



Diplomarbeit

Potentiale von Machine Hammer Peening im Werkzeug- und Formenbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieur unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bleicher

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

Dipl.-Ing. Martin Obermair

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Alexander Raschendorfer, BSc.

0326189 (066 482)

Skodagasse 23/15

1080 Wien

Wien, im Mai 2017

Alexander Raschendorfer

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Mai 2017

Alexander Raschendorfer

Danksagung

Den Beginn meiner Diplomarbeit möchte ich nutzen, mich bei all jenen zu bedanken, die mich während der Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bleicher, der durch seine Betreuung und fachliche Unterstützung die Entstehung dieser Diplomarbeit ermöglicht hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Martin Obermair, der mich mit viel Geduld und unzähligen guten Ratschlägen betreut hat, herzlich bedanken.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei dem Team des Labors für Produktionstechnik, für die Unterstützung und Durchführung der Versuche.

Zuletzt gilt mein größter Dank meinen Eltern Gabriele und Helmut, sowie meinem Bruder Johannes, die mich in allen Lagen immer unterstützt und mir mein Studium an der TU Wien ermöglicht haben.

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit werden mechanische Verfahren zur Bearbeitung von Oberflächen vorgestellt und deren Wirkungsweise recherchiert. Anschließend wird ein Fokus auf Machine Hammer Peening (MHP) gelegt und dessen Eignung zur Oberflächenglättung und Härtesteigerung im Werkzeug- und Formenbau untersucht. Im Werkzeug- und Formenbau sind mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren essentielle Prozessschritte, da sie die äußeren Randschichten eines Werkstücks in Bezug auf Verschleiß, Reibung und statischer sowie dynamischer Festigkeit beeinflussen. MHP ist im Werkzeug- und Formenbau eine noch vergleichsweise wenig erforschte Methode. Ebenfalls wird auf die im Werkzeugbau typische Prozesskette eingegangen und die Möglichkeit, Prozessschritte durch MHP zu subventionieren diskutiert, um den Lebenszyklus und die Kosten eines Werkzeuges zu beeinflussen.

Mit der Zielsetzung MHP im Werkzeug- und Formenbau zu erproben, wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die im Rahmen des CORNET Forschungsprojekts „TEC- Total Efficiency Control“ stattgefunden haben. Die Versuche werden mit Prozessparameter, Bearbeitungsstrategie, Maschinendaten und abschließend Messdaten aufbereitet. Materialversuche wurden an klassischen Werkzeugbaustählen 1.2767 (45NiCrMo16) und 1.2842 (90MnCrV8) durchgeführt. Weiters wird MHP auf Stanzwerkzeuge angewandt, um die Eignung in diesem Bereich zu erproben. Zuletzt wird ein Anwendungsfall für die Möglichkeit des Refittings betrachtet. Hierbei wird anhand einer verschlissenen Aluminium-Druckgussform erprobt, ob aufgetretene Verschleißmerkmale mit MHP soweit reduziert und ausgemerzt werden können, um das Werkzeug wieder in der Produktion einzusetzen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, den Lebenszyklus von Werkzeugen zu verlängern.

Abstract

Mechanical surface finishing processes are essential parts of the tool and mould making industry. The outer surface of a workpiece is highly influenced by the finishing process in terms of wear, friction and static as well as dynamic strength. Machine Hammer Peening (MHP) is a so far not widely spread application in the tool and mould making industry. Several mechanical surface finishing processes are presented in this thesis, focussing on MHP, researching its principle of operation and its suitability for flattening and increasing the hardness of surfaces. The typical process chain in the tool making industry is examined and the possibility of substituting parts of it by implementing MHP into the chain, following the goal to influence the lifetime and life-cycle costs of tools.

The goal is to test MHP in the tool and mould making, therefore a series of experiments has been conducted during the CORNET research project "TEC-Total Efficiency Control". The tests are accurately described with process data, tooling strategy, used machine data and finally the measurement results. The common tool making steels 1.2767 (45NiCrMo16) and 1.2842 (90MnCrV8) were used for material tests. A series of experiments was performed with stamping tools to test MHP's potential. Last but not least MHP was used for a Refitting use case. A worn out aluminium die casting mould with several fire cracks has been worked with MHP to try to flatten out the cracks so the tool can be reinstated in the production. This usage of MHP allows the enhancement of the tool's life cycle.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Stand der Technik	6
2.1 Einteilung Oberflächenbehandlungsverfahren	6
2.2 Maschinelle mechanische Oberflächenbearbeitung	7
2.2.1 Laser Shock Peening	9
2.2.2 Water Cavitation Peening	10
2.2.3 Shot Peening	11
2.2.4 Roller Burnishing	12
2.3 Machine Hammer Peening	13
2.4 Aluminium-Druckguss	17
2.5 Prozessketten des Werkzeug- und Formenbaus	21
3 Zielsetzung der Arbeit	25
4 Wirkmechanismen	26
4.1 Kaltumformmechanismen und Aufbau von Metallen	26
4.2 Eigenspannungen	29
4.3 Kugeleintritt	30
4.4 Auswirkung von Einschlaggeometrie und Schlagdistanz	33
4.5 Materialverteilung durch die MHP-Bearbeitung	34
4.6 Vergleich mit materialabtragenden Verfahren	44
5 Potentiale von MHP im Werkzeugbau	49
5.1 Ziel der Versuche	49
5.2 Materialversuche an einem Referenzwerkzeug	50
5.3 Versuche an Stanzwerkzeugen	56
5.4 Diskussion der Ergebnisse	62
6 Potentiale von MHP im Formenbau	63
6.1 Versuchsaufbau	63
6.1.1 Machine-Hammer-Peening-Aktuator	64
6.1.2 Werkzeugmaschine	64
6.2 Versuche Aluminium-Druckgusswerkzeug	64

6.2.1	Ziel der Versuche.....	64
6.2.2	Werkstück.....	66
6.2.3	Versuchsdurchführung.....	67
6.2.4	Auswertung.....	69
6.3	Diskussion der Ergebnisse.....	69
7	Zusammenfassung und Ausblick	70
8	Literaturverzeichnis	71
9	Abbildungsverzeichnis.....	75
10	Tabellenverzeichnis	77

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control, rechnergestützte numerische Steuerung
HM-Kugel	Hartmetallkugel
HRC	Härte nach Rockwell
LSP	Laser Shock Peening
MHP	Machine Hammer Peening
IFT	Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik
NC	Numerical Control, Numerische Steuerung
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition, Beschichtungsverfahren
PVD	Physical Vapour Deposition, Beschichtungsverfahren
TEC	Total Efficiency Control
TIV	Through Indenter Viewing - Härteprüfverfahren

1 Einleitung

Ein Kernthema des Maschinenbaus ist der Werkzeug- und Formenbau. Unter Werkzeugbau wird die häufig komplexe und kostenintensive Herstellung von Werkzeugen oder Vorrichtungen verstanden, die für einen Fertigungstechnischen Prozess verwendet werden. Der Formenbau beschäftigt sich mit der Herstellung von Formen für Gussverfahren in der Kunststoff und Metall Verarbeitung.

Die internationale Wettbewerbsfähigkeit und die Entwicklung der europäischen Industrie hängen stark von der Leistungsfähigkeit des Werkzeug- und Formenbaus ab. Werkzeuge stellen in jedem Produktionssystem einen wesentlichen Bestandteil dar und haben einen großen Einfluss auf die Investitionskosten und Qualitätsmerkmale des Produktes. Es ist daher im Interesse der Werkzeugbauindustrie durch qualitativ hochwertige Werkzeuge, durch effizientere Prozessketten und durch nachhaltiges Handeln auf die steigenden Kundenbedürfnisse einzugehen.

Die Optimierung des Lebenszyklus von Werkzeugen kann einen integralen Bestandteil erhöhter Ressourcen- und Kosteneffizienz sein, ohne dabei die Qualität zu vernachlässigen. Die Lebensdauer von Werkzeugen zu verlängern, indem qualitätsmildernde Abnutzungsspuren ausgebessert werden, um das Werkzeug wieder für den Einsatz aufzubereiten, ist ein mögliches Anwendungsgebiet von Machine Hammer Peening.

Die Verwendung von Machine Hammer Peening im Werkzeugbau ist eine noch nicht häufig untersuchte Möglichkeit, um die Effizienz von Werkzeugen zu steigern und deren Einsatzgebiet zu optimieren. Die damit einhergehende Änderung der Prozesskette wird im Zuge dieser Arbeit dabei ebenso untersucht, wie die Auswirkung von MHP auf die bearbeiteten Werkzeuge. Durch die Bearbeitung von Werkzeugen werden diese selbst zu Werkstücken.

Die Arbeit beginnt mit einem Theorieteil über Oberflächenbearbeitungsverfahren und den dazugehörigen technischen Grundlagen, gefolgt von einer Verfahrens- und Prozessbeschreibung des MHP. Im Rahmen des CORNET Projekts „TEC-Total Efficiency Control“ wurden Versuche an Materialien und Werkzeugen durchgeführt, um einen effizienten Einsatz von MHP in unterschiedlichen Anwendungsbereichen des Werkzeug- und Formenbaus zu erproben. Die Zielsetzung war eine Prozesskettenverkürzung für Werkzeugbauer, unter Einbeziehung des Werkzeuglebenszyklus des Werkzeugs, von der Konstruktion bis zur Entsorgung. Im Zuge dessen wurden Versuche an Stanzwerkzeugen und an Materialien für den Spritzguss durchgeführt, um die Eignung von MHP im Werkzeugbau zu testen. Im finalen Praxisteil dieser Arbeit wird auf die Anwendung von MHP auf eine Aluminium-Druckgussform eingegangen. Herausforderung hierbei war die Nutzung von MHP an

einer ausgemusterten Druckgussform. Diese hatte diverse Brandrisse, die zu Qualitätsmängeln am Werkstück führten. Die Glättung dieser Brandrisse um die Form in weiterer Folge wieder für die Produktion zu verwenden und eine damit verbundene Lebenszyklusverlängerung war Ziel dieser Bearbeitung.

2 Stand der Technik

2.1 Einteilung Oberflächenbehandlungsverfahren

Zur Optimierung produzierender sowie zur Effizienzsteigerung von Neuwerkzeugen können Oberflächenbehandlungsverfahren entscheidend beitragen. Ziel ist es dabei, die Qualität von Endprodukten über einen möglichst langen Fertigungszeitraum sicherzustellen (vgl. [1]). Nach Vetter erfolgt die Einteilung grob in sechs Gruppen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

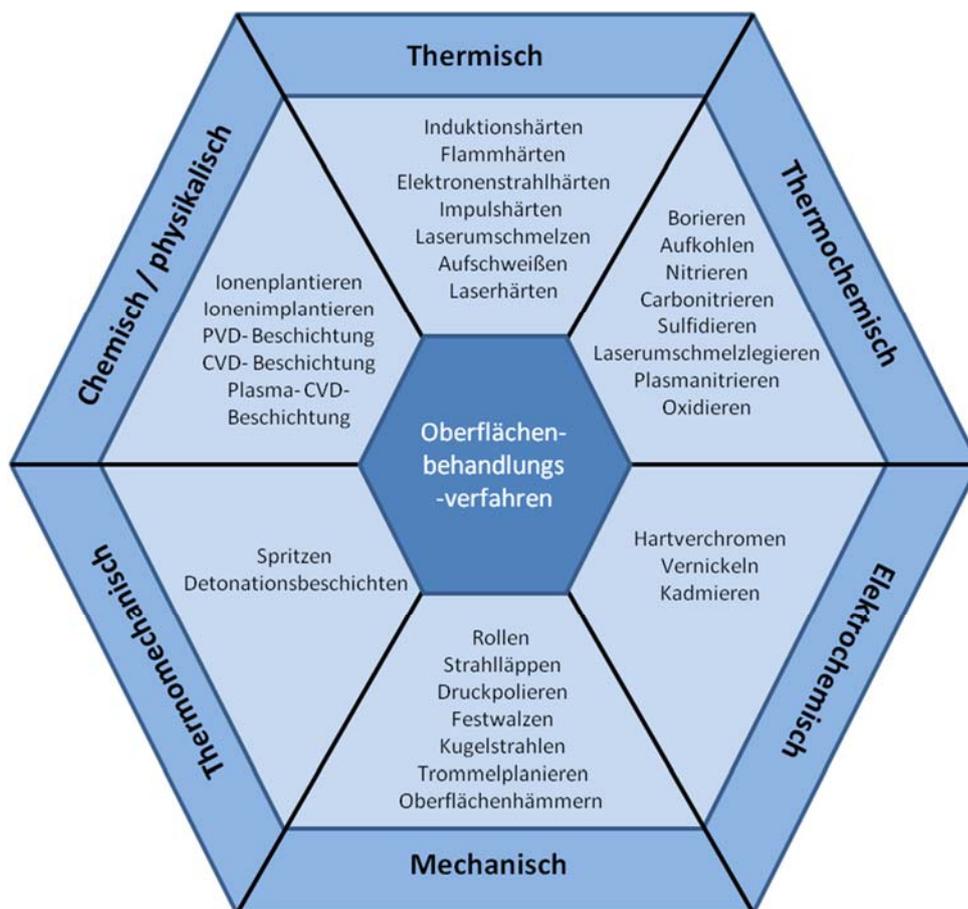


Abbildung 1: Oberflächenbeschichtungsverfahren (vgl. [1])

Thermische Härteverfahren erzeugen durch partielle Erwärmung der Oberfläche auf Härtetemperatur und anschließende Abkühlung martensitische Randschichten mit Härten über 50 HRC. Dies geschieht hauptsächlich durch den Kohlenstoffgehalt im Werkzeugstahl. Maß- und Formänderungen, die von der Bauteilstabilität abhängig sind, können durch die Gefügewandlung nicht gänzlich vermieden werden. Mittlerweile ist vielen Anwendern dieser Verfahren durch Schadensfälle bewusst, dass die Funktionsfähigkeit des Werkzeuges nicht entscheidend von der theoretisch maximal möglichen Randschicht Härte abhängt. Die Herstellung einer niedrigeren

Härte von 2 bis 4 HRC am Bauteil, anstatt der theoretisch höchstmöglichen, verhindert das Risiko von Rissbildung oder Abplatzungen und sichert gleichzeitig eine hohe Qualität und Lebensdauer der Form (vgl. [1]).

Thermochemische Verfahren sind gegenüber thermischen Verfahren zusätzlich durch ein Diffundieren von Kohlenstoff, Stickstoff etc. gekennzeichnet. Diese Elemente können durch verschiedene Behandlungsmedien zugeführt werden. In unterschiedlichen Verfahren kommen Feststoffe (Pulver, Granulate, etc.) zur Anwendung. Alternativ wird durch elektrische Entladung (Glimmen) ein Plasma erzeugt, welches die verwendeten Gase in einen reaktionsfähigen Zustand versetzt (vgl. [1]).

Die elektrochemischen bzw. chemischen Verfahren *Hartverchromen* und *chemisch Nickel* dienen dem Verschleiß- und Korrosionsschutz. Anwendungstechnisch haben sie den Vorteil einer niedrigen Prozesstemperatur von circa 60°C beziehungsweise 80°C, sodass ein Werkzeugverzug ausgeschlossen werden kann. Auch eine Kombination beider Verfahren kommt in der Praxis immer häufiger zur Anwendung (vgl. [1]).

Für kunststoffverarbeitende Werkzeuge bieten das PACVD-Verfahren und das PVD-Verfahren eine zukunftsweisende Beschichtungslösung. Die Verfahrenstemperaturen von maximal 550°C sind vergleichsweise niedrig. Es existiert für nahezu alle gängigen Kunststoffformenstähle eine Vielzahl von Schichtstoffen, die zur Auswahl stehen (vgl. [1]).

Das folgende Subkapitel zeigt einen Überblick über die maschinellen mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren und geht in weiterer Folge im Rahmen des Kapitels auf das Verfahren des Machine Hammer Peenings ein, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum Einsatz gekommen ist.

2.2 Maschinelle mechanische Oberflächenbearbeitung

Die Oberfläche von Bauteilen ist oftmals der höchst beanspruchte Teil einer Komponente. Mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren können daher adäquate Mittel sein, um die Randschicht zu stärken (vgl. [2]).

Maschinelle mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren lassen sich, wie in Abbildung 2 von Bleicher et al. beschrieben, in Verfahren mit direktem oder indirektem Prozess unterscheiden. Bei einem direkten Prozess wird die Oberfläche des Werkstücks durch das direkte Einwirken eines Werkzeugs verändert. Dem gegenüber wird bei einem indirekten Prozess die Oberflächenbearbeitung des Werkstücks über ein Zwischenmedium bewerkstelligt. So werden beispielsweise beim Laser Shock Processing lediglich die Schockwellen ausgenutzt und nicht die erzeugte Wärme. Die

direkten Prozesse gliedern sich ferner in stochastische und deterministische Prozesse. Während bei deterministischen Prozessen eine Oberfläche durch eine eindeutig definierte Einwirkung des Werkzeugs verändert wird, erfolgt bei stochastischen Prozessen, wie Kugelstrahlen (Shot Peening) eine im Vorhinein nicht eindeutig bestimmbare Einwirkung des Werkzeugs. Deterministische Prozesse unterscheiden sich durch kontrollierte, gleichförmige Oberflächenmodifikation von den stochastischen, bei denen eine gleichmäßige Bearbeitung nicht garantiert werden kann (vgl. [3]).

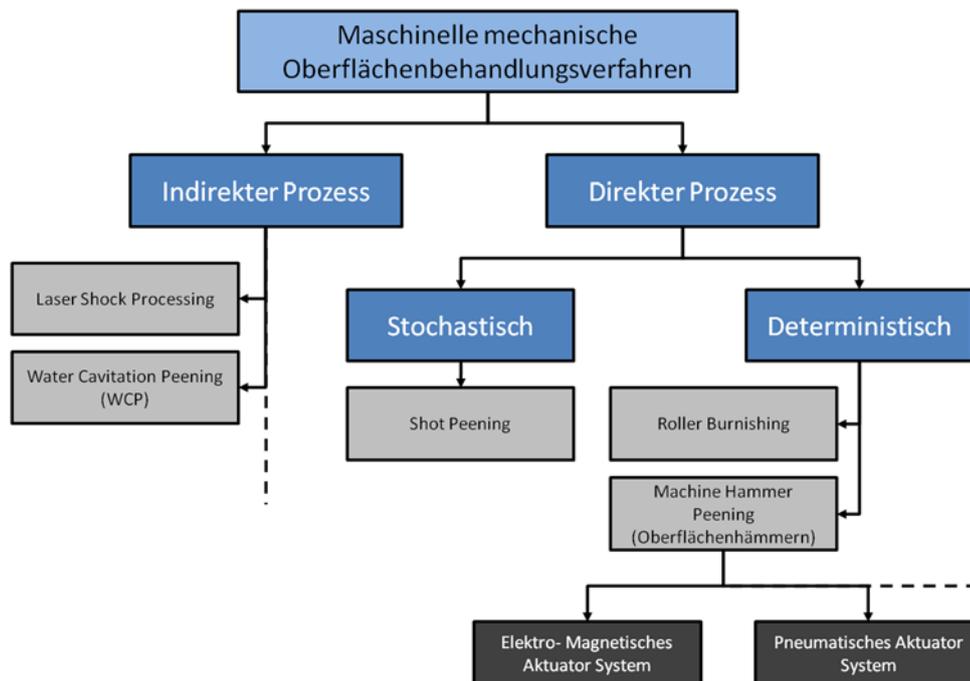


Abbildung 2: Maschinelle Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung (vgl. [4])

Die Randschichtenoptimierung metallischer Bauteile hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Das Ziel der Optimierung ist dabei die Beanspruchbarkeit zu erhöhen, die Lebensdauer zu verlängern und die Sicherheit gegen Bauteilversagen zu erhöhen. Bei Komponenten, die Spannungs- oder Reibkorrosion ausgesetzt sind, haben sich mechanische Oberflächenbearbeitungsmethoden als die Methoden der Wahl erwiesen. Die Wirkungen dieser Methoden betreffen die randnahe inhomogene Plastizierung und die damit verbundene Veränderung der randnahen Werkstoffzustände. Diese Verfahren liefern beträchtliche Festigkeits- beziehungsweise Lebensdauersteigerungen und leisten dadurch einen wichtigen Beitrag zum ressourceneffizienten Leichtbau (vgl. [5]).

Beim Festwalzen ist die Dauerfestigkeitssteigerung das Ziel. Dies wird im Wesentlichen durch drei Faktoren erzielt. Die Beseitigung von Mikrokerben auf der Werkstückoberfläche, die Kaltverfestigung der Randzone und das Einbringen von

Druckeigenspannungen. Die Technologie wird typischerweise für die Bearbeitung von Naben und Achsschenkeln, abgesetzten Wellen und Kurbelwellen eingesetzt. Neben Einzweck- und Sondermaschinen, die etwa für das Festwalzen von Kurbelwellen erforderlich sind, stehen zum Festwalzen eine Reihe von Sonderwerkzeugen zur Verfügung. Diese bieten bei kleiner Baugröße den Vorteil, dass sie in allen herkömmlichen Werkzeugmaschinen eingespannt werden können (vgl. [6]).

Die Nachfrage nach höherer Oberflächen- Integrität und größerer funktioneller Leistung von gefertigten Bauteilen hat sich als treibende Kraft von neuen Produktionsmethoden herausgestellt. Machine Hammer Peening ist eines dieser neueren Verfahren der mechanischen Oberflächenbearbeitung. Der Prozess basiert auf einer oszillierenden Bewegung eines axial geführten Werkzeugs (vgl. [4]).

2.2.1 Laser Shock Peening

Laser Shock Peening ist eine Technologie zur Bearbeitung von Materialien mittels Laser, die Druckeigenspannungen in die Oberfläche einbringen kann. Der Prozess führt zu erhöhter Bauteillebensdauer und Korrosionsbeständigkeit. Die Druckeigenspannungen werden durch den Druck der schnellen Expansion des Plasmastrahls erzeugt, der durch die Interaktion des Laserstrahls mit den ersten Atomschichten entsteht. Üblicherweise wird zum Schutz des bearbeiteten Werkstücks eine opake Beschichtung auf das Werkstück aufgetragen, die im Laufe des Prozesses durch den Laser verdampft wird. Durch die Verdampfung der Beschichtung entsteht Plasma, dessen Expansion durch ein transparentes Medium, das als Eindämmung fungiert und in dessen Bereich ein höherer Oberflächendruck wirkt, eingeschränkt wird (vgl. [7]).

