mechanical characteristics of nano-structured tool steel by ultrasonic cold forging technology*. Materials Science and Engineering - A, 443:101–106, 2007.
- [38] A.T. Bozdana, N.N.Z. Gindy und H. Li: *Deep cold rolling with ultrasonic vibrations - a new mechanical surface enhancement technique*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45(6):713–718, 2005.
- [39] Y. L. Zhu, K. Wang, L. Li und Y. L. Huang: *Evaluation of an Ultrasound-Aided Deep Rolling Process for Anti-Fatigue Applications*. Journal of Materials Engineering and Performance, 18(8):1036–1040, 2009.
- [40] M. Cheng, D. Zhang, H. Chen und W. Qin: *Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread*. Journal of Materials Processing Technology, 214(11):2395 – 2401, 2014.
- [41] T. Wang, D. Wang, G. Liu, B. Gong und N. Song: *Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing*. Applied Surface Science, 255(5, Part 1):1824 – 1829, 2008.
- [42] J. Wied: *Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen*. Dissertation, TU Darmstadt, 2011.
- [43] *Patent DE 10 2009 01 720 A1: Kaltschmiedevorrichtung, Kaltschmiedeanlage und Verfahren zur Bearbeitung von Metalloberflächen und -werkstücken*, 2010.
- [44] *Patent DE102006033004.8: Klopfvorrichtung und -verfahren*, 2007.
- [45] G. Telljohann und S. Dannemeyer: *HiFIT - Technische Entwicklung und Anwendung*. Stahlbau, 78(9):622–626, 2009.
- [46] *Patent 102007060909B4: Fluidbetriebenes Bearbeitungswerkzeug*, 2013.
- [47] PITec GmbH: *Pneumatic Impact Treatment*. www.pitec-gmbh.com, 30.11.2014.

- [48] 3S engineering: *Pneumatisches Kaltschmiedesystem Forgefix*. www.3s-e.de, 30.11.2014.
- [49] M. Smida, B. Senk und V. Straehuber: *Tests and application of high frequency peening as a post weld treatment method*. *Stahlbau*, 78(9):650–661, 2009.
- [50] I. Weich und T. Ummenhofer: *Schweißnahtnachbehandlung in der Praxis*. *Stahlbau*, 77(10):728–733, 2008.
- [51] P. Gerster, F. Schäfers und M. Leitner: *Pneumatic Impact Treatment (PIT) - Application and Quality Assurance*. International Institute of Welding, XIII-WG2-138-13, 2013.
- [52] A. Amanov, Y. S. Pyoun, I. S. Cho, C. S. Lee und I. G. Park: *The Evaluation of the Micro-Tracks and Micro-Dimples on the Tribological Characteristics of Thrust Ball Bearings*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(1):701–705, 2011.
- [53] R. Pergler: *Klopfen fürs perfekte Finish*. *Werkzeug & Formenbau*, Seiten 30–32, 2012.
- [54] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, E. Kozeschnik, B. Adjassoho und H. Kaminski: *Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):375 – 378, 2012.
- [55] D. Trauth, F. Klocke, F. Schongen und A. Shirobokov: *Analyse und Modellierung der Schlagkraft beim elektro-dynamischen Festklopfen zur kraftbasierten Prozessauslegung*. *UTF Science*, III, 2013.
- [56] M. Neher, G. Telljohann und M. Grave: *Increase of the fatigue life of welded components by application of high frequency peening procedures*. *Stahlbau*, 82(4):282–288, 2013.
- [57] B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman, M.O. Iefimov und A.V. Sameljuk: *Enhanced fatigue durability of Al-6 Mg alloy by applying ultrasonic impact peening: Effects of surface hardening and reinforcement with AlCuFe quasicrystalline particles*. *Materials Science and Engineering: A*, 563(0):138 – 146, 2013.
- [58] C.A. Rodopoulos, A.Th. Kermanidis, E. Statnikov, V. Vityazev und O. Korolkov: *The Effect of Surface Engineering Treatments on the Fatigue Behavior of 2024-T351 Aluminum Alloy*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(1):30–34, 2007.