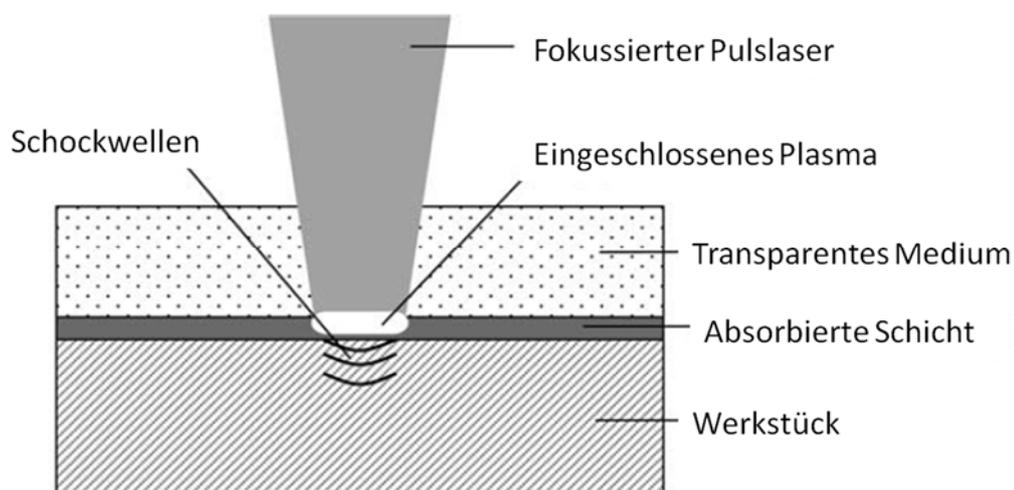


Abbildung 3: Schematische Darstellung von Laser Shock Peening nach [3]

Die eingebrachten Druckeigenstressungen variieren ja nach verwendetem Material und den Verfahrensparametern, reichen aber generell von 0,5 bis über 1mm unter die Oberfläche.

Ein Vorteil des Laser Shock Peenings ist, dass der Puls laser in Echtzeit überwacht und eingestellt werden kann. Durch Computersteuerungen kann die Energie pro Puls gemessen und der Position am Bauteil zugeordnet werden. Ist die Energie unter ein gewisses Niveau gerutscht, kann die Stelle sofort nachgebessert werden. Zusätzlich ist es möglich mit LSP Stellen zu bearbeiten, die mit anderen Oberflächenbearbeitungsmechanismen nicht bearbeitbar sind. Ist eine Stelle sichtbar, ist sie mittels LSP bearbeitbar (vgl. [3]).

2.2.2 Water Cavitation Peening

Water Cavitation Peening ist eine neuere indirekte mechanische Oberflächenbehandlungstechnik, die entwickelt wurde, um die Abnutzung zu reduzieren und den Bauteil durch Einbringen von Eigenspannungen an der Oberfläche zu stärken. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung von Water Cavitation Peening. Das Bauteil befindet sich dabei vollständig unter Wasser. Durch eine Strahldüse wird das Wasser unter Hochdruck auf den Bauteil gespritzt, dies führt zu Kavitationsblasen, die an der Bauteiloberfläche kollabieren und einen Aufpralleffekt erzeugen, der mit dem des Kugelstrahlens vergleichbar ist. Die Oberfläche des bearbeiteten Bauteils ist, verglichen mit der Bearbeitung durch Kugelstrahlen, wesentlich glatter und unversehrter, da es keine tatsächliche Kollision gibt. Der Bearbeitungseffekt entsteht durch die aus den kollabierenden Kavitationsblasen entstehenden Schockwellen (vgl. [8]). Durch den starken Wirbel entstehen starke Schubkräfte und Turbulenzen. Der Druck in der Region fällt auf den Verdampfungsdruck, der die Kavitationsblasen erzeugt. Während die Blasen sich im Strudel Richtung Bauteil bewegen, geht der Druck wieder auf das normale Niveau zurück und die Kavitationsblasen kollabieren. Dies erzeugt Schockwellen von bis zu 1 GPa (vgl. [9]).

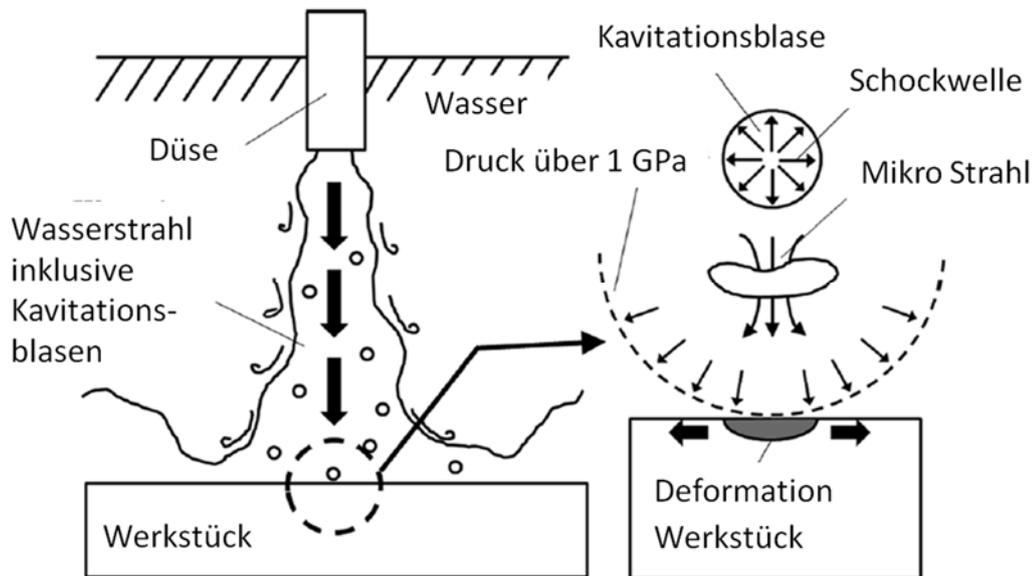


Abbildung 4: Schematische Darstellung von Water Cavitation Peening (vgl. [9])

2.2.3 Shot Peening

Beim Shot Peening (Kugelstrahlen) wird mittels Druckluft oder eines Schleuderrads kleines kugelförmiges Strahlgut mit hoher Geschwindigkeit gegen die zu behandelnde Oberfläche geschleudert. Durch den Aufprall mit hoher Geschwindigkeit und die Umwandlung von kinetischer Energie in plastische Verformung führt dies zum Einbringen von Druckeigenspannungen in die Oberfläche (vgl. [3]). Als Strahlmittel kommen entweder hinreichend harte metallische Teilchen, wie Stahl, Stahlguss, Draht und Hartguss, oder nichtmetallische Teilchen, wie Glas, Korund, Keramik und Aluminiumoxid, zum Einsatz. Die Beschleunigung des Strahlmittels erfolgt meistens pneumatisch in Druckluftanlagen oder in Schleuderradstrahlanlagen unter Ausnutzung von Fliehkräften (vgl. [10]). Eine Prinzipdarstellung einer pneumatischen und Schleuderradstrahlanlage ist in Abbildung 5 zu sehen.

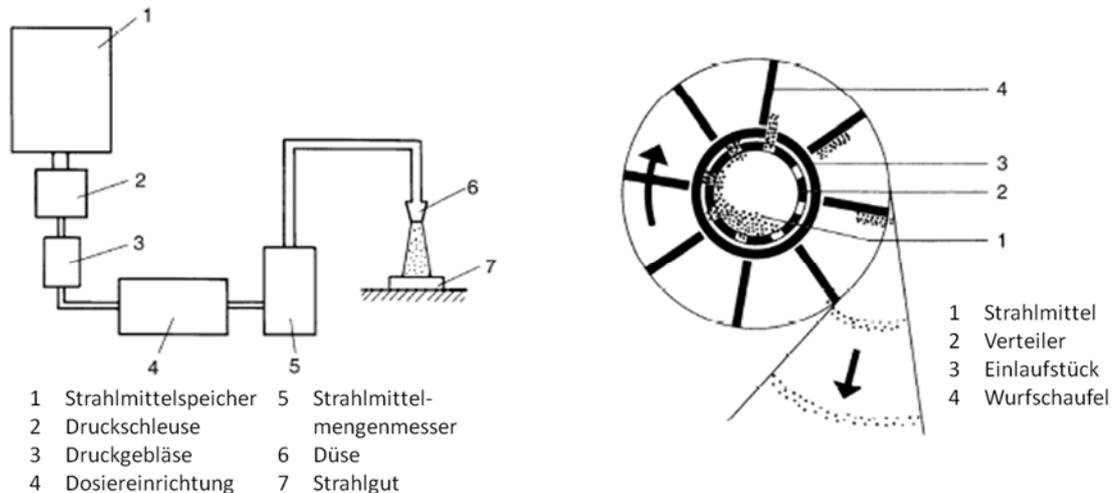


Abbildung 5: Druckluft- (links) und Schleuderradstrahlanlage (rechts) (vgl. [10])

Strahlbehandlungen finden vielfältige Anwendungen, da sie zur Veränderung von Oberflächenfeingestaltungen, zur Erhöhung der Dauer-, Verschleiß- und Wechselfestigkeit sowie der Korrosionsbeständigkeit führen. Weiters wird Kugelstrahlen zum Putzen von Gussteilen, zum Entzundern sowie zum Umformen und Richten ausgenutzt. Eine Schleuderradmaschine ermöglicht einen hohen Durchsatz der zu strahlenden Werkstücke und damit das wirtschaftliche Strahlen großer Flächen. Dies macht Kugelstrahlen zu einem vergleichsweise günstigen Verfahren, um die Lebensdauer zu verlängern und Druckeigenspannungen in die Randschichten einzubringen. Weiters zeichnet sich das Verfahren durch eine weitgehende Unabhängigkeit gegenüber Bauteilgröße und Geometrie aus (vgl. [3], [10]).

2.2.4 Roller Burnishing

Beim Festwalzen ist das Ziel die Dauerfestigkeitssteigerung. Dies wird im Wesentlichen durch drei Faktoren erreicht. Die Beseitigung von Mikrokerben auf der Werkstückoberfläche, die Kaltverfestigung der Randzone und das Einbringen von Druckeigenspannungen. Die Technologie wird typischerweise für die Bearbeitung von Naben und Achsschenkeln, abgesetzten Wellen und Kurbelwellen eingesetzt. Neben Einzweck- und Sondermaschinen, die etwa für das Festwalzen von Kurbelwellen erforderlich sind, steht zum Festwalzen eine Reihe von Sonderwerkzeugen zur Verfügung. Diese bieten bei kleiner Baugröße den Vorteil, dass sie in allen herkömmlichen Werkzeugmaschinen eingespannt werden können (vgl. [6]).

Um den Wälzkörper gegen das Werkstück zu drücken, gibt es eine Reihe von Vorrichtungen in der Literatur. Eine Auswahl davon ist in Abbildung 6 zu sehen, wobei die Methode (Abbildung 6a), die hydrostatischen Druck, nutzt um das Werkzeug gegen

das Werkstück zu drücken, die wohl am häufigsten eingesetzt ist. Weitere Vorteile dieser Methode sind die geringe Zahl an Kontaktstellen. Dies führt zu minimierter Abnutzung und Reibung. Die hydraulische Flüssigkeit kann außerdem als Schmiermittel verwendet werden. Abbildung 6b und e zeigen Vorrichtungen, die auf einer elastischen Kraft basieren. Eine dritte Gruppe verwendet indirekte Lagerungen der Wälzkugel. Hierbei wird der Rollkörper in einem Käfig geführt und durch innere Rollen gelagert (vgl. [11]).

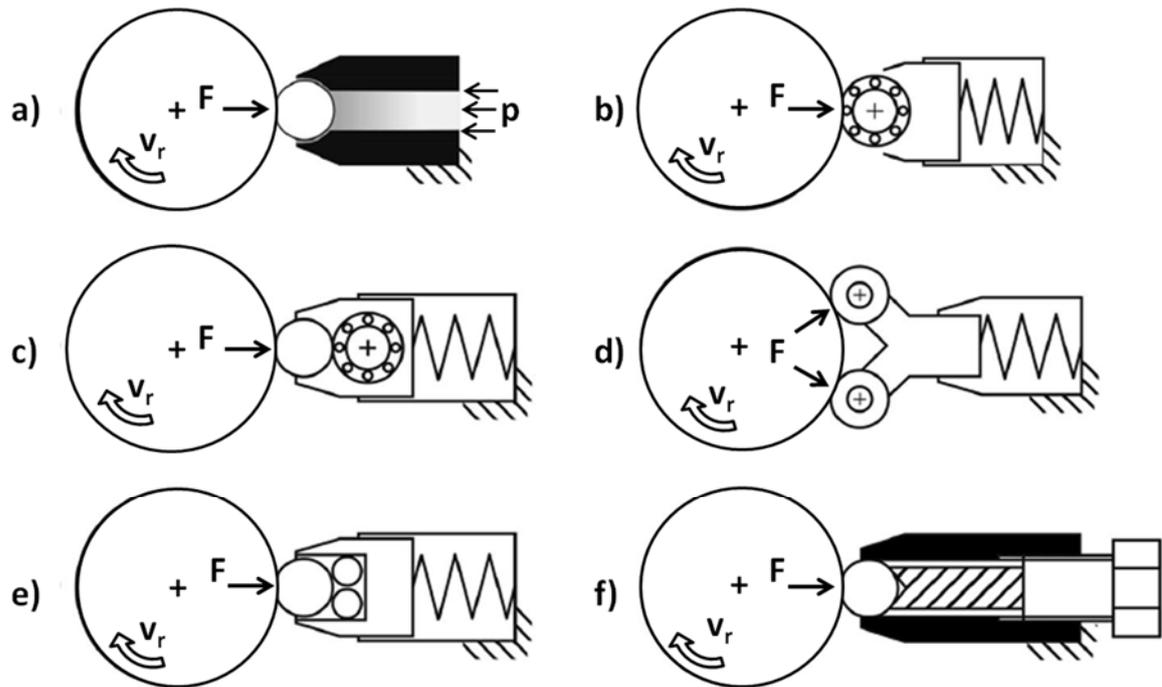


Abbildung 6: Auswahl von Deep Rolling Werkzeug Prinzipien (vgl. [11])

Das eigentliche Ziel von Deep-Rolling ist es, Eigenspannungen einzubringen. Nebenbei hat die Bearbeitung auch einen erheblichen Effekt auf die Oberflächenqualität des Werkstücks. So schreibt Grzesik und Žak in [12], dass die Kombination aus Hartdrehen und Deep Rolling zu gleichen Ergebnissen führt wie durch Schleifen, mit dem Vorteil der wesentlich höheren Wirtschaftlichkeit.

2.3 Machine Hammer Peening

Im Jahr 1996 startete das im Jahr zuvor gegründete Unternehmen KWL (Konstruktion und Werkzeugbau Löcker) mit der Entwicklung eines Systems, welches den bisherigen manuellen Polierprozess von Werkzeugoberflächen maschinell ersetzen sollte. Aus diesem Vorhaben entstand das Accurapuls-Klopfsystem. Neben der ursprünglich angestrebten Oberflächenglättung wurden mit einer zusätzlichen Reduzierung der

Oberflächenrauheit, eine deutliche Erhöhung der Randschichtenhärte und der Einbringung von Druckeigenstressungen weitere positive Werkzeugeigenschaften hervorgebracht (vgl. [13]).

Dieses Klopferfahren verwendet eine elektromechanische Klopfervorrichtung. Durch eine oszillierende Bewegung eines axial geführten Stößels mit meist kugelförmiger Spitze wird auf eine Werkstückoberfläche eingewirkt. Der Schlagkopf wird an einem Träger befestigt, der einen ferromagnetischen Teil besitzt. Durch ein Magnetfeld wird der Träger des Schlagkopfes in einer definierten Ruhelage gehalten. Am Träger des Schlagkopfes befindet sich eine Spule, die sich in einem Magnetfeld befindet und mit einem Wechsel- oder gepulsten Strom durchflossen wird. Dies versetzt den Schlagkopf mit definierter Schlagfrequenz, Schlagamplitude und Nulldurchgang in Schwingung (vgl. [14]). Abbildung 7 zeigt den elektromechanischen Aktuator, der auch dem Labor für Produktionstechnik zur Verfügung steht. Dieser kann über herkömmliche Werkzeugaufnahmesysteme (SK, HSK) in jede Werkzeugmaschine implementiert werden.

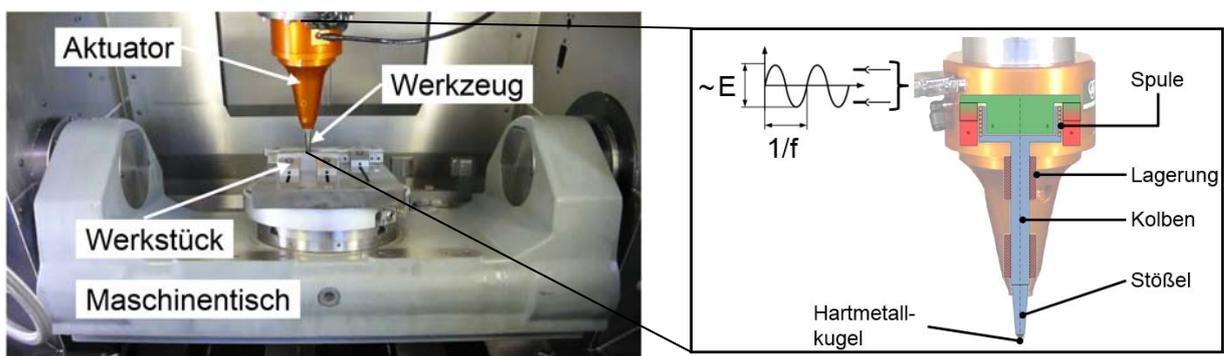


Abbildung 7: Aktuator in Werkzeugmaschine und schematische Darstellung

Zum Zweck der Bahngenerierung zur Bearbeitung auf Werkzeugmaschinen stellt die Firma Accurapuls eine speziell entwickelte CAM-Software zur Verfügung. Ausgehend von 3D-Daten aus verschiedenen CAD-Systemen wird die Werkstückgeometrie in das System importiert und auf dieser wird mittels eigener mathematischer Modelle die spezifische Bearbeitungsbahn erzeugt. Anschließend wird ein NC/CNC-Code generiert mit dem drei-, beziehungsweise fünfschneidige Werkzeugmaschinen gesteuert werden können (vgl. [15]).

Neben dem im Zuge dieser Arbeit verwendeten elektromechanischen Aktuatorssystem bietet der Markt auch piezoelektrische und pneumatische Systeme an.

Die Daimler AG hat ein piezoelektrisches Verfahren als Kaltschmiedevorrichtung patentiert. Dieses System umfasst eine Hubeinrichtung, die an einem Ende in einem

Lagerelement gelagert ist und am gegenüberliegenden Ende einen Schlagkopf besitzt. In der Hubeinrichtung ist ein Betätigungsmittel angeordnet, welches zur Ausführung der Hübe des Schlagkopfes dient. Das Betätigungsmittel umfasst einen Piezostapel-Aktuator, der mit einem Feder-Masse-System operativ gekoppelt ist. Eingesetzt wird das Verfahren zum Bearbeiten von Metalloberflächen (vgl. [16]). Seit 2012 sind auch pneumatische Aktuatoren am Markt erhältlich (z.B.: Modell FORGEfix des Unternehmens 3S-Engineering). In [17] wird ein, ebenfalls von Daimler, entwickelter pneumatischer Aktuator beschrieben. Das eigentliche Werkzeug ist hierbei ein Pneumatikhammer mit Schlagkopf. Dieser ist in einem Hohlkolbenelement angeordnet, welches verschiebbar in einem Gehäuse gelagert ist. Das Gesamtsystem wird durch die Beaufschlagung des Hohlkolbens mittels Druckluft vorgespannt. Die durch den Schlagkopf ausgeführten Hübe finden dadurch im Gegensatz zum elektromagnetischen Verfahren unter Vorspannung zur Materialoberfläche statt.

Durch die Wahl unterschiedlicher maschinen- wie aktuatorseitig einstellbarer Prozessparameter ergibt sich die Möglichkeit, direkten Einfluss auf das Ergebnis zu nehmen. Die wesentlichen Prozessparameter von Machine Hammer Peening sind in Abbildung 9 dargestellt.

Die Arbeitsbewegung kann dabei stufenlos über die Intensität I [%] und die Frequenz f [Hz] definiert werden. Durch den Intensitätswert (ungleich Null) entsteht eine oszillierende Bewegung des Hammerkopfes mit gegebener Frequenz. Die entstehende Amplitude dieser Bewegung ist durch die Frequenz beeinflusst, wobei eine Erhöhung der Frequenz zu einer Verringerung der Schwingungsamplitude führt.

Bevor die Bearbeitung beginnen kann, muss das bereits oszillierende Werkzeug an die Werkstückoberfläche herangeführt werden. Die Annäherung wird solange durchgeführt, bis es zum sogenannten Zündvorgang kommt. Bei Erreichen des Abstands, welcher der Amplitude der freien Schwingung entspricht, trifft das Werkzeug erstmalig auf die Oberfläche. Durch die durch den ersten Stoßvorgang entstehende Rückprallenergie wird die bewegte Masse stark in Richtung des Aktuatorgehäuses gedrückt. Dies führt zu einem Gegenschlag an der Aktuator-Rückwand, der das Schlagwerkzeug wieder in Richtung des Werkstücks bewegt. Diese wechselseitigen Stoßvorgänge stellen eine maßgebliche Energiequelle für den Oberflächenbearbeitungsprozess dar. Die zusätzliche Bewegungsenergie führt dazu, dass der Abstand zwischen Hammerkopf und Werkstück deutlich über die freie Schwingungsamplitude hinaus erhöht werden kann. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird der Abstand zwischen Hammerkopf und Werkstückoberfläche als Hub h [mm] bezeichnet. Der Abstand zwischen Kopf und Werkstückoberfläche kann nicht beliebig erhöht werden. Je nach Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffes und der frequenzabhängigen Freischwing-Amplitude kann der Prozess ab einer gewissen Entfernung nicht aufrecht gehalten werden. Bei Stahlwerkstoffen beträgt dieser

Abstand bei einer Frequenz von 200Hz in etwa 1,3mm. Durch Überschreiten dieses Wertes verliert das Werkzeug den Kontakt zur Oberfläche und damit die für den Prozess benötigte Rückprallenergie. Das Werkzeug befindet sich darauf in freier oszillierender Bewegung über dem Werkstück (vgl. [18]; [19]).