- [59] C. Lechner, F. Bleicher, C. Habersohn, C. Bauer und S. Goessinger: *The Use of Machine Hammer Peening Technology for Smoothing and Structuring of Surfaces*. *ANN DAAAM 2012 P23*, 23:331–337, 2012.

- [60] Y. S. Pyun, I. H. Cho, C. M. Suh, J. Park, J. Rogers, R. Kayumov und R. Murakami: *Reducing Production Loss by Prolonging Service Life of Rolling Mill Shear Pin with Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14(11):2027–2032, 2013.
- [61] B.N. Mordyuk, O.P. Karasevskaya, G.I. Prokopenko und N.I. Khripta: *Ultrafine-grained textured surface layer on Zr-1%Nb alloy produced by ultrasonic impact peening for enhanced corrosion resistance*. Surface and Coatings Technology, 210(0):54 – 61, 2012.
- [62] G. Ma und X. Ling: *Effect of Temperature and Chloride Content on the Stress Corrosion Cracking Susceptibility of 304 Stainless Steel Welded Joints Treated by Ultrasonic Impact Treatment*. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 135(5), 2013.
- [63] Y. Liu, X. Zhao und D. Wang: *Effective FE model to predict surface layer characteristics of ultrasonic surface rolling with experimental validation*. Materials Science and Technology, 30(6):627–636, 2014.
- [64] P. Peterko, C. Habersohn, C. Lechner, H. Kaminski, M. Jech und F. Bleicher: *Untersuchung des Einflusses des Schlagverdichtend auf die tribologischen Eigenschaften von Metalloberflächen*. ÖTG Symposium 2011 - Tribologie in Industrie und Forschung / Tribology in Industry and Research., 2011.
- [65] M. S. Suh, C. M. Suh und Y. S. Pyun: *Very high cycle fatigue characteristics of a chrome-molybdenum steel treated by ultrasonic nanocrystal surface modification technique*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 36(8):769–778, 2013.
- [66] M. Yasuoka, P. Wang, K. Zhang, Z. Qiu, K. Kusaka, Y. S. Pyoun und R. Murakami: *Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification*. Surface & Coatings Technology, 218:93–98, 2013.
- [67] P. Groche, M. Engels, C. Müller und K. Bauer: *Optimierung des Abrieb- und Verschleißverhaltens von Werkzeugoberflächen durch Randschichtverfestigung*. Abschlussbericht zum EFB-Projekt 23/203 AIF 14846N, 2010.
- [68] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, M. Obermair, F. Heindl und M. R. Ripoll: *Improving the tribological characteristics of tool and mould surfaces by machine hammer peening*. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 62(1):239–242, 2013.
- [69] M. Steitz, J. Scheil, C. Müller und P. Groche: *Effect of Process Parameters on*

- Surface Roughness in Hammer Peening and Deep Rolling*. Key Engineering Materials, 554-557:1887–1901, 2013.
- [70] A. Gill, A. Telang, S. R. Mannava, D. Qian, Y. S. Pyoun, H. Soyama und V. K. Vasudevan: *Comparison of mechanisms of advanced mechanical surface treatments in nickel-based superalloy*. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 576:346–355, 2013.
- [71] B. Adjassoho, E. Kozeschnik, C. Lechner, F. Bleicher, S. Goessinger und C. Bauer: *Induction of Residual Stresses and Increase of Surface Hardness by Machine Hammer Peening Technology*. Annals of DAAAM for 2012 & Proceeding of the 23rd International DAAAM Symposium, 23(1):697–703, 2012.
- [72] B. Adjassoho, E. Kozeschnik, C. Lechner, C. Habersohn, F. Bleicher, S. Gössinger, C. Bauer, F. Heindl, C. Tomastik und M. R. Rodriguez Ripoll: *Controlled Surface Treatment with Machine Hammer Peening*. In: *METAL 2013/22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic*, 2013.
- [73] J. Xie, Y. Zhu, Y. Huang, C. Bai und X. Ye: *Microstructure Characteristics of 30CrMnSiNi2A Steel After Ultrasound-Aided Deep Rolling*. Journal of Materials Engineering and Performance, 22(6):1642–1648, 2013.
- [74] A. Amanov, I.S. Cho, D.E. Kim und Y.S. Pyun: *Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification*. Surface & Coatings Technology, 207:135–142, 2012.
- [75] A. Cherif, Y. Pyoun und B. Scholtes: *Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) on Residual Stress State and Fatigue Strength of AISI 304*. Journal of Materials Engineering and Performance, 19(2):282–286, 2010.
- [76] H. Eslami-Chalandar, M. Bruns, T. Nitschke-Pagel und K. Dilger: *A measurement technique for inspection of material subsurface changes after mechanical surface treatment*. Stahlbau, 78(9):627–636, 2009.
- [77] I. Weich und T. Ummenhofer: *Effects of High-Frequency Peening Methods on the Surface Layers and the Fatigue Strength of Welded Details*. Materials and Manufacturing Processes, 26(2):288–293, 2011.
- [78] C.M. Branco, V. Infante und R. Baptista: *Fatigue behaviour of welded joints with cracks, repaired by hammer peening*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 27(9):785–798, 2004.
- [79] S. H. Han, J. W. Han, Y. Y. Nam und I. H. Cho: *Fatigue life improvement for cru-*

- ciform welded joint by mechanical surface treatment using hammer peening and ultrasonic nanocrystal surface modification**. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 32(7):573–579, 2009.
- [80] C. Miki und M. Tai: *Fatigue strength improvement of out-of-plane welded joints of steel girder under variable amplitude loading*. *Welding in the World*, 57(6):823–840, 2013.
- [81] M. Tai und C. Miki: *Improvement effects of fatigue strength by burr grinding and hammer peening under variable amplitude loading*. *Welding in the World*, 56(7-8):109–117, 2012.
- [82] D. Thibault, R. Simoneau, J. Lantaigne und J. L. Fihey: *Residual stresses induced by robotized hammer-peening*. In: S. Denis, T. Hanabusa, B. P. He, E. Mittemeijer, J. Nan, I. C. Noyan, B. Scholtes, K. Tanaka und K. W. Xu (Herausgeber): *Residual Stresses VII, Proceedings*, Band 490-491 der Reihe *Materials Science Forum*, Seiten 352–357, 2005. 7th International Conference on Residual Stresses (ICRS-7).
- [83] Y. Liu, L. Wang und D. Wang: *Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process*. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12):2106–2113, 2011.
- [84] F. Klocke, D. Trauth, F. Schongen und A. Shirobokov: *Analysis of friction between stainless steel sheets and machine hammer peened structured tool surfaces: experimental and numerical investigation of the lubricated interaction gap*. *Production Engineering*, 8(3):263–272, 2014.
- [85] C. M. Suh, M. H. Lee und Y. S. Pyoun: *Fatigue characteristics of skd-61 by ultrasonic nanocrystal surface modification technology under static load variation*. *International Journal of Modern Physics B*, 24(15-16, SI):2645–2650, 2010.
- [86] C. S. Lee, I. S. Cho, Y. S. Pyoun und I. G. Park: *Study of Inner Micro Cracks on Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels Using Ultrasonic Nano-Crystalline Surface Modification*. *Key Engineering Materials*, 462-463:979–984, 2011.
- [87] B.N. Mordyuk, Y.V. Milman, M.O. Iefimov, G.I. Prokopenko, V.V. Silberschmidt, M.I. Danylenko und A.V. Kotko: *Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel*. *Surface and Coatings Technology*, 202(19):4875 – 4883, 2008.
- [88] J. Berglund, M. Liljengren und B. G. Rosén: *On finishing of pressing die surfaces using machine hammer peening*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1-4):115–121, 2011.

- [89] J. Scheil, C. Müller, M. Steitz und P. Groche: *Influence of Process Parameters on Hardness in Hammer Peening an Deep Rolling*. Key Engineering Materials, 554-557:1819 – 1827, 2013.
- [90] Y. S. Pyoun, Q. Wang, M. K. Khan, R. Kayumov und J. Kim: *The concepts and properties of nanoskin materials and components created by ultrasonic nanocrystal surface modification*. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 6:527–533, 2012.