Nach dem Zündvorgang wird das Werkzeug durch die Werkzeugmaschine in vorgegebener Schlagdistanz über die Oberfläche des Werkstücks geführt. In jeder Bearbeitungsbahn werden einzelne Schläge des Werkzeugs mit halbkugelförmiger Spitze (Kopfdurchmesser d [mm]) auf der Oberfläche aneinandergereiht. In Vorschubrichtung ergibt sich der Eindrucksabstand zwischen einzelnen Schlägen a [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v [mm/min] und der Schlagfrequenz f [Hz] zu:

$$a[\text{mm}] = \frac{v \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] / 60 \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right]}{f[\text{Hz}]} \quad (1)$$

Die flächige Bearbeitung erfolgt durch das Aneinanderreihen mehrerer Bahnen in einem durch das Maschinenprogramm vorgegebenem Bahnabstand l_p [mm]. Deren Fortschrittsrichtung wird als Prozessrichtung bezeichnet. Die Ausrichtung der Vorschubrichtung des MHP-Prozesses zur Vorschubrichtung der vorangegangenen Fräsarbeit wird als Bahnorientierungswinkel α [°] bezeichnet (vgl. [18]; [19]).

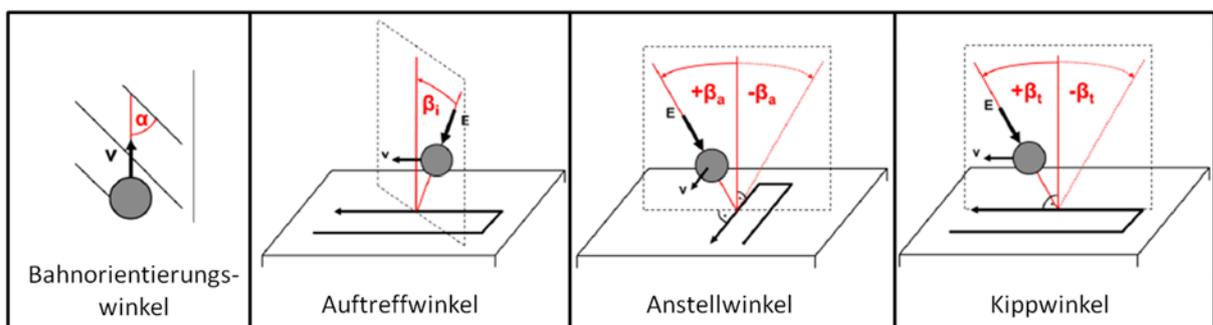


Abbildung 8: Darstellung der MHP Winkelmaße (vgl. [19])

In Abbildung 8 sind für ein besseres Verständnis die Winkelmaße dargestellt. Für die Bearbeitung mit nicht orthogonalen Schlägen benötigt man den Anstellwinkel β_a [°]. Dieser gibt das Winkelmaß der Werkstückoberfläche im Berührungspunkt mit dem Hammerkopf und der Achse der Hubbewegung des Hammerkopfes in der Ebene quer zur Vorschubrichtung an. Um die Ausrichtung der diesem Winkel zugrunde liegenden Ebene zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses zu beschreiben, existiert der Kippwinkel β_t [°]. Dieser Winkel kann einen Wert zwischen 0° und $\pm 180^\circ$ einnehmen, wobei $\beta_t = 0^\circ$ eine Bearbeitung entlang der Flächennormalen des Werkstücks bedeutet. Für $\beta_t > 0^\circ$ stellt sich eine schleppende Bearbeitung quer zur

Vorschubrichtung, in Richtung des bearbeiteten Materials ein. Für $\beta_i < 0^\circ$ ergibt sich eine stechende Bearbeitung in Richtung des unbearbeiteten Materials (vgl. [18]; [19]).

Der Auftreffwinkel β_i bezeichnet das Winkelmaß zwischen der Flächennormalen der Werkstückoberfläche im Berührungspunkt mit dem Hammerkopf und der Achse der Hubbewegung des Hammerkopfes als Kombination aus Kipp- und Anstellwinkel (vgl. [19]).

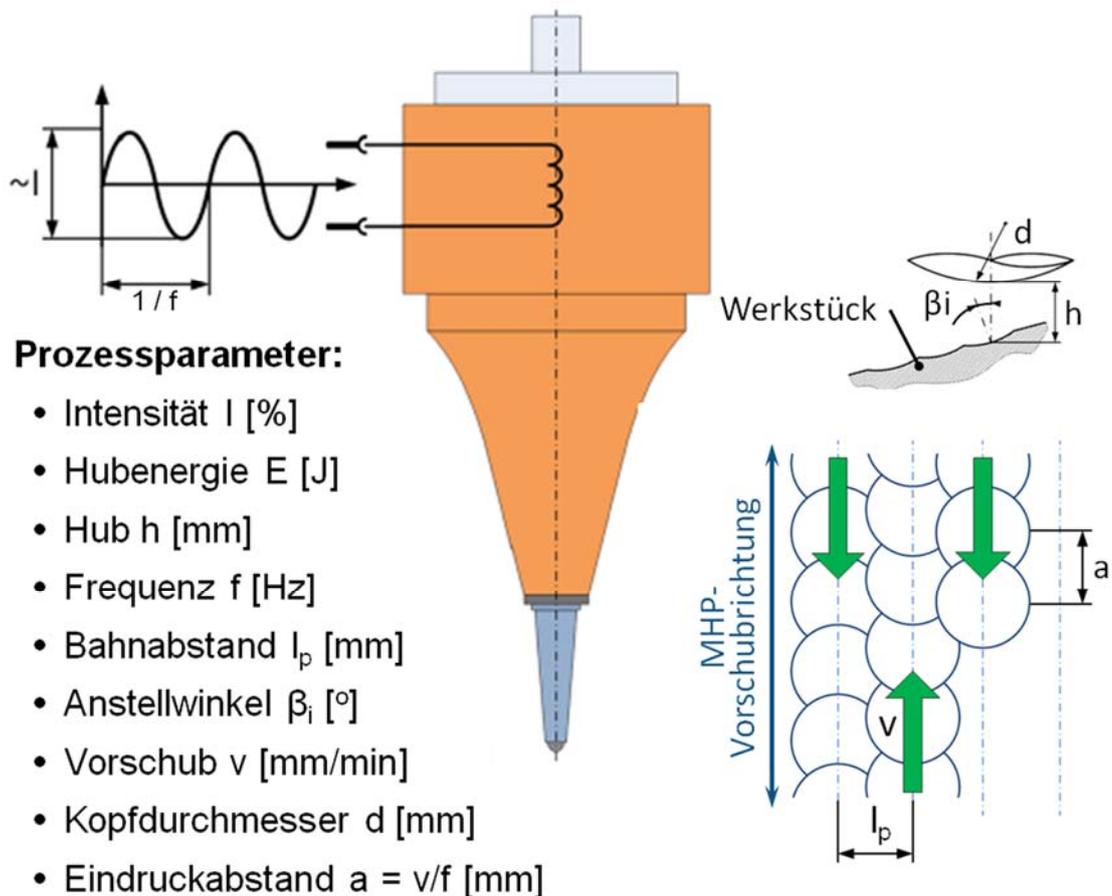


Abbildung 9: Darstellung der MHP-Prozessparameter (vgl. [22])

2.4 Aluminium-Druckguss

Laut DIN Norm 8580 wird Urformen aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand als Gießen bezeichnet (vgl. [20]). Abbildung 10 zeigt die Eingliederung von Gießverfahren in diese Norm.

Zum Fertigungsprozess des Gießens sind eine Negativform des zu fertigenden Bauteils sowie ein fließfähiger Werkstoff, die Schmelze, erforderlich. Die Form kann als Dauerform, diese ermöglicht mehrere Abgüsse, ausgeführt sein, oder als verlorene Form, die nach jedem Abguss neu angefertigt werden muss. Verlorene Formen

bestehen aus Wachs oder Schaumstoff, während Dauermodelle aus Holz oder Metall gefertigt sind (vgl. [21]).

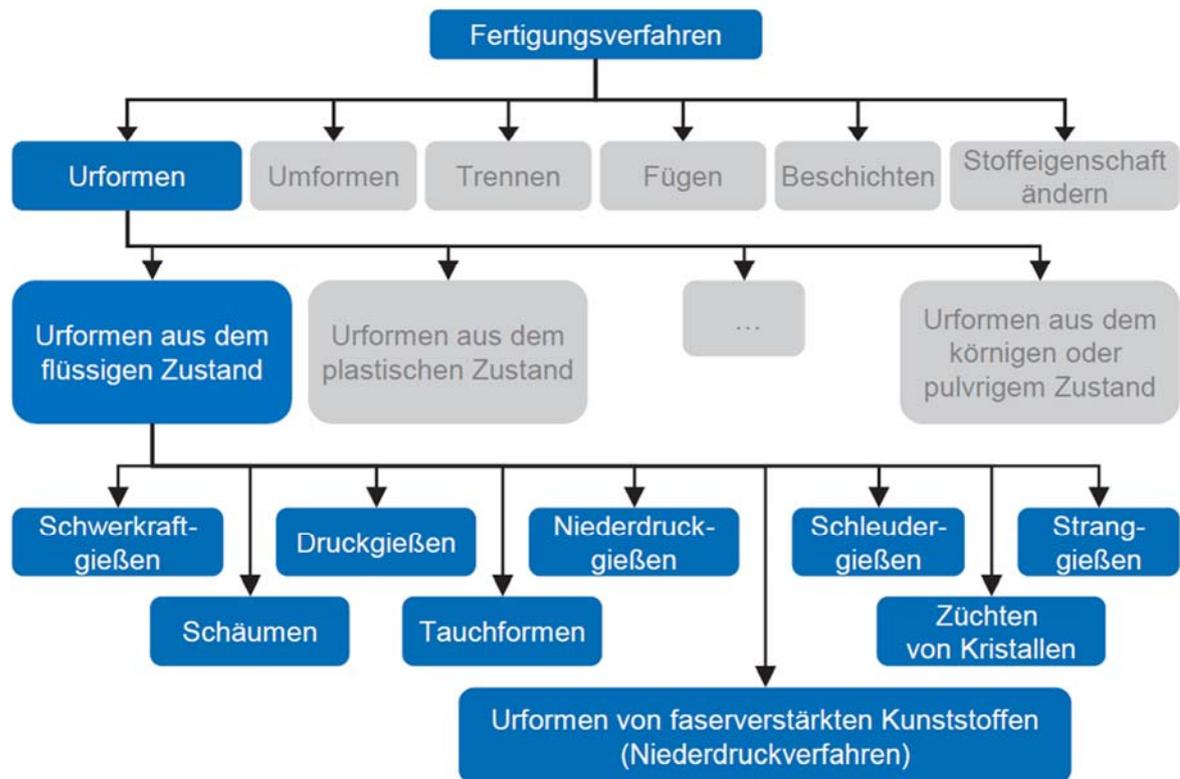


Abbildung 10: Eingliederung von Gießverfahren in die DIN 8580 (vgl. [20], [21])

Beim eigentlichen Gießvorgang fließt die Schmelze in die Form. Die Hitzebeständigkeit der Form, muss deutlich über der Temperatur der Schmelze liegen, damit die Form den thermischen und mechanischen Belastungen standhält. Vor Entnahme des fertigen Gussteils muss die Schmelze erstarren. Während der Umwandlung vom flüssigen in den festen Zustand verringert sich das Volumen des Bauteils in der Form, dies wird als Schrumpfung bezeichnet. Die Volumenkontraktion wird ausgeglichen, indem während des Abkühlvorgangs zusätzliches Material über den Speiser und den Anschnitt nachfließt. Um die Bildung von Hohlräumen, Lunkern, im Bauteil zu verhindern, muss die Abkühlung möglichst homogen stattfinden, da die Speiserkanäle sonst zu früh verschlossen sind. Eine inhomogene Erstarrung führt weiters zu lokal unterschiedlichen Schwindungen. Dies führt zu Spannungsrissen (vgl. [21]).

Der Druckguss zählt zu den Verfahren mit Dauerform. Unter hohem Druck wird die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit in eine Form aus Stahl gespritzt. Hierdurch lässt sich eine schnelle und maßgenaue Produktion von Gussstücken realisieren, welche eine sehr glatte und saubere Oberfläche aufweisen. Nacharbeit ist, abgesehen vom Abtrennen des Eingusssystemes sowie dem Bearbeiten der Passflächen, in den meisten Fällen nicht notwendig (vgl. [21]).

Druckgussmaschinen werden üblicherweise hydraulisch betrieben, damit die hohen Gießdrücke und Schließkräfte der Formen realisiert werden können. Zwei Verfahrensvarianten werden dabei unterschieden, Warm- und Kaltkammerverfahren.

Beim Warmkammerverfahren bildet die Füllkammer mit der Maschine und dem Warmhalteofen eine Einheit. Die Schmelze wird durch einen Kolben in die Gussform gedrückt. Mit Warmkammermaschinen können, abhängig von Werkstoff und der Werkstückgröße, bis zu 1000 Abgüsse pro Stunde erzeugt werden (vgl. [21]). Abbildung 11 zeigt eine Prinzipdarstellung einer Warmkammerdruckgussmaschine.

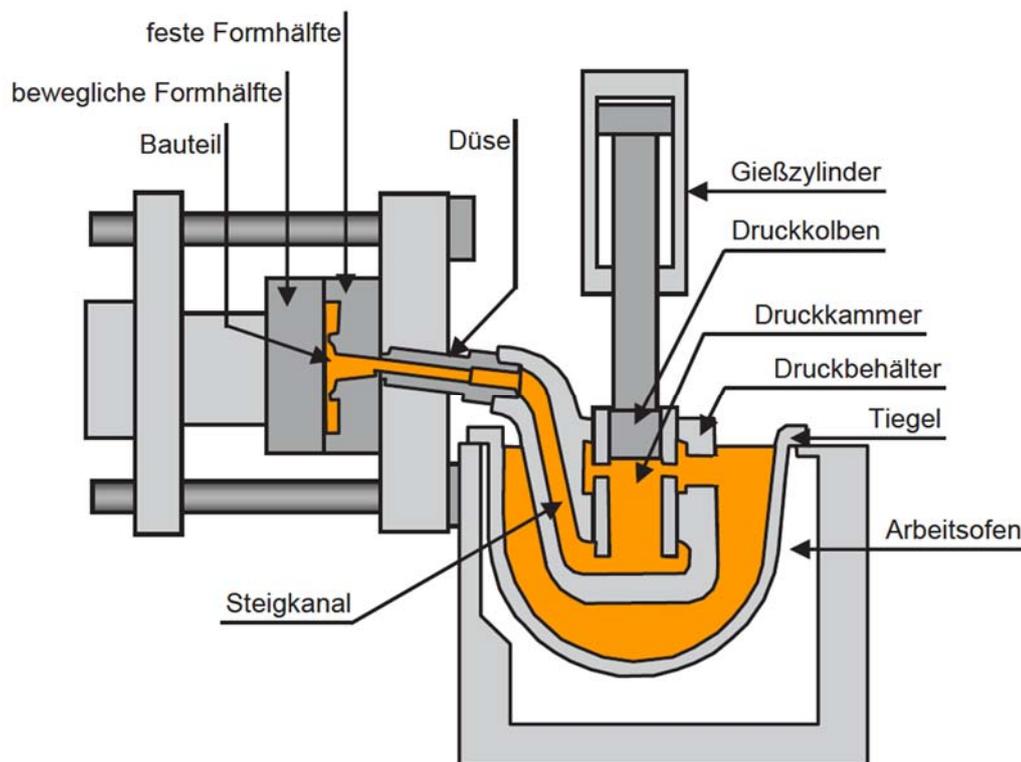


Abbildung 11: Prinzipdarstellung einer Warmkammermaschine (vgl. [22])

Beim Gießverfahren mit Kaltkammern, siehe Abbildung 12, sind der Warmhalteofen und die Maschine getrennt. Das Metall wird dem Ofen entnommen und der Gießkammer der Maschine zugeführt. Bei diesem Verfahren können durch die Trennung von Ofen und Maschine auch hochschmelzende Metalllegierungen (Schmelztemperaturen über 1050°C) sowie Materialien mit hoher chemischer Aktivität verarbeitet werden. Bei vollautomatischem Betrieb sind im Kaltkammerdruckverfahren bis zu 180 Abgüsse je Stunde möglich, deutlich weniger als beim Warmkammerdruckguss (vgl. [21]).

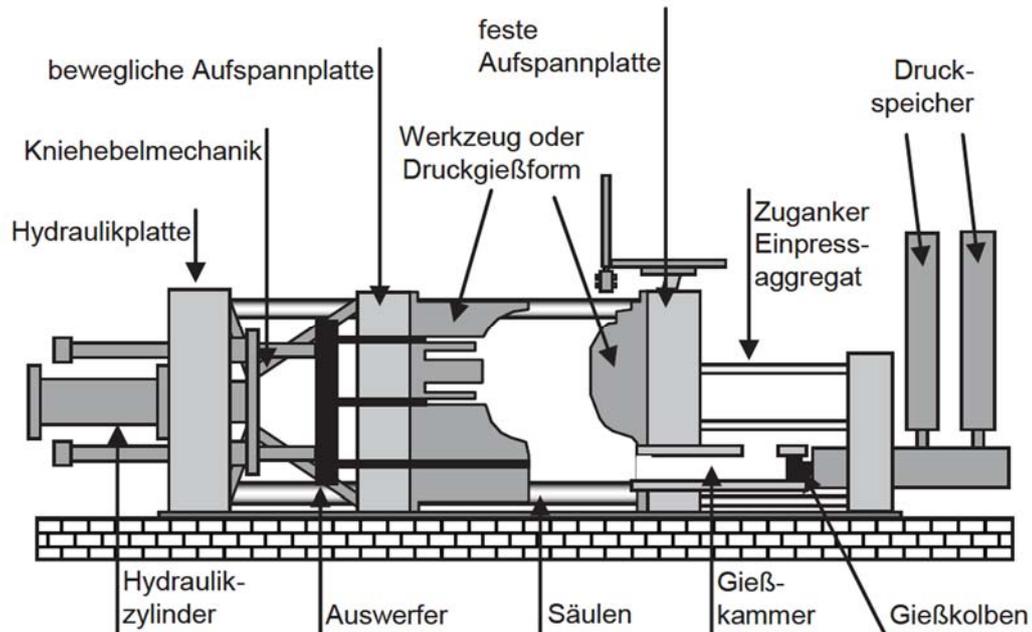


Abbildung 12: Kaltkammerdruckgussmaschine in hydromechanischer Ausführung (vgl. [22])

Die Gusswerkstoffe werden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Die Eisen-Gusswerkstoffe und die Nichteisen-Gusswerkstoffe. Die Nichteisen-Gusswerkstoffe werden weiters in Leicht- und Schwermetalle unterteilt. In der Gruppe der Leichtmetalle werden hauptsächlich Aluminium- und Magnesiumlegierungen vergossen. Kupfer- und Zinkbeziehungsweise Zinnlegierungen zählen zu den Schwermetallen.

Aluminium-Silizium-Legierungen haben aufgrund ihrer guten Gieß- und Gebrauchseigenschaften die größte Bedeutung. Durch die Zugabe von Salzgemischen, welche Kristallisationskeime aus Titan und Bor enthalten, ist eine feinkörnige Erstarrung realisierbar. Die gebräuchlichsten Aluminium-Legierungswarmarbeitsstähle sind Cr-Mo-Stähle wie X38CrMoV5-1 und X40CrMoV5-1 (vgl. [21]). Diese Al-Legierungen können in günstigen Fällen in einer Druckgießform etwa 80.000 bis 150.000 Abgüsse erzeugen. Die hohe Anzahl der Abgüsse sowie die gute Oberflächengüte führen zur Eignung von Druckguss für die Massenfertigung. Weiters lässt sich der Druckgussvorgang gut mechanisieren.

Im Allgemeinen werden Werkzeuge zum Urformen, wie Druckgießwerkzeuge für Leichtmetalle, durch kombinierte mechanische und thermische Beanspruchungen belastet. Zusätzlich können diese von abrasiven und korrosiven Prozessen überlagert sein. Die unterschiedlichen Versagensarten sind im Fall von Druckgießformen lebensdauer- und standzeitbestimmend. Spannungsrisse entstehen in Folge von Eigenspannungen bei der Erstarrung des Gussgefüges. Infolge der auftretenden Spannungen kann die Dehngrenze des Werkstoffs überschritten werden, dies führt zu

Spannungsrissen. Die Gefahr von Spannungsrissen kann durch das Vermeiden von Materialanhäufungen sowie scharfkantigen Übergängen, die hohe Kerbspannungen hervorrufen, verringert werden. Neben Spannungsrissen, Erosion und Anklebungen ist die Brandrissigkeit ein häufig zu beobachtendes Phänomen. Brandrisse treten meist in Form von Rissen an ebenen Flächen ohne besondere Spannungskonzentration auf. Diese netzartig verlaufenden Risse können zwischen einigen hundertstel Millimeter bis zu 50mm in das Werkzeuginnere reichen. In Folge des Kontakts des flüssigen Gusswerkstoffs mit der Gussform kommt es in der Randzone der Form zu inhomogenen plastischen Dehnungen durch den im Werkzeuginneren wirkenden Temperaturgradienten. Die örtliche Streckgrenze wird durch die gleichzeitige Verringerung der Warmfestigkeit überschritten und der Randbereich wird plastisch gestaucht. Die gestauchte Oberflächenschicht gerät bei der folgenden Abkühlung unter Zugbeanspruchung, welche die treibende Kraft für die Rissbildung und die Rissausbreitung darstellt (vgl. [21], [23]).