- [91] I. Weich, T. Ummenhofer, Th. Nitschke-Pagel, K. Dilger und H. Eslami: *Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments*. Welding in the World, 53(11-12):R322–R332, 2009.
- [92] R. Simoneau, D. Thibault und J. L. Fihey: *A of residual stress in hammer-peened, multi-pass steel welds A514 (S690Q) and S41500*. Welding in the World, 53(5-6):R124 – R134, 2009.
- [93] D. Ahn, Y. He, Z. Wan, I.S. Cho, C.S. Lee, I.G. Park, Y.S. Pyoun, J. Dong und K. Shin: *Effect of ultrasonic nano-crystalline surface modification on the microstructural evolution and mechanical properties of Al5052 alloy*. Surface and Interface Analysis, 44(11-12, SI):1415–1417, 2012.
- [94] P. Groche, M. Engels, M. Steitz, C. Mueller, J. Scheil und M. Heilmaier: *Potential of mechanical surface treatment for mould and die production*. International Journal of Materials Research, 103(6):783–789, 2012.
- [95] Y. S. Pyun, J. H. Kim, R. Kayumov, Y. He und K. S. Shin: *Restoration of Rolling-Contact-Fatigued Surfaces via Nanoskin Technology*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 13(9):6371–6375, 2013.
- [96] X. J. Cao, Y. S. Pyoun und R. Murakami: *Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification*. Applied Surface Science, 256(21):6297–6303, 2010.
- [97] R. T. Yekta, K. Ghahremani und S. Walbridge: *Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds*. International Journal of Fatigue, 55(0):245 – 256, 2013.
- [98] I. S. Cho, A. Amanov, D. G. Ahn, K. Shin, C. S. Lee, Y. S. Pyoun und I. G. Park: *Wear Behavior of Cu-Zn Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 11(7, SI):6443–6447, 2011.
- [99] A. Amanov, O.V. Penkov, Y.S. Pyun und D.E. Kim: *Effects of ultrasonic nanocry-*

- stalline surface modification on the tribological properties of AZ91D magnesium alloy*. Tribology International, 54:106–113, 2012.
- [100] K.Y. Zhang, Y.S. Pyoun, X.J. Cao, B. Wu und R. Murakami: *Fatigue properties of sus304 stainless steel after ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM)*. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 06:330–335, 2012.
- [101] Y. S. Pyun, C. M. Suh, T. Yamaguchi, J. S. Im, J. H. Kim, A. Amanov und J. H. Park: *Fatigue Characteristics of SAE52100 Steel via Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12(7):6089–6095, 2012.
- [102] C. L. Wang, Z. M. Wan, M. Zhao und J. T. Niu: *Enhancement on fatigue property of aluminum alloy welded joint by utilizing trailing peening*. Journal of Materials Science & Technology, 19(1):198–201, 2003.
- [103] L. Wagner: *Mechanical surface treatments on titanium alloys: fundamental mechanisms*. In: J.K. Gregory, H.J. Rack und Eylon D. (Herausgeber): *Proc. Symp. Surface Performance of Titanium, Cincinnati*, Seiten 199–215, 1997.
- [104] U. Krupp: *Fatigue crack propagation in metals and alloys : microstructural aspects and modelling concepts*. Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
- [105] E.R. de los Rios, A. Walley, M.T. Milan und G. Hammersley: *Fatigue crack initiation and propagation on shot-peened surfaces in {A316} stainless steel*. International Journal of Fatigue, 17(7):493 – 499, 1995.
- [106] A. Wick: *Randschichtzustand und Schwingfestigkeit von 42CrMo4 nach Kugelstrahlen unter Vorspannung und bei erhöhter Temperatur*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [107] G. Berstein und B. Fuchsbauer: *Festwalzen und Schwingfestigkeit*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 13(3):103–109, 1982.
- [108] A.F. Hassan und M.D. Bowman: *Fatigue crack repair of steel beams with tapered cover plate details*. Journal of Structural Engineering- ASCE, 122(11):1337–1346, 1996.
- [109] H. C. Yildirim und G. B. Marquis: *Overview of Fatigue Data for High Frequency Mechanical Impact Treated Welded Joints*. Welding in the World, 56(7-8):82–96, 2012.