2.5 Prozessketten des Werkzeug- und Formenbaus

Über alle Branchen, von der Haushaltsindustrie bis zur Automobilindustrie, werden die Entwicklungszyklen immer kürzer. Dies hat auch auf den Werkzeugbau Auswirkungen. Es fand ein Wandel von der klassischen seriellen Entwicklung zum „Simultaneous Engineering“ statt. Durch die Entwicklung zusätzlicher Prototypen soll das Ergebnis sehr früh abgesichert beziehungsweise rechtzeitig gegengesteuert werden. Dies führt allerdings dazu, dass bereits ohne konkrete Bauteildaten mit der Werkzeugentwicklung begonnen werden muss (vgl. [24]).

Der Lebenszyklus eines Werkzeugs teilt sich in mehrere Phasen. Eine generelle Einteilung kann in die vier Phasen

- Entwicklung
- Fertigung und Anlauf
- Nutzung
- Recycling

vorgenommen werden. Die Entwicklung wird auf Kundenwunsch gestartet und endet mit der Übergabe der Planungsdaten an den Werkzeugbau. In der Phase Fertigung und Anlauf sind Produktion des Werkzeugs, Zusammensetzen und der erfolgreiche Try-Out inkludiert. Anschließend geht das Werkzeug in die Produktion beim Auftraggeber über. In der Nutzungsphase sind auch Reparatur und Wartungen enthalten. Sobald das Werkzeug nicht mehr weiter verwendet wird, verschlissen oder nicht mehr reparierbar ist, beginnt die Recycling-Phase (vgl. [25]).

Die größtenteils als Unikate hergestellten Werkzeuge haben einen maßgeblichen Einfluss auf die darauf folgende Serienproduktion. Vor allem kann der Werkzeugbau durch Knowhow und Innovation die Produktion von Serienteilen in Bezug auf die Faktoren Zeit, Qualität und Kosten deutlich verbessern.

Der Werkzeugbau findet in der Entwicklungskette sehr weit vorne statt und trägt in enormem Maß zur Funktionsfähigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit bei. Erreichbare Zykluszeiten in der späteren Serienfertigung mit einem Werkzeug sind dabei von größerer Bedeutung als die Kosten für das Werkzeug. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass zu Beginn der Werkzeugkonstruktion oft viele Parameter noch nicht genau fixiert sind. Dies macht es wichtig, möglichst früh Details einzugrenzen (vgl. [24]).

Groche beschreibt in [26] die übliche Prozesskette im Werkzeugbau wie in Abbildung 13 dargestellt. Hierbei startet der Prozess mit einem groben spanabhebenden Prozessschritt, Schruppen, gefolgt von feiner werdenden Schritten, die bereits formgebend für das Werkstück sind. Nach der Härtung des Bauteils erfolgt üblicherweise die Nachbearbeitung auf die gewünschte Oberflächenrauheit mittels manuellem Polieren, einem sehr zeit- und arbeitsaufwendigem Verfahren. Dem gegenüber stellt Groche eine verkürzte Prozesskette. In dieser wird die Oberfläche mittels mechanischer Oberflächenbearbeitungsverfahren geglättet. Dies hat den Vorteil, da es in der Regel in derselben Werkzeugmaschine durchgeführt werden kann, sodass der Zeitaufwand vom finalen Polieren deutlich reduziert wird da ein Teil dieser Arbeit bereits vom Oberflächenglättungsverfahren übernommen wird. Zusätzlich stellt sich dadurch eine erhöhte Härte der Oberfläche ein sowie eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Oberfläche (vgl. [26]).

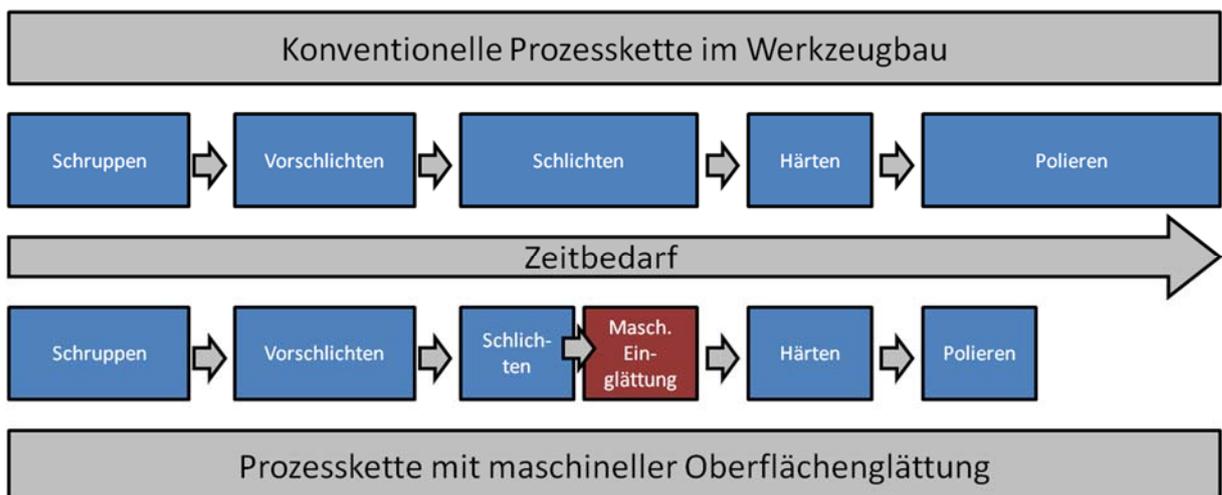


Abbildung 13: Prozesskette mit Reduktion des Zeitbedarfs nach Groche [26]

Ähnlich argumentiert Bleicher in [27]. Durch Implementieren von Machine Hammer Peening in die Prozesskette und die Wahl von geeigneten Parametern kann die

Werkstückoberfläche funktionalisiert werden. Zusätzlich zur Oberflächenglättung zeigen Versuchsergebnisse eine signifikante Härtesteigerung sowie durch das Einbringen von Druckeigenspannungen eine erhöhte Verschleißfestigkeit, wenn MHP nach dem Härten durchgeführt wird. Abbildung 14 zeigt die technologische Optimierung der Prozesskette und die dadurch erreichte Zeitreduktion. Abbildung 14a zeigt die Reduktion in der Produktion durch MHP-Implementierung nach dem Härteprozess und die durch das optimierte Werkzeug erreichte Verlängerung des Lebenszyklus. Abbildung 14b stellt die Möglichkeit dar, den zeit- und kostenaufwendigen Oberflächenveredelungsprozess teilweise durch MHP zu substituieren. Die Variante c) stellt, wie auch schon von Groche in [26] beschrieben, den konventionellen Fertigungsprozess und Lebenszyklus in der Nutzung dar.

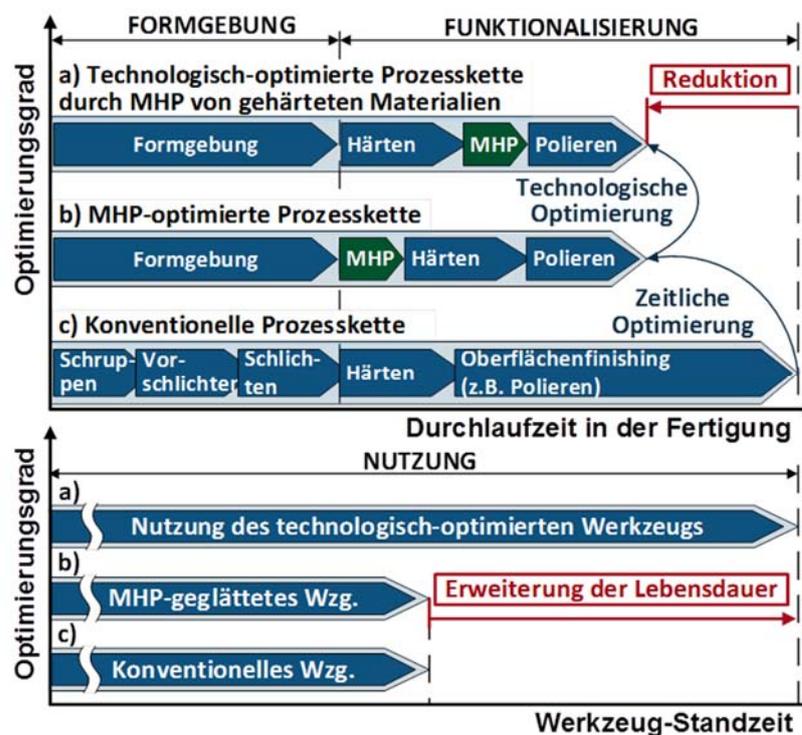


Abbildung 14: Technologisch optimierte Prozesskette der Werkzeug- und Formenbau- Industrie sowie Veränderung des Werkzeugs-Lebenszyklus in der Nutzungsphase (vgl. [27])

Berglund et al. untersucht eine mögliche Substitution des Polierprozesses mittels MHP in [28]. In der Herstellung von Presswerkzeugen für die Blechumformung aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG70L) wird getestet, ob MHP den manuellen Polierprozess zumindest teilweise ersetzen kann. Die Ergebnisse zeigten dabei, dass durch eine geringere Oberflächenunebenheit die Abnutzung reduziert werden konnte und somit eine Lebensdauererweiterung möglich ist. Die mittlere Rauheit R_a ist gegenüber der gefrästen Oberfläche um 77% geringer. Außerdem kann durch den Glättungseffekt von MHP der benötigte Polieraufwand für das Erreichen der

geforderten Rauheit reduziert werden. Eine Härtesteigerung findet lediglich in der Randschicht statt und ist von der Geometrie des Werkstücks abhängig.

3 Zielsetzung der Arbeit

Zielsetzung

Die Eignung der Machine-Hammer-Peening Technologie für Oberflächenglättung, Steigerung der Oberflächen- und Randschichtenhärte sowie zur Einbringung von Druckeigenspannungen ist aus der Literatur bekannt. Die möglichen Anwendungsgebiete im Bereich des Werkzeugbaus sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Zu diesem Zweck gibt diese Arbeit Einblick in einige Teilbereiche des Werkzeugbaus und deren Eignung für Machine Hammer Peening in der Praxis. Die Auswahl der betrachteten Werkzeuge erfolgte unter Mithilfe des Projektkonsortiums des CORNET TEC-Projekts. Der Fokus liegt dabei auf Stanzwerkzeugen und Gussformen.

In einem gesonderten praktischen Anwendungsfall wird die MHP-Technologie auf eine verschlissene Aluminium-Druckgussform angewendet, um die Form wieder für den Einsatz aufzubereiten und somit die Lebensdauer zu erweitern. Dieser Aspekt steht im Vordergrund des praktischen Teils dieser Arbeit.

Vorgehensweise

Im ersten Teil der Arbeit wird der MHP-Prozess anhand seiner theoretischen Wirkmechanismen genau ausgearbeitet, um das Prozessverständnis weiter zu vertiefen und die Wirkungsweise der Prozessparameter sowie deren Auswirkungen in Zusammenhang zu stellen. Anschließend wird über Versuche an Werkzeugen die Eignung für Bereiche des Werkzeugbaus getestet, um im finalen Teil den Anwendungsfall zum Refitting einer verschlissenen Aluminiumdruckgussform zu präsentieren.

4 Wirkmechanismen

In diesem Kapitel wird auf die allgemeine Wirkweise von mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren und deren theoretische Grundlagen eingegangen. Erst wird der Aufbau von Metallen dargestellt und eine Abgrenzung von Kalt- zu Warmumformen gegeben. Anschließend werden Eigenspannungen in den Randschichten erörtert und das für Machine Hammer Peening typische stoßartige Aufschlagen einer Hartmetallkugel auf die Oberfläche eines Werkstücks diskutiert.

4.1 Kaltumformmechanismen und Aufbau von Metallen

Im festen Zustand bilden metallische Werkstoffe Kristalle. Die den Körper aufbauenden Atome befinden sich in einer regelmäßigen räumlichen Anordnung zueinander. Ist kein kristalliner Aufbau vorhanden, spricht man von amorphen Stoffen wie Flüssigkeiten, Glas und einigen Kunststoffen. Der Unterschied zwischen Metallen und anderen kristallinen Stoffen, z.B. Salzen, besteht in der Art der Bindung zwischen den einzelnen Atomen (vgl. [29]).

Die genau definierte Gleichgewichtslage der Atome führt zu einer regelmäßigen räumlichen Anordnung der Atome, dem Kristallgitter. Zur genauen Beschreibung eines Gitters dienen einfache geometrische Körper, wie die Gitterzelle oder die Elementarzelle. Die Atomabstände sind durch a , b und c auf den Achsen x , y und z eines Koordinatensystems und durch die Winkel α , β und γ zwischen den Achsen beschrieben. Die Abstände, auch Gitterparameter genannt, betragen für die Mehrzahl der Metalle 0,25 bis 0,5nm (10^{-9} m). Dies führt dazu, dass auf einem Millimeter 2-4 Millionen Atome vorkommen (vgl. [29]).

Die in Metallen am häufigsten auftretenden Atomgittertypen sind das kubisch-flächenzentrierte Gitter (kfz), das kubisch-raumzentrierte Gitter (krz) und das hexagonale Gitter dichtester Kugelpackung (hdP). Die drei Elementarzellen sind in Abbildung 15 dargestellt (vgl. [29]).

Das reale Raumgitter der Kristalle weist viele Abweichungen vom beschriebenen idealen Aufbau auf. Jede Abweichung führt zu einer Störung und Verspannung des Gitters. Die Abweichungen, auch Gitterbaufehler genannt, entstehen in jedem Kristall, wenn bei der Erzeugung das thermodynamische Gleichgewicht gestört wird oder nachträglich durch Energiezufuhr mittels mechanischer Behandlungsprozesse. Die Gitterbaufehler sind bei der gezielten Erzeugung ein wesentliches Element, um die Werkstoffeigenschaften zu verbessern (vgl. [29]).

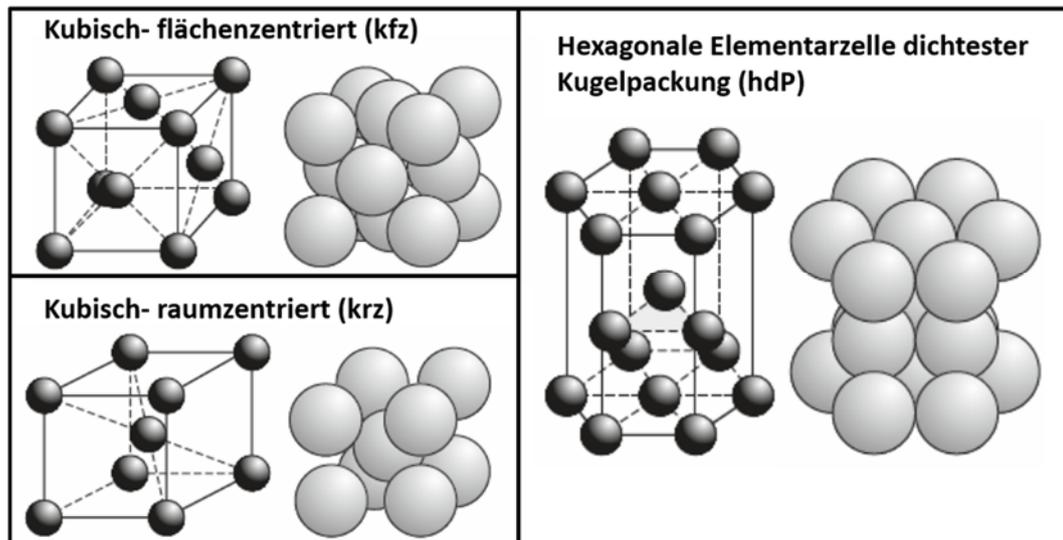


Abbildung 15: Elementarzellen der häufigsten metallischen Atomgitter nach [29]

Es werden verschiedene Arten von Gitterbaufehlern unterschieden, wie in Abbildung 16 dargestellt. Leerstellen, Zwischengitteratome und auch Fremdatome werden als punktförmige Gitterbaufehler bezeichnet. Relevanter sind jedoch die linearen Baufehler, auch Versetzungen genannt. Stufenversetzungen (Symbol \perp) kann man als Rand von Gitterebenen beschreiben, die im Kristall enden. Bei Schraubenversetzungen sind Gitterebenen im Bereich der senkrecht zu ihnen stehenden Versetzungslinie wendelförmig verzerrt. Im Allgemeinen treten gemischte Versetzungen auf, als Kombination von Schrauben- und Stufenversetzung (vgl. [29]). Versetzungen erzeugen Spannungsfelder, die sich wegen ihrer Häufigkeit gegenseitig beeinflussen. In einem Volumen von 1mm^3 eines weichgeglühten Metalls sind Versetzungslinien mit einer Gesamtlänge von 1km vorhanden. Dieser Wert kann durch Kaltverformung auf bis zu 10.000km anwachsen (vgl. [29]).

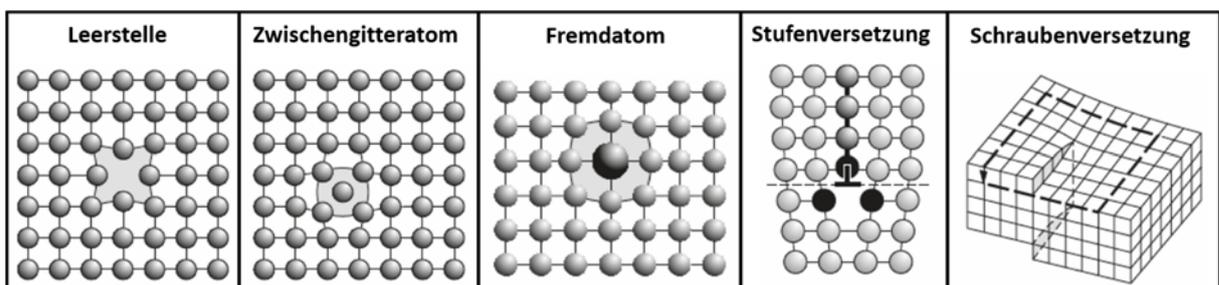


Abbildung 16: Punktförmige und lineare Gitterbaufehler (vgl. [29])

Durch die gegenseitige Beeinflussung der Spannungsfelder von Versetzungen kann es zu einer Übereinanderreihung gleichartiger Stufenversetzungen kommen. Dies führt zu einer flächenhaften Störung des Gitters, die Kleinwinkelkorngrenze genannt

wird. Eine so auftretende Versetzung wird auch als zweidimensionaler Gitterfehler bezeichnet. Die Gitterebenen werden nur um einen kleinen Winkel abgelenkt und sind dadurch weitgehend ungestört. Im Gegensatz dazu entstehen zwei bis drei Atomabstände-dicke, strukturlose Zonen, (Großwinkel-) Korngrenzen genannt. Diese Grenzflächen treten bei der Rekristallisation oder der Erstarrung aus der Schmelze auf, wenn ein Kristall auf einen anderen trifft. So bilden die Gitterebenen der beiden Kristalle größere Winkel untereinander. Die Energie der Kleinwinkelkorngrenze ist naturgemäß kleiner als die der Großwinkelkorngrenze (vgl. [29]).

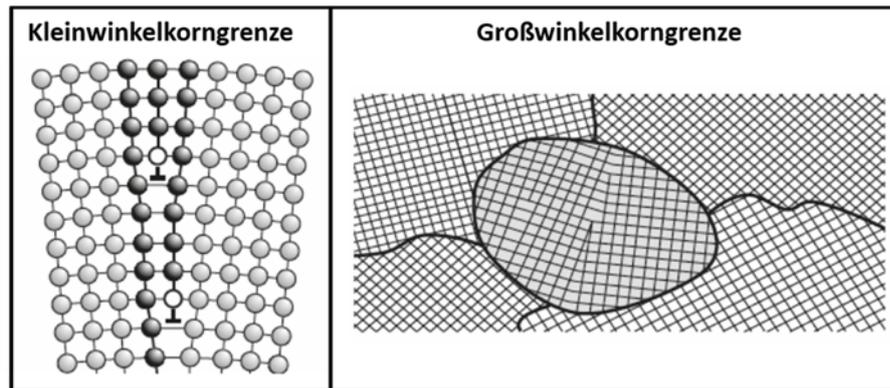


Abbildung 17: Klein- und Großwinkelkorngrenze (vgl. [29])

Bei der plastischen Verformung eines Werkstoffs, wie in Abbildung 18 dargestellt, kommt es zu einer Versetzungsbewegung. Durch eine Schubspannung τ kommt es zu einer fortlaufenden, geringfügigen Verlagerung von Atomen aufgrund einer Verzerrung des Gitters. Die Atome verlagern sich und da die angelegte Spannung erhalten bleibt, wandert die Versetzung weiter, bis sie die freie Oberfläche des Kristalls erreicht und dort eine Stufe bildet oder auf ein Hindernis stößt (vgl. [29]). Hindernisse sind in der Regel Korngrenzen und diese führen dazu, dass die Zahl der Versetzungen nicht abnimmt. Dies würde wiederum zu einer Abnahme der Gitterverspannungen führen. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass Metalle bei plastischer Verformung verfestigt werden. Die erforderlichen Spannungen, um Versetzungen zu bewegen, steigen (vgl. [29]).

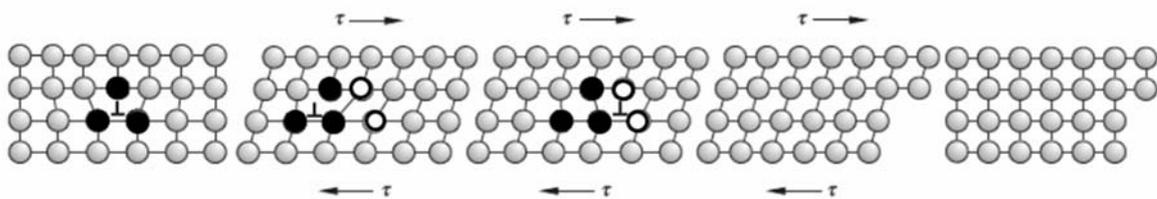


Abbildung 18: Plastische Verformung durch Versetzungsbewegung (vgl. [29])

Mittels plastischer Verformung wird der Energiegehalt eines Werkstoffs deutlich erhöht. Die gespeicherte Energie besteht aus der elastischen Verzerrungsenergie der Versetzungen. Durch eine hinreichende Temperaturerhöhung des Werkstoffes kommt es oberhalb gewisser Temperaturen zu einem Energieabbau durch Ausheilen und Umordnen der Gitterdefekte, genannt Erholung, beziehungsweise zu einer Kornneubildung, genannt Rekristallisation (vgl. [29]). Die Rekristallisations-temperatur ist kein fester Wert und hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. So sind etwa der Vorformungsgrad, die Korngröße und die chemische Zusammensetzung, insbesondere die Begleit- und Legierungselemente, entscheidend. Die Rekristallisationstemperatur wird auch als Kenngröße verwendet, um Verfahren nach Kalt- oder Warmumformverfahren zu unterscheiden. Verfahren oberhalb dieser Temperatur werden als Warmverformungsverfahren eingeordnet. Beim Kaltverformen ist die plastische Verformung gleichzeitig mit einer Verfestigung verbunden. Die Rekristallisationstemperatur beträgt in etwa 40% der Schmelztemperatur in Kelvin (vgl. [29]; [6]).

Im Zuge der meisten mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren werden keine so hohen Prozesstemperaturen erreicht, daher sind die beschriebenen Mechanismen eine Grundlage für diese Verfahren.

4.2 Eigenspannungen

Mechanische Spannungen, die in einem Material frei von äußeren Kräften und Temperaturgradienten wirken, versteht man als Eigenspannungen. Im Gegensatz dazu stehen Lastspannungen, die durch Kräfte verursacht werden, die von außen auf ein Bauteil oder eine Werkstoffprobe angreifen (vgl. [30], S.322). Innerhalb eines Bauteils müssen Bereiche mit Zugeigenspannungen im Gleichgewicht mit Bereichen sein, in denen Druckeigenspannungen vorliegen. Allgemein gilt, dass Druckeigenspannungen in den Oberflächenzonen eines Bauteils günstig sind. Werkstoffbeschädigungen, wie zum Beispiel Rissbildung, gehen überwiegend von der Oberfläche aus. Kritische Zugspannungswerte, die zur Ausbildung von Rissen führen, können deutlich höher sein, wenn erst Druckeigenspannungen überwunden werden müssen. Dies führt zu höherer Belastbarkeit der äußeren Randschichten (vgl. [29]).

Eigenspannungen werden in drei Arten eingeteilt. Eigenspannungen I. Art geben den Mittelwert der Spannungen in einem Volumen an. Voraussetzung ist, dass ausreichend viele Kristalle aller vorhandenen Werkstoffphasen enthalten sind, sodass diese als repräsentativ für das Material gelten können. Die Volumensgröße ist von der mittleren Korngröße abhängig. Solche Eigenspannungen I. Art werden auch als Makroeigenspannungen bezeichnet. Die Differenz der mittleren Spannung eines Kristalliten zur Eigenspannung I. Art gilt als Eigenspannung II. Art. Eigenspannungen

III. Art bezeichnen die ortsunabhängigen Abweichungen der Spannungen innerhalb eines Kristalliten von der Summe aus Eigenspannungen I. und II. Art. Da sich Eigenspannungen II. und III. Art, die beide auch als Mikro eigenspannungen bezeichnet werden, auf ein Kristallit beziehen, sind sie demnach im Gegensatz zu Eigenspannungen I. Art nicht repräsentativ für das gesamte Material (vgl. [30]).

Eine Ausbildung von Eigenspannungen ist mit den meisten mechanischen Bearbeitungen, insbesondere von Oberflächenverfestigungsverfahren und Wärmebehandlungen verbunden. Makro eigenspannungen werden durch räumlich inhomogene, plastische Verformung, Phasentransformationen oder Abkühlungsverläufe verursacht (vgl. [30]).

Eingebrachte Druckeigenspannungen in der Werkstückrandzone überlagern Belastungsspannungen und vermindern somit die Werkstückbeanspruchung im Zugbereich. Auf diese Weise werden zusammen mit einhergehenden Effekten von Oberflächenverfestigungsverfahren, wie der Beseitigung von Mikrokerben auf der Oberfläche und einer Kaltverfestigung der Randzone eine erhebliche Dauerfestigkeitssteigerung erreicht. Steigerungen sind sowohl im Bereich niedriger als auch hoher Werkstofffestigkeit zu erzielen (vgl. [6]).

4.3 Kugeleintritt

Die in dieser Arbeit beschriebenen direkten Oberflächenbearbeitungsverfahren, wie Kugelstrahlen, Festwalzen und Machine Hammer Peening, beruhen zumeist darauf, dass ein Werkzeug mit kugelförmiger Geometrie oder Spitze eine Oberfläche bearbeitet. Die Modifikation bei MHP geschieht durch den Einschlag der kugeligen Spitze des Werkzeugs in das Werkstück.

Im Jahr 1881 beschrieb Heinrich Hertz in [31] dem Journal für angewandte Mathematik die nach wie vor gültigen Grundlagen für den Kontakt zweier Kugeln und deren Beschreibung von Verformungs- und Spannungszuständen. Hierbei kann, sofern man den Radius einer der Kugeln als unendlich annimmt, auch auf die Berührung einer Kugel mit einer Oberfläche geschlossen werden. Hertz traf einige Vereinfachungen, die den Geltungsbereich stark einschränken, schuf damit aber dennoch die Grundlage für das Kugel-Ebenen-Kontakt-Verständnis (vgl. [18]).

Die von Hertz vorgenommenen Vereinfachungen beziehen sich auf eine statische Belastung, eine rein elastische Verformung der Kontaktpartner, vollkommen glatte und reibungsfreie Oberflächen und gegenüber den endlichen Abmessungen der Kontaktfläche unendliche Abmessungen der Körper (vgl. [31]).

Abbildung 19 stellt die wichtigsten Bezugsgrößen zur folgenden Erläuterung nach Hertz grafisch dar. Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich eine Druckverteilung $p(r)$ an der Kontaktfläche, auch Hertz'sche Pressung genannt, als Funktion des radialen Abstandes r , wobei p_0 den maximalen Kontaktdruck im Zentrum der Kontaktfläche und a den Kontaktradius bezeichnet:

$$p(r) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (2)$$

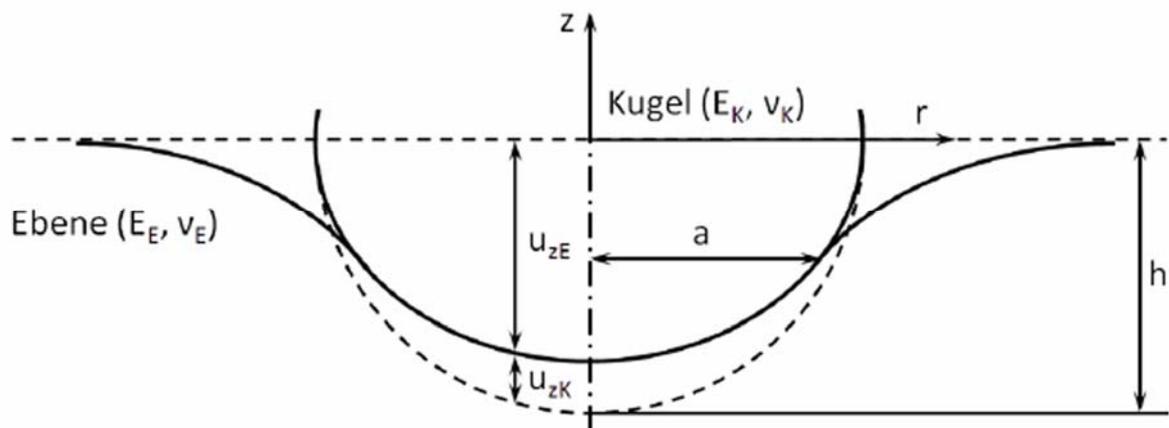


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Kugeleintritts nach Hertz (vgl. [18], [32])

E_K, E_E ... Elastizitätsmodul der Kugel beziehungsweise der Ebene

ν_K, ν_E ... Querkontraktionszahl der Kugel beziehungsweise der Ebene

u_{zK}, u_{zE} ... Physikalische Deformation der beiden Kontaktpartner (Kugel und Ebene)

h ... Eindringtiefe der Kugel in die Ebene

r ... radiale Abstand

a ... Kontaktradius der kreisrunden Kontaktfläche zwischen einer Kugel des Radius R und einer Ebene ($R = \infty$)

Durch Integration von $p(r)$ ergibt sich der Kontaktdruck p_m und aus dem Zusammenhang $F_N = p_m \cdot \pi \cdot a^2$ die wirkende Kontaktkraft F_N :

$$F_N = \pi \cdot a^2 \int_0^a p(r) \cdot dr = \frac{2}{3} \cdot p_0 \cdot \pi \cdot a^2 \quad (3)$$

Die Deformation der beiden Kontaktpartner (Index $i = [1,2]$) hängt nur von deren elastischen Eigenschaften ab. Anhand der Überlagerung der Einzellasten im Bereich der Kontaktzone folgt (Randbedingung $r \leq a$) (vgl. [18]):

$$u_{z,i} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \cdot \frac{\pi \cdot p_0}{4a} (2a^2 - r^2) \quad (4)$$

E_i ist der Elastizitätsmodul und ν_i die Querkontraktionszahl des jeweiligen Kontaktpartners. Durch Addition der Einzelverschiebungen kann der Kontaktradius a der kreisrunden Kontaktfläche zwischen einer Kugel des Radius R und einer Ebene ($R = \infty$) angegeben werden (vgl. [18]):

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{F_N \cdot R}{E_r} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Der mittlere Kontaktdruck p_m ergibt sich zu:

$$p_m = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{6}{\pi^3} \cdot \frac{F_N \cdot E_r^2}{R^2} \right)^{1/3} = \frac{2}{3} \cdot p_0 \quad (6)$$

Der reduzierte Elastizitätsmodul E_r ist hierbei die Größe, welche die Deformation der beiden Körper beschreibt. Es errechnet sich unter Kenntnis der Elastizitätsmodule von Kugel (E_K) und Ebene (E_E) sowie der zugehörigen Querkontraktionszahlen ν_K und ν_E zu:

$$E_r = \left(\frac{1 - \nu_K^2}{E_K} + \frac{1 - \nu_E^2}{E_E} \right)^{-1} \quad (7)$$

Nimmt man die eindringende Kugel mit Radius R als starr an, so kann auf Basis geometrischer Zusammenhänge die Eindruckstiefe h in die unendliche Halbebene näherungsweise mit

$$h = \frac{a^2}{R} \quad (8)$$

angegeben werden (vgl. [18]).

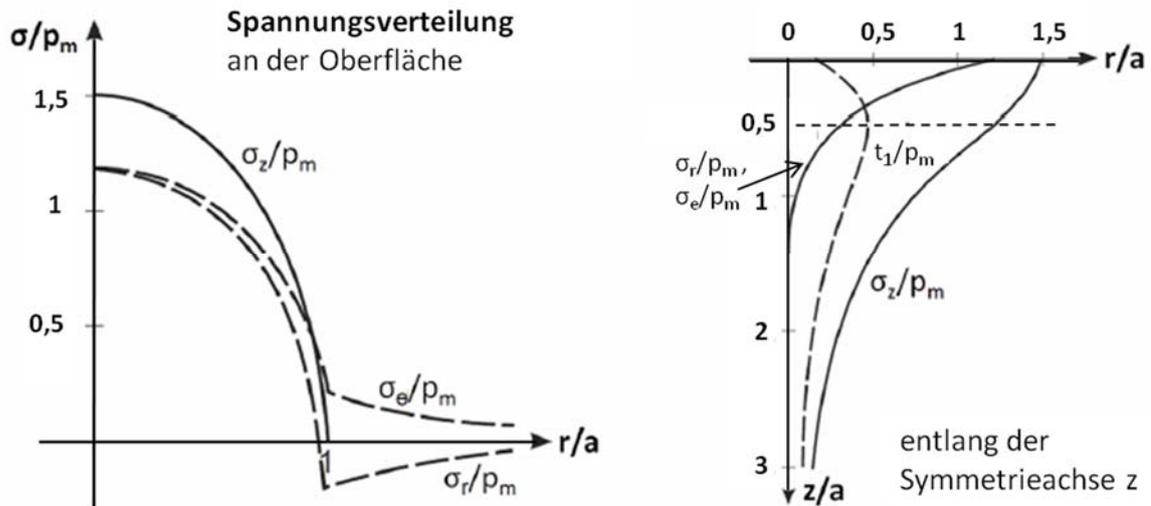


Abbildung 20: Spannungsverteilung eines kugelförmigen Eindringkörpers in eine Oberfläche (vgl. [18], [33])

Abbildung 20 zeigt die Spannungsverteilung in Folge des Kontakts eines kugelförmigen Eindringkörpers mit einer Oberfläche. Links ist die Spannungsverteilung der *Von-Mises*-Spannung an der Oberfläche angeführt, rechts entlang der Symmetrieachse z (vgl. Abbildung 19). Es zeigt sich, dass die Spannung entlang der Achse z in einer bestimmten Tiefe unterhalb der Probenfläche maximal wird. Dies geschieht etwa bei einer Tiefe, die der Hälfte des Kontaktflächenradius a entspricht ($z \approx 0,5 \cdot a$). Am Ort des Maximums wird die Fließspannung zuerst erreicht, sodass dort mit ersten plastischen Verformungen zu rechnen ist (vgl. [32]).

4.4 Auswirkung von Einschlaggeometrie und Schlagdistanz

Lechner untersucht in [18] Oberflächen und Materialmodifikationen durch Machine Hammer Peening. Es wird eine deutliche Abhängigkeit von Einschlaggeometrie und Schlagdistanz beschrieben. Sowohl die Tiefe des Einschlags, als auch der Durchmesser steigen mit Erhöhung des Hubs annähernd linear. Abbildung 21 zeigt diesen Zusammenhang bei einer Hubdistanz von 0,2mm bis 1,3mm. Links ist die Einschlagtiefe in μm auf der Skala aufgetragen, auf der rechten Seite die Einschlagdurchmesser ebenfalls in μm . Lechner schließt aus der plastischen Deformation, dass der Hub der maßgebliche Einfluss auf das Umformpotential des MHP-Prozesses mittels elektromagnetischen Aktuators darstellt. Außerdem wurde die Schlagkraft nahe der Wirkungsstelle mittels eines Stößels mit appliziertem Dehnmessstreifen gemessen. Auf diese Weise konnte eine Erhöhung der Schlagkraft bei steigender Hubhöhe messtechnisch nachgewiesen werden (vgl. [18]).

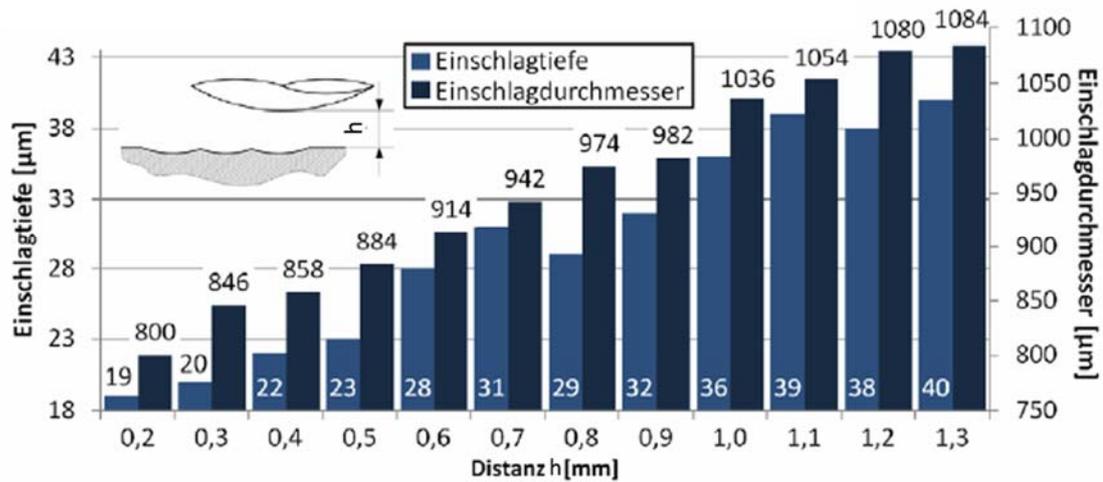


Abbildung 21: Auswertung der Einschlaggeometrie in Abhängigkeit der Schlagdistanz (vgl. [18])

Neben der Schlagkraft stellt die Geometrie des Eindringkörpers eine maßgebliche Einflussgröße dar. Die größten Tiefenwerte konnten bei einem MHP-Werkzeug mit $D=8\text{mm}$ gemessen werden, verglichen mit Werkzeugen mit 6mm und 10mm Durchmesser. Diesen Umstand führt Lechner auf für elektromagnetische MHP-Werkzeuge typische Abplattungen an der Werkzeugspitze zurück (vgl. [18]).

Eine weitere signifikante Einflussgröße ist die Härte des Werkstücks. Sie führt auch dazu, dass härtere Werkstoffe ein hohes Glättungspotential aufweisen. In den meisten Anwendungsfällen ist die Prozessenergie ausreichend, um vorhandene Topographiemerkmale vorangegangener Bearbeitungsschritte, wie Fräsriefen, umzuformen (vgl. [18]).

Abschließend kann man sagen, dass sämtliche untersuchten Parameter Einfluss auf die plastische Deformation haben. Geringere Einzelabdrucktiefen können durch einen höheren Kugeldurchmesser, reduzierten Hub sowie durch Vorliegen eines härteren Werkstücks herbeigeführt werden. Im Zuge des Einschlags kommt es zu einer exakten Übertragung der Geometrie der Stößelkugel, wobei die Eindrucktiefe von etwaigen Formabweichungen des Werkzeugs abhängig ist (vgl. [18]).

4.5 Materialverteilung durch die MHP-Bearbeitung

Durch eine flächenmäßige Bearbeitung mittels Machine Hammer Peening kommt es zu einer Materialverteilung. Dieser Effekt wurde in [18] von Lechner anhand von Werkstoffproben des Materials C45E (1.1191) genauer untersucht. Der verwendete Hammerkopf hatte einen Durchmesser von 8mm . Es wurden mehrere

Versuchsbahnen mit unterschiedlichen Längen und variierenden Schlagdistanzen erstellt. Sechs Bahngruppen, Hub $h_1=0,2\text{mm}$ bis $h_6=1,2\text{mm}$ mit Steigerungen von jeweils $0,2\text{mm}$, mit jeweils vier unterschiedlichen Längen ($L_1=70\text{mm}$, $L_2=0,75*L_1$, $L_3=0,5*L_1$, $L_4=0,25*L_1$) wurden erstellt. Es wurden in Summe drei verschiedene derartige Versuchsfelder erzeugt, die sich durch eine Variation des Bahnabstands l_p ($0,1\text{mm}$; $0,3\text{mm}$; $0,5\text{mm}$) unterscheiden. Die Vorschubgeschwindigkeit v wurde dabei derart angepasst, dass der Eindrucksabstand a zu der vorherigen Bahn passte. Dies ergab einen einheitlichen Matrixabstand $l_p=a$ (vgl. [18]).

Abbildung 22 zeigt in Darstellung a) das Versuchsfeld mit den sechs Bahngruppen und der von unten nach oben abnehmenden Zahl an Bahnen, die durch die abnehmende Prozesslänge mittels MHP erzeugt wurden. Die Darstellung b) zeigt einen Profilschnitt durch die sechs Gruppen mit von links nach rechts zunehmendem Hub (h_1 bis h_6) an der Stelle, wo vier Bearbeitungen durchgeführt wurden. Die Abbildung c) zeigt eine Überlagerung eines Einschlags der zwei- und dreimal bearbeiteten fünften Bahngruppe ($h_5=1\text{mm}$). Die Aufnahmen wurden mittels Alicona InfiniteFocus-Messsystems stellt (vgl. [18]).

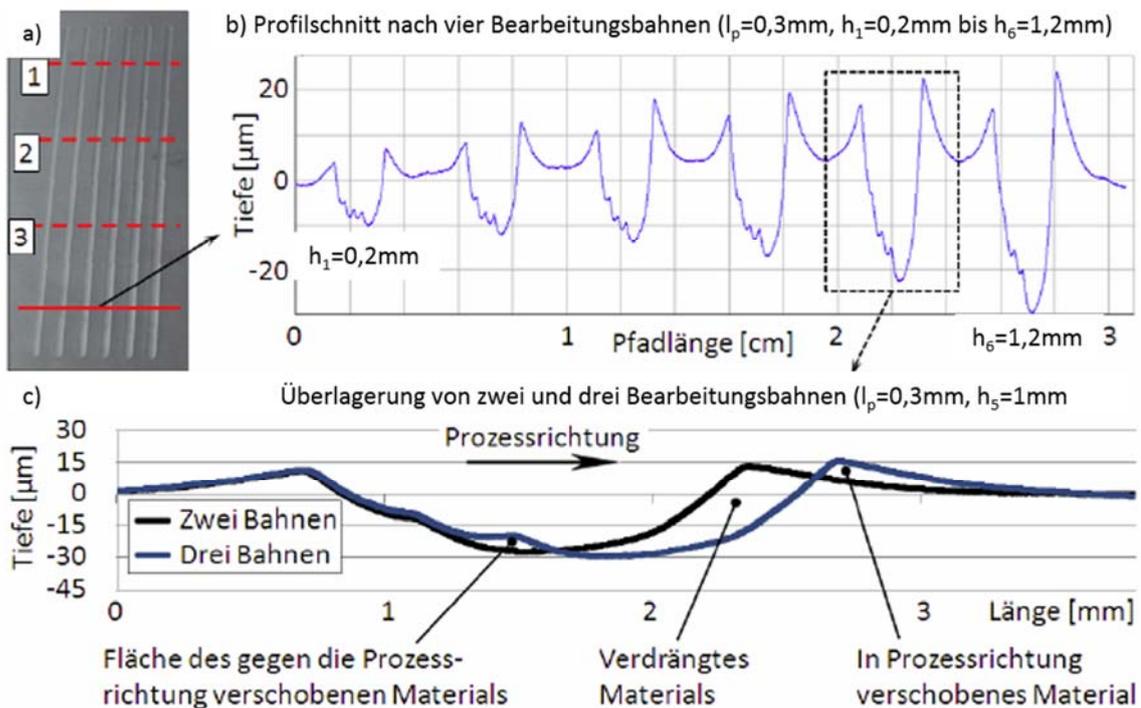


Abbildung 22: Bahnweise Flächenbearbeitung: a) Überlagerte Einzelbahnen und Messpositionen für die Profilerstellung; b) Profilschnitt durch die Probe an der Stelle von vier Bearbeitungsbahnen; c) Überlagerung zweier Profilschnitte zur Bestimmung der Materialanteilsflächen (vgl. [18])

Wie in Abbildung 22 c) ersichtlich, wird das Material durch die dritte Bearbeitung einerseits in Prozessrichtung verschoben, andererseits ein kleiner Teil gegen die

Prozessrichtung der vorangegangenen Bearbeitungsbahn, verdrängt. Die wesentlichen Versuchsergebnisse von Lechner sind in Abbildung 23 angegeben. Die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Überlagerungen (Ebenen zu erster, erster zu zweiter, zweiter zu dritter und dritter zu vierter Bearbeitungsbahn) sind in Balkendiagrammen dargestellt. Es ist leicht ersichtlich, dass der Hub einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der Differenzflächen und damit auch auf eine zunehmende plastische Verformung hat (vgl. [18]).