- [110] P.J. Haagensen, E. Statnikov und L. Lopez-Martinez: *Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various me-*

- thods including ultrasonic impact treatment (UIT)*. International Institute of Welding, XIII-1748-98, 1998.
- [111] V. Schulze: *Die Auswirkungen kugelgestrahlter Randschichten auf das quasistatische sowie ein- und zweistufige zyklische Verformungsverhalten von vergütetem 42CrMo4*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1993.
- [112] E. Macherauch und H. Wohlfahrt: *Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe*, Kapitel Eigenspannungen und Ermüdung, Seiten 237–283. DGM-Informationsgesellschaft Oberursel, 1985.
- [113] D. Löhe, K. H. Lang und O. Vöhringer: *Handbook of residual stress and deformation of steel*, Kapitel Residual stresses and fatigue behaviour, Seiten 27–53. ASM International, 2002.
- [114] F. Lienert, J. Hoffmeister und V. Schulze: *Residual stress depth distribution after piezo peening of quenched and tempered AISI 4140*. Material Science Forum, 768-769:526–533, 2014.
- [115] F. Lienert, J. Hoffmeister, A. Erz und V. Schulze: *Influence of Piezo Peening on the Fatigue Strength of quenched and tempered AISI 4140*. In: *Proceedings of ICSP12*, Seiten 517–522, 2014.
- [116] A. Erz, F. Ambrosy, J. Hoffmeister, F. Zanger und V. Schulze: *Untersuchung des Lebensdauereinflusses nanokristalliner Randschichten bei schwingender Beanspruchung am Beispiel von spanend endbearbeitetem 42CrMo4 V450*. In: *Härterei Kongress*, 2013.
- [117] R. Menig: *Randschichtzustand, Eigenspannungsstabilität und Schwingfestigkeit von unterschiedlich wärmebehandeltem 42 CrMo 4 nach modifizierten Kugelstrahlbehandlungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [118] E. Macherauch und P. Müller: *Das $\sin^2\psi$ -Verfahren der röntgenographischen Spannungsmessung*. Zeitschrift für angewandte Physik, 13:305–312, 1961.
- [119] U. Wolfstieg: *Die Symmetrisierung unsymmetrischer Interferenzlinien mit Hilfe von Spezialblenden*. HTM Härterei-Techn Mitt, 31:23–27, 1976.
- [120] *DIN EN ISO 4288, Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*.
- [121] D. Dengel: *Die $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation - ein einfaches Verfahren zur grafischen und rechnerischen Auswertung geplanter Wöhlerversuche*. Journal of Materials Technology, 6(8):253–288, 1975.

- [122] F Lienert, J Hoffmeister und V Schulze: *Changes in surface layer after Piezo Peening of quenched and tempered AISI 4140*. In: *Proceedings of ICSP12*, Seiten 511–516, 2014.
- [123] K. H. Kloos und J. Adelman: *Schwingfestigkeitssteigerung durch Festwalzen*. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 19:15–23, 1988.
- [124] M. Zimmermann: *Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Randschichtausbildung beim Druckluft- und Ultraschallkugelstrahlen von IN718*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009.
- [125] R. Weingärtner, J. Hoffmeister und V. Schulze: *Generation and Determination of Compressive Residual Stresses of Short Penetration Depths*. In: *Materials Science Forum*, Band 768, Seiten 580–586. Trans. Tech. Publ., 2014.
- [126] Z. Song und K. Komvopoulos: *Elastic-plastic spherical indentation: Deformation regimes, evolution of plasticity, and hardening effect*. *Mechanics of Materials*, 61:91 – 100, 2013.
- [127] W. Zinn und B. Scholtes: *Influence of Shot Velocity and Shot Size on Almen Intensity and Residual Stress Depth Distributions*. In: *Proceedings of the International Conference on Shot Peening 9*, Band 5, Seiten 379–384, 2005.
- [128] R. Menig, L. Pintschovius, V. Schulze und O. Vöhringer: *Depth profiles of macro residual stresses in thin shot peened steel plates determined by X-ray and neutron diffraction*. *Scripta Materialia*, 45(8):977 – 983, 2001.