Weiters ist ersichtlich, dass die Fläche des verdrängten Materials deutlich höher ansteigt als jene Flächen, die dem verschobenen Anteilen zuzuordnendem Material entsprechen. Insbesondere bei einem Matrixabstand $l_p=a=0,1\text{mm}$ entsteht eine signifikante Differenz zwischen verschobenem und verdrängtem Material, wie Lechner feststellt. Die Fläche des verdrängten Materials überwiegt bei weitem die Summe des verschobenen, dargestellt durch den weißen Balken in Abbildung 23 (vgl. [18]).

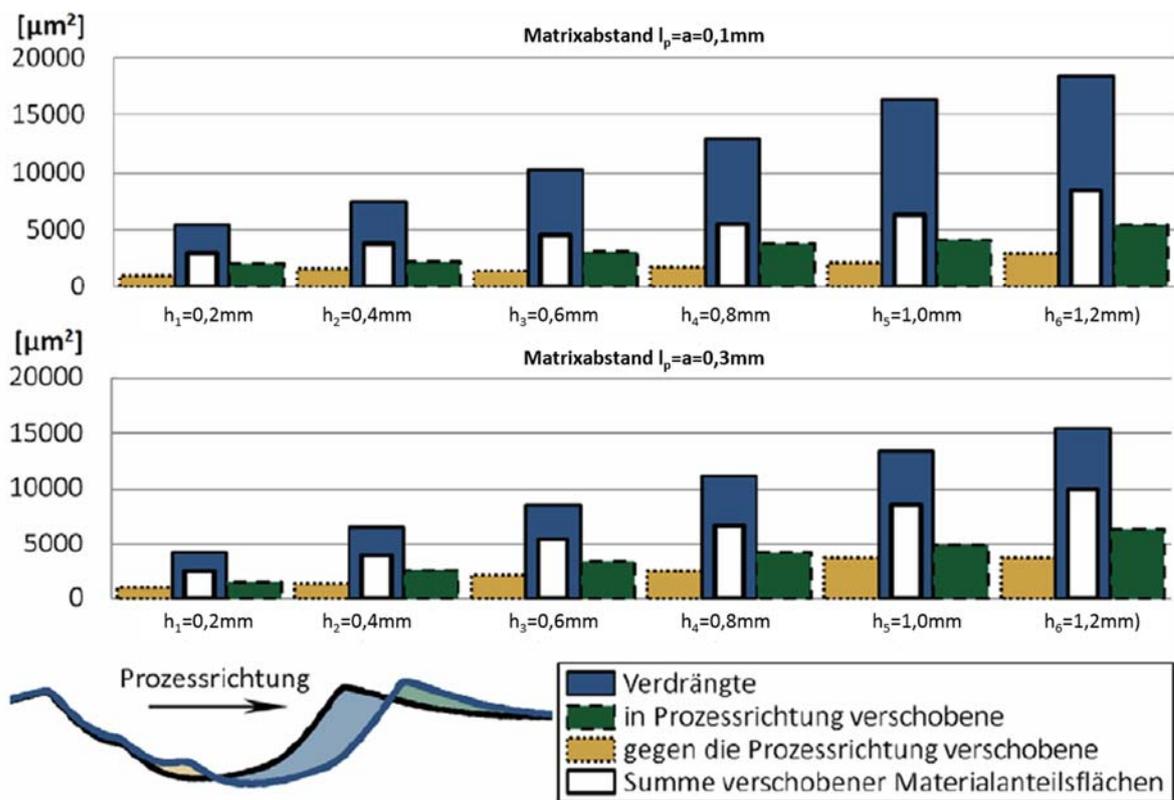


Abbildung 23: Verdrängte Materialanteilsflächen in Abhängigkeit des Hubs (vgl. [18])

Infolge der Erhöhung des Matrixwertes $l_p=a$ verschiebt sich dieses Verhältnis zu Gunsten des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials. Abbildung 24 zeigt das schematisch. Bei einem geringen Bahnabstand liegt der Großteil des Materials, welches umgeformt wird, in Prozessrichtung vor der Symmetrielinie des MHP-Kugelkopfes. Erhöht sich der Bahnabstand, so liegt immer mehr Material hinter der Symmetrielinie und wird dadurch in entgegengesetzter Richtung des Prozesses

verdrängt, wodurch der Anteil in Prozessrichtung verringert wird. Der Bahnabstand steht damit in direktem Zusammenhang mit der prozessrichtungsbezogenen Materialverteilung. Die nach der Bearbeitung der einzelnen Bahnen vorliegende Verteilung kann damit durch Variation der Parameter beeinflusst werden (vgl. [18]).

Durch die Überlagerung mehrerer Bearbeitungsbahnen ist ein gewisser Einlaufbereich am Beginn der Flächenbearbeitung zu erkennen. Es bildet sich ein Übergangsbereich zwischen unbearbeiteter und bearbeiteter Fläche aus. Es zeigt sich, dass durch den Prozessfortschritt durch die Rückführung von Material in die ersten Bahnen diese teilweise wieder mit Material gefüllt werden. In Abbildung 25 ist die Überlagerung von einer, sechs und zwölf Bahnen mit einem Matrixabstand $l_p = a = 0,1 \text{ mm}$ und einem Hub $h = 1 \text{ mm}$ dargestellt (vgl. [18]).

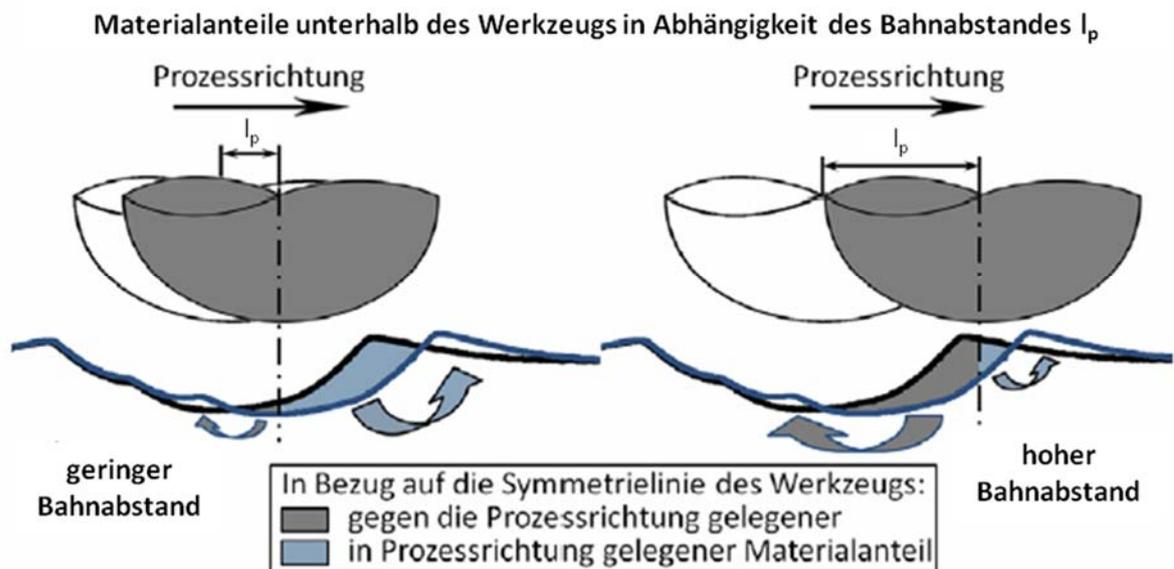


Abbildung 24: Bahnabstandsabhängige Materialausrichtung unterhalb des Werkzeugs (vgl. [18]).

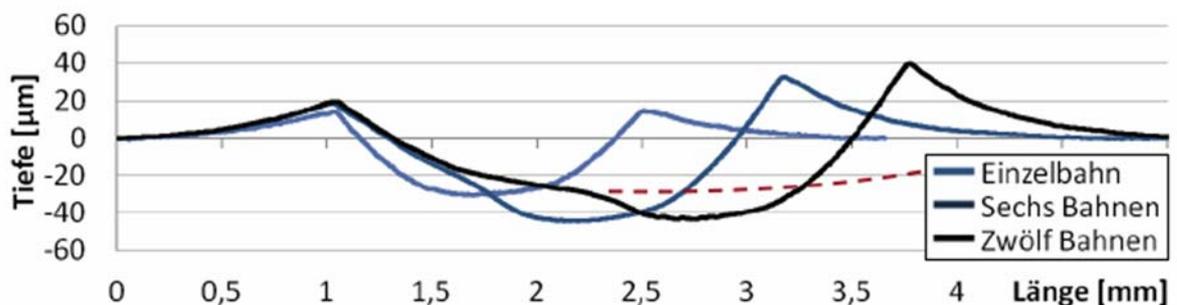


Abbildung 25: Prozesseinlaufphase durch Überlagerung von einer, sechs und zwölf Bahnen ($d = 8 \text{ mm}$, $l_p = a = 0,1 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$) (vgl. [18]).

Im weiteren Verlauf der Bearbeitung gleichen sich die Höhenniveaus an. Letztendlich führt dies zu einem Höhenniveau, welches dem der unbearbeiteten Oberflächen entspricht wie in Abbildung 26 links zu sehen ist. Mit den verwendeten Parametern ($d=8\text{mm}$, $l_p=a=0,1\text{mm}$, $h=1\text{mm}$) bei dem Werkstoff C45E tritt diese Angleichung des Niveaus nach $3,8\text{mm}$ ein. In Abbildung 25 ist dieser zu erwartende Profilverlauf durch eine rote unterbrochene Linie dargestellt. Die in der ersten Bearbeitungsbahn aufgeworfene „Materialkante“ behindert zunächst eine ausreichende Verschiebung von Material gegen die Prozessrichtung. Zusätzlich kann in der ersten Bahn eine Erhöhung der „Materialkante“ in Prozessrichtung beobachtet werden. Rechts ist in Abbildung 26 ein typisches Ende der Bearbeitung zu sehen. Am Übergang der MHP-bearbeiteten zur unbearbeiteten Oberfläche zeigt sich ebenfalls eine „Materialkante“, die durch die Bearbeitung in Prozessrichtung entstanden ist. Diese Aufwerfung von Werkstück-Werkstoff kann durch eine geeignete Strategie verringert beziehungsweise vollständig vermieden werden (vgl. [18]).

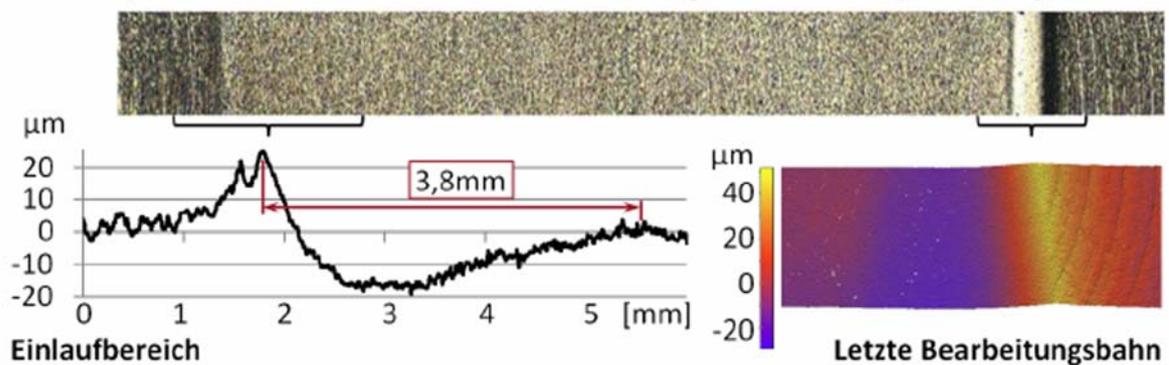


Abbildung 26: Übergangsbereiche des bearbeiteten MHP-Feldes (vgl. [18])

Da dieser Effekt am stärksten bei der letzten Bearbeitungsbahn auftritt, bietet es sich an, hier die Prozessparameter zu adaptieren. Bei der stark ausgeprägten letzten Bahn entsteht durch das in Prozessrichtung getriebene Material eine „Materialkante“. Die Erhaltung der Funktionalität der bearbeiteten Bauteile hat bei der Wahl der Prozessstrategie die höchste Bedeutung, da eine falsche Parameter-Wahl zu ungewollten Veränderungen der Bauteilgeometrie führen kann. Zu diesem Zweck bietet die CAM-Software der Firma accurapuls die Möglichkeit die Grenzen des Bearbeitungsbereichs zu beeinflussen, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Durch die Definition eines „Kantenschutz“-Bereichs kann die Prozessführung angepasst werden. Dieser Bereich beschneidet das eigentliche Bearbeitungsfeld, die letzte Bahn wird von einer zu schützenden Geometrie versetzt. Zusätzlich ist es möglich, die Schlagdistanz sukzessive zu reduzieren, wodurch die Schlagenergie im Übergangsbereich gemindert wird was letztlich die plastische Verformung reduziert (vgl. [18]).

Abbildung 27 zeigt in Abbildung a) die Prozessrichtung und den Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu gefräster Fläche auf einem Probenstück. Hier ist deutlich die Materialaufhäufung der letzten Bearbeitungsbahn ohne Kantenschutzstrategie zu sehen.

Lechner untersucht in [18] verschiedene Kantenschutzstrategien. Zu diesem Zweck wurden zwei Referenzfelder, eines ohne Kantenschutz und eines mit der durch die CAM-Software vorgegebenen Schutzeinstellungen erzeugt. Zusätzlich wurden eigene Strategien programmiert, wo durch welche eine geeignete Materialführung ein möglichst gleichmäßiger Übergang zwischen der MHP-bearbeiteten und der unbearbeiteten, plangefrästen Materialoberfläche gewährleistet werden kann. Als Probenstück wurde der Werkstoff 1.1191 (C45E) gewählt. Die verwendeten MHP-Parameter für das Ausgangsfeld sind in Tabelle 1 ersichtlich und für alle Tests gleich gelassen worden (vgl. [18]).

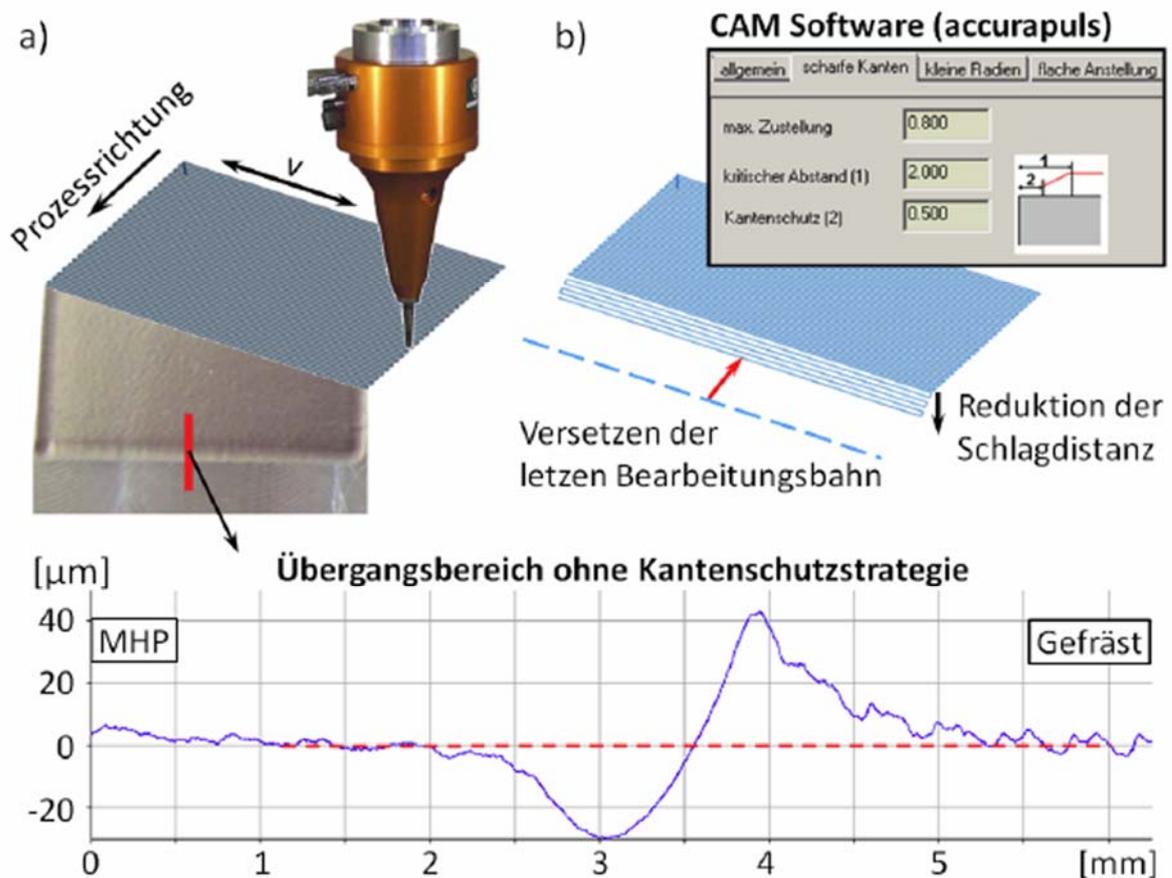


Abbildung 27: a) Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu gefräster Fläche b) Einstellungen der Kantenschutzfunktion in der accurapuls CAM-Software (vgl. [18]).

Testfelder (C45E)	Einheit	Parameter
Durchmesser Hartmetallkugel d	mm	8
Bahnabstand l_p	mm	0,2
Hub h	mm	1
Vorschubgeschwindigkeit v	mm/min	2400
Frequenz f	Hz	200

Tabelle 1: Parameter der Ausgangsfelder (vgl. [18])

Die letzten Bahnen jedes Testfeldes wurden anschließend mit unterschiedlichen Schutzstrategien bearbeitet. Hierbei wurde der Bahnabstand l_p und der Hub h variiert. Eine Illustration der Strategien sowie die veränderten Parameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden die Übergangsbereiche der mittels MHP-bearbeiteten Flächen zur unbearbeiteten untersucht. Der Fokus lag dabei auf der Bestimmung der durch die Bearbeitung auftretenden Vertiefungen und Aufwerfungen, die zu geometrischen Änderungen des Bauteils führen. Vermessen wurden die Übergangsbereiche mittels Alicona InfiniteFocus, unter Einsatz eines Objektivs mit 10-facher Vergrößerung. Durch die Methode der Fokusvariation entsteht so ein Datensatz, der präzise Höheninformationen enthält. Diese erlauben die Erstellung von Schnittprofilen der relevanten Stellen. In Abbildung 28 ist die Auswertung dargestellt. Oben in der Abbildung ist der Alicona InfiniteFocus Bild-Datensatz mit den Höheninformationen zu sehen. Links ist der MHP-bearbeitete Bereich, rechts die gefräste Fläche zu sehen, mit der markanten Übergangzone in der Mitte. Der rote Balken stellt die Grundlage für die Erstellung des Höhenprofils dar. Hierbei wurden für alle Strategien immer 200 Datenpunkte zur Profilerstellung herangezogen (vgl. [18]).

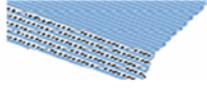
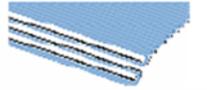
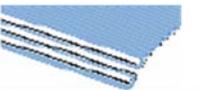
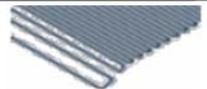
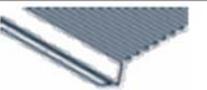
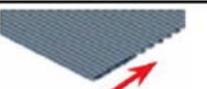
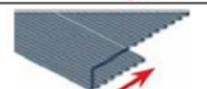
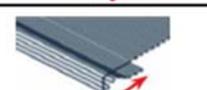
Strategie	Bahnabstand l_p [mm]	Hub h [mm]	Illustration der Strategie
Ohne	-	-	
CAM	0,2/0,2/0,2/0,2	Reduziert auf 0,2	
01	0,3/0,3/0,3/0,1	0,3/0,3/0,3/0,1	
02	0,5/0,5	0,5/0,5	
03	0,5/0,3/0,2	0,5/0,3/0,2	
04	0,4/0,2/0,2/0,2	0,4/0,2/0,2/0,2	
05	1/-0,2/-0,2/-0,2/-0,2	0,6	
06	0,2/0,3/0,5	Reduziert auf 0,6	
07	0,2/0,3/0,5	0,2/0,4/0,6	
08	0,2/0,4/0,4	0,2/0,5/0,5	
09	2 / 10x -0,2	1	
10	2 / 10x -0,2	Reduziert auf 0,1	
11	2 / 10x -0,2	0,1	
12	2 / 15x -0,2	0,1	
13	2 / 15x -0,2	0,1/0,2/0,3/0,4/2x0,5/ 0,4/0,3/0,2/6x0,1	

Tabelle 2: Darstellung der Kantenschutzstrategien und Parameter (vgl. [18])

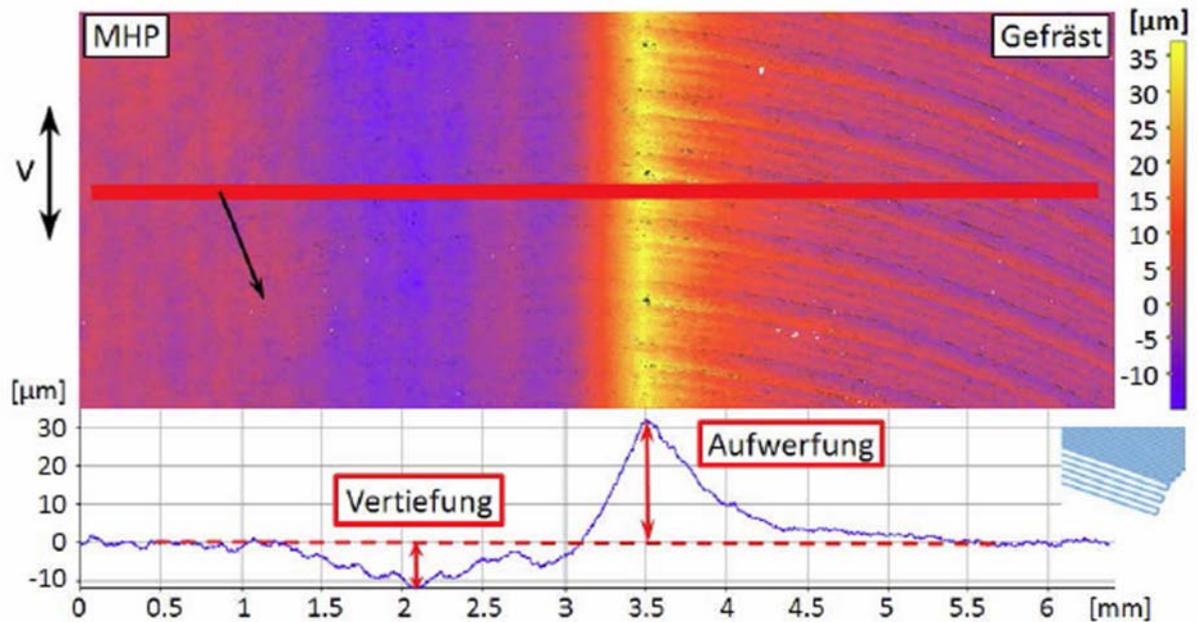


Abbildung 28: Beispielhafte Auswertung zur Bewertung der Kantenschutzstrategie (vgl. [18])

Als am zielführendsten für die Vermeidung eines großen Materialkamms haben sich die Strategien, welche auf eine Änderung der Bearbeitungsrichtung zum Kantenschutz setzen, erwiesen. Hierbei kommt es erst zu einem großen Bahnabstand l_p um anschließend auf einen negativen Bahnabstand von $-0,2\text{mm}$ überzugehen. Dadurch wird Material, welches sich zum Ende der normalen Bearbeitung angehäuft hat, sukzessive wieder zurückgeführt und somit die Höhendifferenz verringert. Die Werte der Strategien 10 und 13 im Bereich der Vertiefung liegen im Bereich des durch die CAM-Software erstellten Schutzes. Zusätzlich konnte die gemessene Materialaufwerfung deutlich reduziert werden. Insbesondere Strategie 13, welche auf eine zweckmäßige Variation des Hubs setzt und somit die Schlagenergie anpasst, zeigt sehr günstige Werte in allen Bereichen (vgl. [18]).

Strategie	Bahnabstand l_p [mm]	Hub h [mm]	Aufwerfung [μm]	Vertiefung [μm]	Differenz [μm]
Ohne	-	-	43,28	29,16	72,44
CAM	0,2/0,2/0,2/0,2	Reduziert auf 0,2	31,48	11,65	43,13
01	0,3/0,3/0,3/0,1	0,3/0,3/0,3/0,1	29,37	14,12	43,49
02	0,5/0,5	0,5/0,5	16,44	23,82	40,26
03	0,5/0,3/0,2	0,5/0,3/0,2	26,20	22,31	48,51
04	0,4/0,2/0,2/0,2	0,4/0,2/0,2/0,2	28,52	16,37	44,89
05	1/-0,2/-0,2/-0,2/-0,2	0,6	26,73	26,65	65,38
06	0,2/0,3/0,5	Reduziert auf 0,6	34,21	15,22	49,43
07	0,2/0,3/0,5	0,2/0,4/0,6	32,13	20,55	52,68
08	0,2/0,4/0,4	0,2/0,5/0,5	28,11	21,14	49,25
09	2 / 10x -0,2	1	22,98	28,57	51,55
10	2 / 10x -0,2	Reduziert auf 0,1	19,97	10,62	30,59
11	2 / 10x -0,2	0,1	28,47	21,82	50,29
12	2 / 15x -0,2	0,1	29,21	17,00	46,21
13	2 / 15x -0,2	0,1/0,2/0,3/0,4/2x0,5/ 0,4/0,3/0,2/6x0,1	8,31	13,00	21,31

Abbildung 29: Auswertung der getesteten Kantenschutz-Strategien (vgl. [18])

Generell kann zusammengefasst werden, dass ein Kantenschutz jedenfalls den Übergangsbereich verbessert. Durch Optimierung der Strategie sind gute Ergebnisse zu erreichen. Durch zielgerichtete Variation der Schlagdistanz kann der Übergangsbereich signifikant verbessert und eingeebnet werden. Strategie 13 weist

eine vergleichbare Vertiefung wie die CAM-Strategie auf, wobei ein Materialkamm größtenteils unterbunden werden kann. Der erreichte Höchstwert von $8,31\mu\text{m}$ der Materialanhäufung ist eine Reduktion von 73,6% gegenüber der vorgeschlagenen CAM-Strategie, die einen Maximalwert von $31,48\mu\text{m}$ aufweist (vgl. [18]).

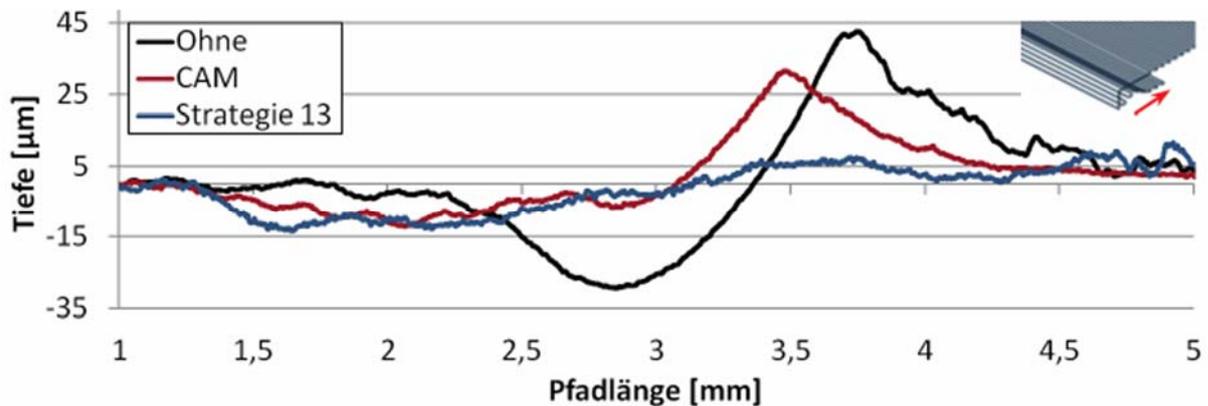


Abbildung 30: Höhenprofile der Versuche ohne Kantenschutz, mit CAM-Strategie und Strategie 13 (vgl. [18])

4.6 Vergleich mit materialabtragenden Verfahren

Durch Fräs- und Schleifverfahren ist es durchaus möglich, hohe Eigenspannungen in die Werkzeugoberfläche einzubringen. In diesem Kapitel wird ein Vergleich zum Einbringen von Eigenspannungen in die äußeren Randschichten mehrerer spanabhebender Verfahren mit MHP präsentiert.

Lechner hat in [18] Versuche an einer zylindrischen Testscheibe aus dem vergüteten Werkzeugstahl 1.2067 (100Cr6) mit einer Ausgangshärte von 54HRC durchgeführt, mit dem primären Ziel, Druckeigenspannungen durch die MHP-Bearbeitung einzubringen. Die Methode der Auswertung und das verwendete Material ermöglichten hierbei einen direkten Vergleich mit jenen von Jawahir et al. in [34] publizierten Ergebnisse über die Einbringung von Eigenspannungen und Steigerung der Härte von Proben an der Randschicht. Als Ziel wurde von Jawahir et al. vorgegeben, dass die Proben nach der Bearbeitung Druckeigenspannungen von etwa -200MPa und eine leichte Härtesteigerung aufweisen sollen, wobei das Bearbeitungsverfahren und die Parameter frei zu wählen waren.

Um die Einbringung von Druckeigenspannungen zu begünstigen, wurde die Schlagdistanz h auf $4,3\text{mm}$ erhöht. Dies wurde möglich, indem die vergleichsweise geringe Schlagfrequenz f von 100Hz gewählt wurde. Weiters wurde eine spiralförmige Prozessstrategie gewählt, die von der Probenmitte nach außen an den Rand geführt wurde. Die Hauptrichtung der Druckeigenspannungen sollte dadurch in radiale

Richtung gelegt werden. Die weiteren Prozessparameter sind in Tabelle 3 dargestellt (vgl. [18]).

Um eine genaue Vergleichbarkeit mit [34] herzustellen, wurde die bearbeitete Probe am Foundation Institute of Materials Science (IWT, Bremen) mit denselben Methoden und den gleichen Messeinrichtungen wie in [34] untersucht. Dadurch ermöglichte sich ein Vergleich der Eigenspannungszustände der MHP-bearbeiteten Probe mit den Eigenspannungsverläufen der in [34] verglichenen spanabhebenden Verfahren (vgl. [18]).

Testscheibe (100Cr6)	Einheit	Parameter
Durchmesser Hartmetallkugel d	mm	8
Bahnabstand l_p	mm	0,1
Hub h	mm	4,3
Vorschubgeschwindigkeit v	mm/min	600
Frequenz f	Hz	100

Tabelle 3: Prozessparameter der Bearbeitung der zylindrischen Testscheibe (vgl. [18])

In den Grafiken in Abbildung 31 bis Abbildung 33 dargestellten Daten, werden die Eigenspannungen an der Probenoberfläche, der Druckspannungsmaximalwert und das Eigenspannungstiefenprofil vergleichend bewertet. Unter den Diagrammen stehen jeweils ausgewählte Prozessparameter der verwendeten Verfahren. Es werden Fräs- (milling, M), Schleif- (grinding, G), Dreh- (turning, T) und Läppprozesse (fine grinding, FG) mit dem MHP-Prozess verglichen (vgl. [18]).

Wie in Abbildung 31 ersichtlich, zeigen viele Proben deutliche Druckeigenspannungswerte nach der Bearbeitung. Die Fräs- und Schleifprozesse erreichen Maximalwerte von circa -800MPa. Die Testprobe, die mit MHP bearbeitet wurde, konnte diese Werte mit -1065MPa deutlich übertreffen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch unterhalb der Materialoberfläche, wo die maximalen Druckeigenspannungen gefunden werden können, wie in Abbildung 32 dargestellt ist. Das erreichte Druckspannungsmaximum von -1150MPa kann nur von Fräsprozessen annähernd erreicht werden. Abhängig von Prozessparametern können allerdings auch beim Fräsen geringere Werte resultieren (vgl. [18]).

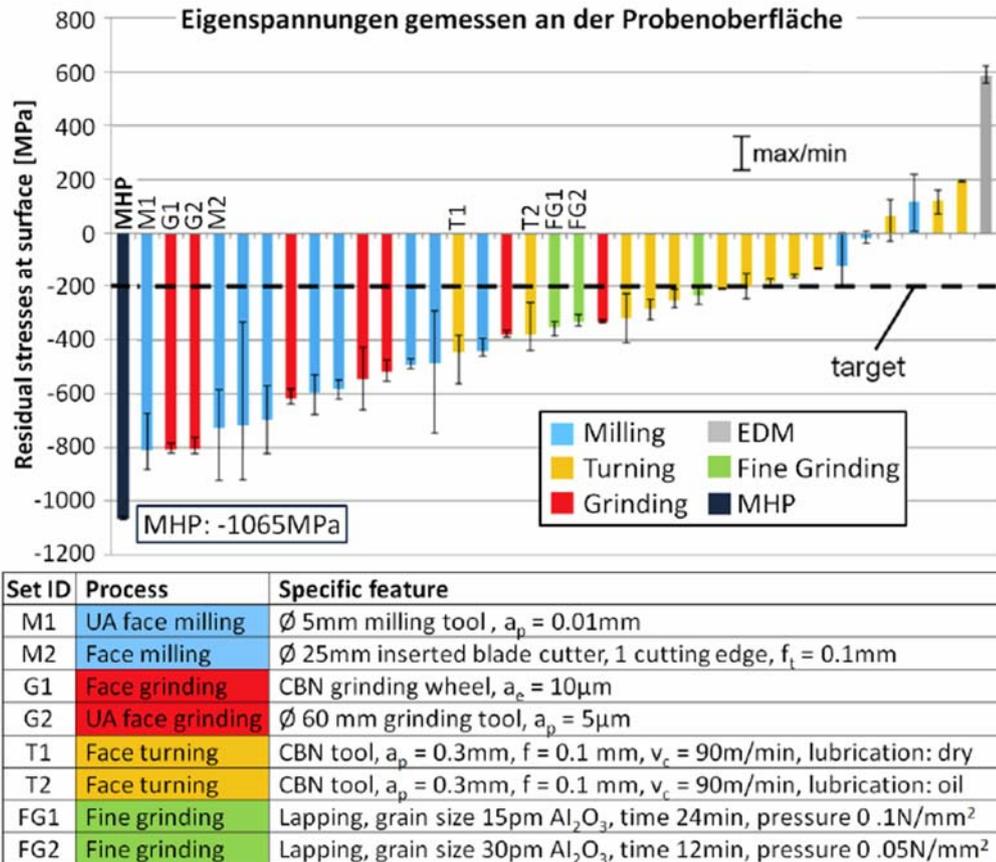


Abbildung 31: Eigenspannungen an der Probenoberfläche und Prozessparameter (vgl. [18], [34])

In Abbildung 33 ist neben den maximalen Eigenspannungen auch die Tiefenwirkung zu sehen. Hierbei zeigt sich, dass das MHP bearbeitete Probenstück noch bis zu einer Tiefe von 350 μm unter der Oberfläche Eigenspannungen aufweist. Der finale Nulldurchgang, also der Wechsel von Druck- auf Zugspannungen, wurde in einer Tiefe von 945 μm gefunden. Einige der mittels spanabhebenden Verfahren bearbeiteten Proben wurden nur bis zu einer Tiefe von 250 μm ausgewertet, dies macht eine Vergleichbarkeit in der endgültigen Tiefe nicht möglich (vgl. [34]).

Die hier dargestellten Betrachtungen legen nahe, dass nach einer formgebenden Bearbeitung durch eine MHP-Bearbeitung der Eigenspannungszustand, auch gegenüber von Fräsbearbeitungen, deutlich verbessert werden kann (vgl. [18]).

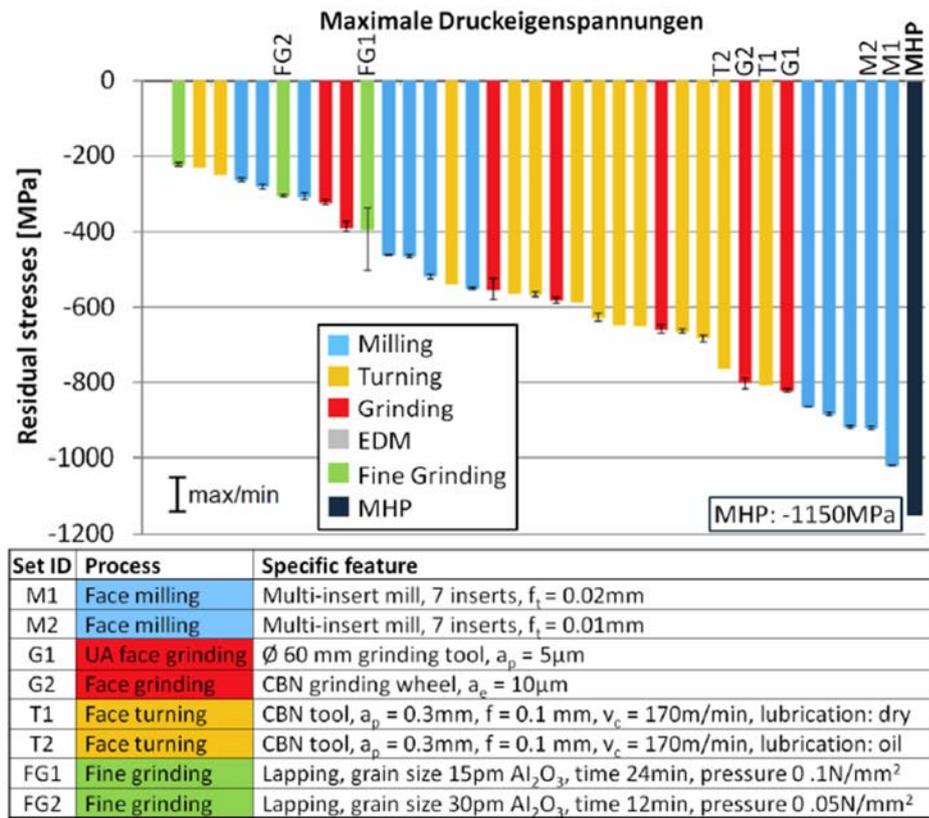


Abbildung 32: Maximale Druckeigenspannungen und Prozessparameter (vgl. [18], [34])

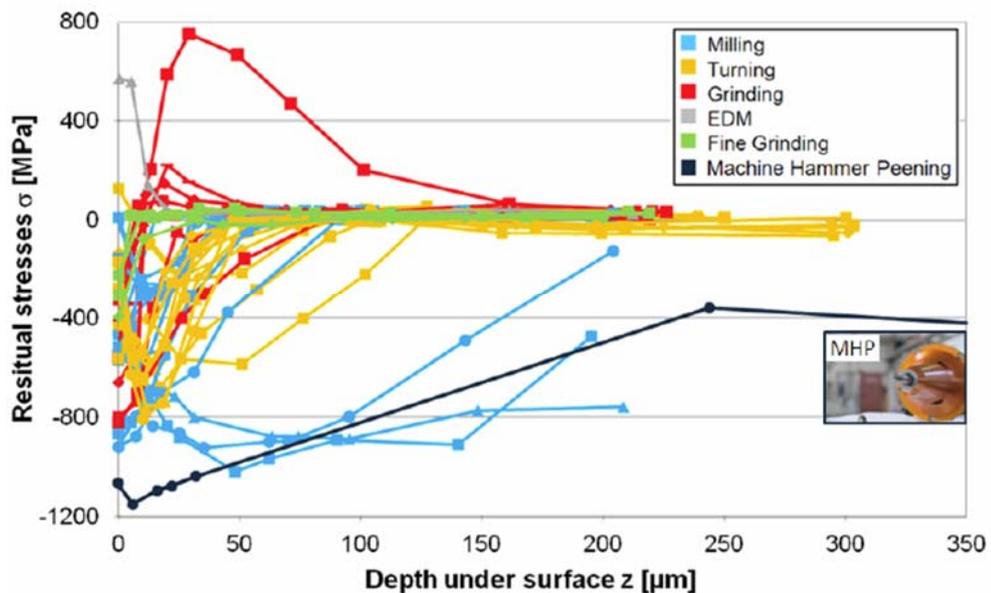


Abbildung 33: Eigenspannungstiefenprofile (vgl. [18], [34])

Nachdem die Wirkmechanismen von Machine Hammer Peening beleuchtet wurden und ein Vergleich zu anderen materialabtragenden Verfahren angestellt wurde, folgt

die praktische Anwendung. In den folgenden Kapiteln wird MHP auf seine Potentiale im Werkzeug und Formenbau untersucht.

5 Potentiale von MHP im Werkzeugbau

Auf Grundlage der erarbeiteten Wirkmechanismen wurden Versuche an Werkzeugen durchgeführt, um die Eignung von MHP im Werkzeugbau zu testen.

Alle folgenden Versuche wurden im Labor für Produktionstechnik des IFT der TU Wien durchgeführt. Zum Einsatz kam eine konventionelle drei-achsige Werkzeugmaschine HAAS VF3. Diese Maschine bietet mit 1016x508x635mm (X-, Y-, Z-Achse) einen größeren Bearbeitungsraum. Der Aktuator wird dabei mittels einer SK-40-Aufnahme direkt in der Maschinenspindel eingespannt. Die zweite Werkzeugmaschine, die ebenfalls im Labor für Produktionstechnik zur Verfügung steht, ist ein Hermle C20U Bearbeitungszentrum. Dabei handelt es sich um eine fünf-Achs-Maschine. Drei der Achsen sind translatorische Achsen mit Verfahrenswegen von 600x450x450mm (X-, Y-, Z-Achse). Der Schwenktisch stellt die vierte Achse dar und hat einen Schwenkbereich von $\pm 115^\circ$ um die X-Achse. Der Schwenktisch trägt die fünfte Achse in Form eines Drehtisches, der sich um 360° drehen lässt. Der MHP-Aktuator wurde mittels eines Adapters montiert, der um die Werkzeugspindel herum angebracht wurde. Dies ermöglicht eine genaue Ausrichtung und Fixierung des Werkzeuges.

Der elektromagnetische Aktuator für die MHP-Bearbeitung hatte verschiedene Werkzeug-Stößel mit Hartmetallkugeldurchmessern zwischen 5 und 10mm mit einer jeweiligen Härte von 90 HRC.

5.1 Ziel der Versuche

Als Teil des CORNET Projekts „Total Efficiency Control“ wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Dabei handelt es sich einerseits um Materialtests, die zum Ziel hatten, Parameter für die Bearbeitung eines Spritzgusswerkzeugs, welches im Rahmen des Projekts gebaut wurde, zu finden. Andererseits wurde MHP auf ausgewählte Werkzeuge angewendet. Ziel dabei war es, die Eignung der Technologie im Werkzeug- und Formenbau zu erproben, um eine Prozesskettenverkürzung oder Modifikation zu erreichen.

Die Härtemessungen an der Bauteiloberfläche wurden mit einem TIV-Härteprüfgerät der Firma Krautkrämer durchgeführt. Die Messsonde hat Prüfkraft von 10N (Modell P101). Das Verfahren des TIV beruht auf einem Vickersdiamanten, der als Eindringkörper fungiert auf welchen die Prüfkraft manuell über eine Feder aufgebracht wird. Mittels einer in der Prüfsonde integrierten CCD-Kamera wird bei Erreichen der Prüfkraft durch den Eindringkörper hindurch eine Aufnahme des erzeugten Eindrucks erstellt. Die Härte wird unter Last gemessen und leitet sich aus der Länge der beiden Diagonalen des Eindrucks ab (vgl. [35]).

An der Oberfläche gemessene Rauheitswerte wurden mittels Messgerät MarSurf PS1 (Firma Mahr) ermittelt. Das mobile Gerät arbeitet nach dem Tastschrittverfahren und die Messergebnisse stellen den jeweils arithmetischen Mittelwert von sechs Einzelmessungen dar. Die Streuung der einzelnen Messwerte wird durch die Standardabweichung angegeben.

Mittels Alicona InfiniteFocus wurden Messungen an den Werkstück-Oberflächen durchgeführt. Das Messgerät verwendet das Prinzip der Fokus-Variation, ein Verfahren zur 3D-Oberflächenmessung von Bauteilgeometrien. Aus einer Serie von Einzelbildern entsteht durch Variation des Abstands zwischen Optik und Messobjekt ein dreidimensionales Bild. Mithilfe der von Alicona bereitgestellten Messmodule lassen sich Bauteilgeometrien, wie Radien und Rauheit, sowie Schneidkantenmessungen und Formabweichungen genau bestimmen. Die geringe Schärfentiefe der Optik ermöglicht es, genaue Tiefeninformationen einer Oberfläche zu erhalten (vgl. [36]).

5.2 Materialversuche an einem Referenzwerkzeug

Ein Referenzwerkzeug, das zur Validierung der Forschungsergebnisse vorgesehen war, wurde von der Werkzeugbauakademie Aachen gefertigt. Dabei handelte es sich um ein Spritzgusswerkzeug zur Fertigung eines Eiskratzers mit zweifacher Kavität. Dieses Werkzeug wurde herkömmlich gefertigt und vor, sowie nach dem Einsatz in der Produktion vermessen, um die Abnutzung zu dokumentieren. Zur Steigerung der Fertigungseffizienz eines Nachfolgewerkzeuges wurden anschließend Versuche mit den verwendeten Materialien durchgeführt. Optimierungspotentiale ergeben sich bei den Formeinsätzen der Spritzgussform und den dazugehörigen Kernschiebern durch eine Prozesskettenverkürzung. Hierbei wurde die Schlichtfräsbearbeitung sowie der anschließende Poliervorgang durch MHP ersetzt. Ziel war die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Ausgangs- und Endrauheit des bearbeiteten Materials. Als Einflussgrößen sind die MHP-Parameter, die Bearbeitungsstrategie und das zu bearbeitende Material sowie dessen Eigenschaften zu nennen. Die relevanten Teile des Spritzgusswerkzeuges, die vier Kernschieber sowie zwei der vier Formeinsätze sind in Abbildung 34 zu sehen. Weiters sind die Spritzgussteile, die durch das Referenzwerkzeug gefertigt wurden abgebildet. Die Kernschieber haben eine formgebende Funktion und dienen nach dem Spritzgussprozess zum Entformen der Spritzgussteile.

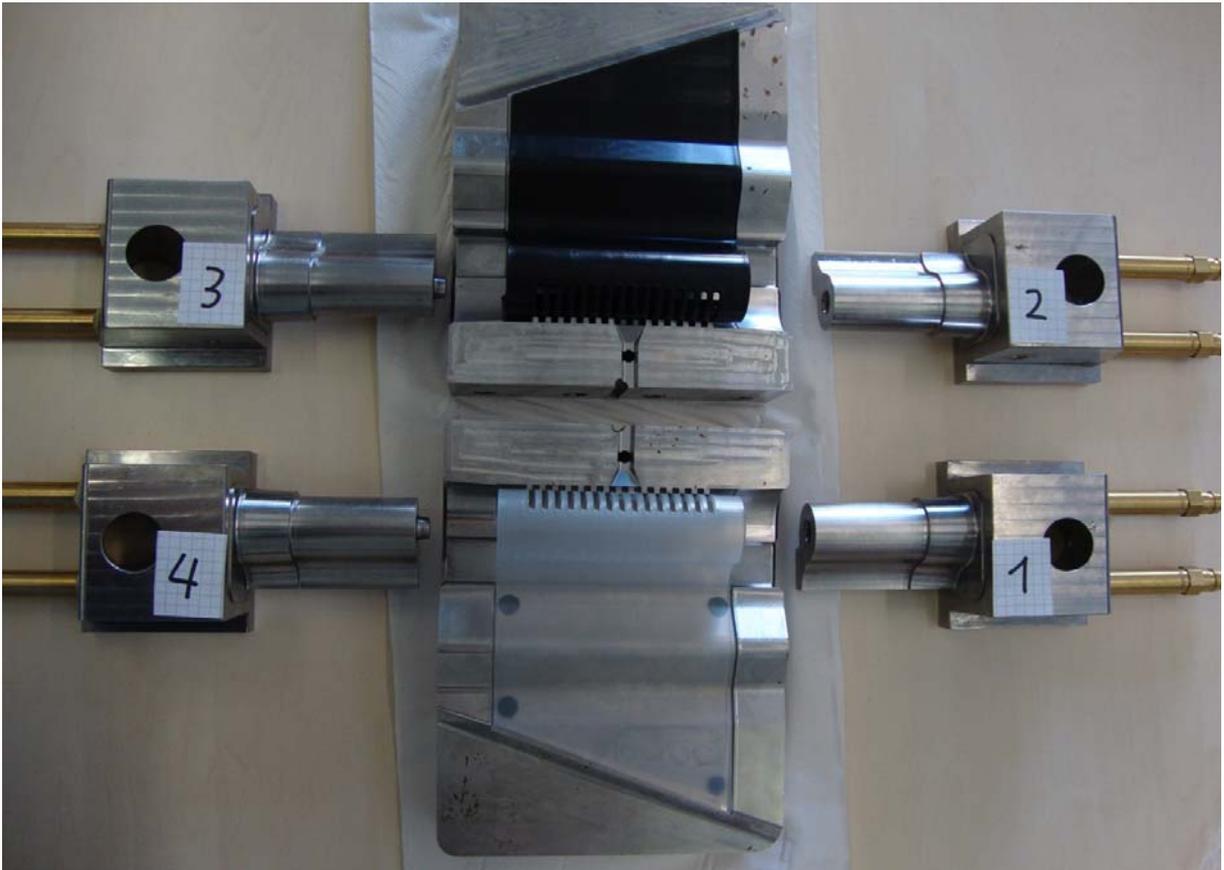


Abbildung 34: Referenzwerkzeug mit Spritzgussteilen

Zur Findung von Prozessparametern für das verbesserte Referenzwerkzeug wurden Materialproben der verwendeten Stähle als Werkstücke verwendet. Die Formeinsätze bestanden aus dem Werkstoff 1.2767 (45NiCrMo16), die Kernschieber aus 1.2842 (90MnCrV8), beides häufig verwendete Werkzeugstähle. Um die Beschaffenheit eines vorgefrästen Formeinsatzes beziehungsweise Kernschiebers gut widerzuspiegeln, wurden die Proben mit einem Kugelfräser mit 10mm Durchmesser überfräst. Angenommen wurde dabei, dass nach dem Fräsen eine Oberflächenrauheit von $R_a = 2-3\mu\text{m}$ normal zur Fräsrichtung vorhanden sein sollte. In Tabelle 4 sind die Fräseparameter und die erzielte Rauheit der beiden Werkstoffproben aufgelistet. Die Materialproben sind in Abbildung 35 zu sehen.

Fräsparameter	Einheit	Werte
Drehzahl n	1/min	2100
Schnitttiefe a_p	mm	0,2
Abstand der Fräsbahnen a_e	mm	0,47
Schnittgeschwindigkeit v_c	m/min	66
Vorschub f	mm/min	2700
Erzielte Rauheit R_a für 1.2767	μm	2,1
Härte für 1.2767	HRC	51
Erzielte Rauheit R_a für 1.2842	μm	2,55
Härte für 1.2842	HRC	51

Tabelle 4: Fräsparameter und erzielte Werte

Ausgehend von Ergebnissen nach dem Fräsen wurden mehrere Strategien des Machine Hammer Peenings getestet. Diese Strategien wurden auf beide Proben gleichermaßen angewandt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie Rückschlüsse auf Unterschiede im Materialverhalten zu ermöglichen.

Es wurden drei Strategien festgelegt und für jede Strategie zwei Durchläufe. Im ersten Durchlauf mit Vorschub in y-Richtung wurde ein großer Hub gewählt. Dies ermöglicht das Einbringen einer hohen Schlagenergie in das Werkstück, um die durch das Fräsen entstandenen Unebenheiten zu glätten. Im zweiten Durchlauf, Vorschub in x-Richtung, wird mit einer um 90° gedrehten Vorschubrichtung, geringerer Hub und geringerem Bahnabstand gearbeitet. Dadurch wird das Werkstück weiter geglättet. Die Strategien unterscheiden sich in Bahnabstand, Vorschubgeschwindigkeit und Eindruckabstand. Jede Strategie wurde in einem eigenen Feld auf den Werkstücken angewandt. Tabelle 5 zeigt die gesammelten Parameter der drei verwendeten Strategien, die in jeweils einem vordefinierten Feld am Werkstück getestet wurden.

Hartmetallkugel Durchmesser 10mm		Einheit	Feld 1	Feld 2	Feld 3
1. Durchlauf	Bahnabstand l_p	mm	0,1	0,1	0,14
	Hub h	mm	0,9	0,9	0,95
	Vorschubgeschwindigkeit v	mm/min	1200	1200	1680
	Frequenz f	Hz	200	200	200
	Eindruckabstand a	mm	0,1	0,1	0,14
2. Durchlauf	Bahnabstand l_p	mm	0,05	0,05	0,07
	Hub h	mm	0,3	0,3	0,3
	Vorschubgeschwindigkeit v	mm/min	600	900	1260
	Frequenz f	Hz	200	300	300
	Eindruckabstand a	mm	0,05	0,05	0,07

Tabelle 5: MHP-Parameter und erzielte Werte für die Materialproben

Die Vermessung der Ergebnisse fand in den Feldern der drei Strategien statt. Als Vergleich diente eine ebenfalls definierte Referenzfläche, welche die Oberflächenbeschaffenheit nach dem Fräsen repräsentiert.

Abbildung 35 zeigt in den oberen beiden Bildern (a) und (b) die Pfade, den das Werkzeug beim MHP zurücklegt. In den Abbildungen (c) und (e) sind die erzielten R_a -Werte in μm sowie die zugehörigen Bearbeitungsfelder und die Referenzfläche (Ref) zu sehen. Die Bilder (d) und (f) der Abbildung zeigen den Spiegel- und Glättungseffekt an der Oberfläche der Materialproben.

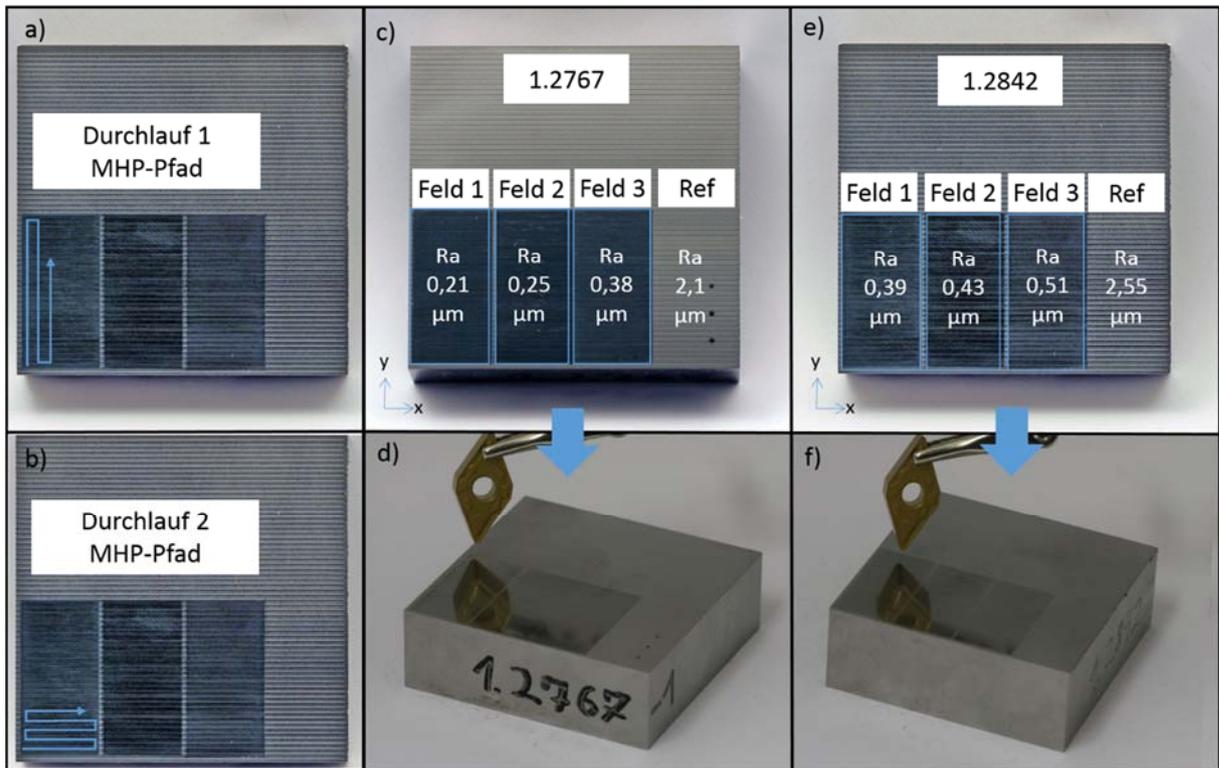


Abbildung 35: (a), (b) Pfade der beiden MHP-Durchläufe; (c), (e) Materialproben mit Ra-Werten; (d), (f) Proben mit optischem Glättungseffekt

Die gesammelten Ergebnisse der Versuche, ausgehend von den nach dem Fräsen hergestellten Oberflächeneigenschaften, sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Rauheit der Oberfläche konnte signifikant verringert werden, was zu einem Glättungseffekt der Oberfläche führt. Durch Strategie 1 an der Probe des Formeinsatzes (1.2767) konnte die Rauheit auf 10% der Ausgangsrauheit gesenkt werden. Die Härtesteigerungen befinden sich mit 7,8% bis knapp über 10% im erwarteten und erwünschten Bereich. Die höhere Vorschubgeschwindigkeit in Strategie 3 führt einerseits zu geringerer Bearbeitungszeit der Proben, andererseits zu vergleichsweise schlechteren Ergebnissen. So sind sowohl die Rauheiten höher als bei Strategie 1 und 2 als auch die Härtesteigerungen weniger hoch.

Ergebnisse der 3 Bearbeitungsstrategien		Dauer der Bearbeitung in Minuten	Rauheit R_a			Härte			
			Einheit	vorher	nachher	Einheit	vorher	nachher	Steigerung in Prozent
Materialprobe 1.2767	Strategie 1	20	μm	2,1	0,21	HRC	51	56,2	10,2%
	Strategie 2	13	μm		0,25	HRC		55,6	9,0%
	Strategie 3	6,8	μm		0,38	HRC		55	7,8%
Materialprobe 1.2842	Strategie 1	20	μm	2,55	0,39	HRC	51	55,4	8,6%
	Strategie 2	13	μm		0,43	HRC		55,6	9,0%
	Strategie 3	6,8	μm		0,51	HRC		55	7,8%

Tabelle 6: Ergebnisse der Bearbeitung der Materialproben

Aus den gewonnenen Werten lässt sich eine Abhängigkeit zwischen Bearbeitungszeit und der erzielten Oberflächenrauheit erkennen, wie in Abbildung 36 zu sehen ist. Es konnte gezeigt werden, dass sich geeignete Prozessparameter finden lassen, um ausgehend von einer definierten Ausgangsrauheit eine durch MHP erzielte Endrauheit abzuleiten. Im Rückschluss lassen sich für gewünschte Endrauheit nach einer MHP-Bearbeitung Soll-Ausgangsrauheiten nach der Fräsbearbeitung ermitteln. Da die Rauheit nach der Fräsbearbeitung durchaus vergleichsweise hoch sein darf, besteht die Möglichkeit, dass die Schlichtfräsprozesse, die üblicherweise an das Schrappen anschließen, zumindest dort weggelassen werden können, wo eine weitere Bearbeitung mittels MHP stattfindet. MHP übernimmt in diesen Teilen des Werkstücks die Funktion des Schlichtens. Dies setzt voraus, dass die gewünschten Maß- und Lagetoleranzen durch den Schrappprozess erreichbar sind.

Daraus ergibt sich das Potential der zeitlichen Optimierung der Prozessketten im Werkzeug- und Formenbau für die Bearbeitung verschiedenster Werkstoffe. Durchlaufzeiten und dadurch entstehende Fertigungskosten können gesenkt werden. Zudem kann der meist noch manuell durchgeführte und damit kostenintensive Poliervorgang teilweise oder je nach gewünschter Endoberflächengüte sogar gänzlich substituiert werden.

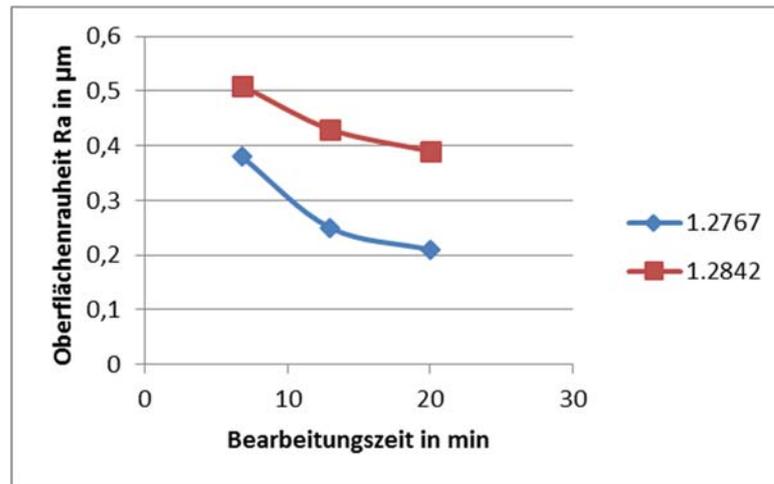


Abbildung 36: Zusammenhang von Oberflächenrauheit und Bearbeitungszeit

5.3 Versuche an Stanzwerkzeugen

Die Unternehmen GW. St. Pölten und Welser Profile stellten einige Stanzwerkzeuge zur Erprobung von MHP zur Verfügung.

Das Ziel der Versuche mit Rundstanzstempeln, die von der Firma GW St. Pölten Proben 1) zur Verfügung gestellt wurden, war die Standzeit der Stempel zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurden neuwertige Stempel vermessen, wovon zwei Stück anschließend geklopft wurden. Die Geklopften wurden daraufhin nach 34.000 Hieben mit nicht geklopften, unbehandelten Stanzstempeln verglichen. Entscheidend für die Qualität des Prozesses ist der Rand des Stempels.

Das Ziel der Versuche mit den Stanzstempeln der Firma Welser (Proben 2) war es, durch MHP die Randschichtenhärte und die Standzeit der Werkzeuge zu erhöhen. Als Referenz diente auch hier ein unbearbeiteter Stempel.

Bei den Werkstücken der Firma GW St. Pölten handelt es sich um 10mm Durchmesser Rundstanzstempel aus 1.2379 (X155CrVMo12-1), einem gebräuchlichen Werkzeugstahl für die Stanztechnik von rost- und säurebeständigen Blechen. Abbildung 37 zeigt die verwendeten Stanzstempel, die bei GW St. Pölten zum Stanzen von Niro-Blechen (1.4301, rost- und säurebeständige Bleche) in einer Nibbelmaschine eingesetzt wurden. Die Hubhöhe beträgt 4,5mm bei einer Frequenz von 240 Hieben pro Minute und einem Vorschub von 18mm/s. Bei Vermessungen der Stempel vor den Versuchen wurde ein Härtewert von 53 HRC festgestellt. Die finale Bearbeitung erfolgte durch einen Schleifprozess, der auch die Oberflächengüte der Stempel erzeugte. Dies ergab normal zur Rillenrichtung der Schleifbearbeitung Rauheitswerte von $R_a = 0,5\mu\text{m}$ ($R_z = 3\mu\text{m}$) beziehungsweise parallel zur Rillenrichtung ein $R_a = 0,15\mu\text{m}$ ($R_z = 0,75\mu\text{m}$).

Die Welser Stempel, die aus 1.2842 (90MnCrV8) bestehen, sind in Abbildung 38 zu sehen. Links befindet sich der unbearbeitete Stempel, in der Mitte und rechts die bearbeiteten. MHP wurde sowohl an der Stirnfläche als auch umfangsseitig angewendet. Vor der Bearbeitung wiesen die Stempel eine Härte von 57 HRC aus. Diese Stempel mussten aufgrund ihrer Geometrie fünf-achsig bearbeitet werden.



Abbildung 37: Stanzstempel der Firma GW St. Pölten (Proben 1)

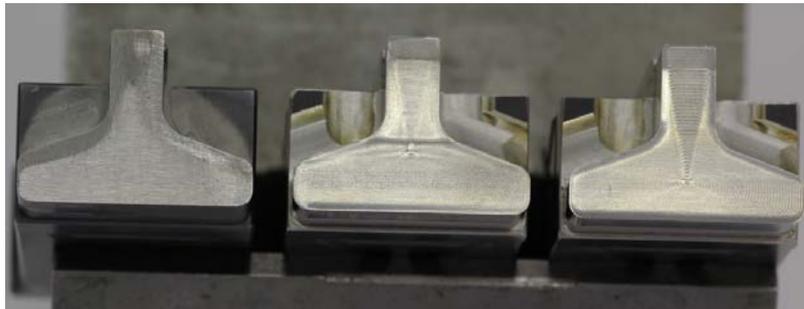


Abbildung 38: Stanzstempel der Firma Welser Profile (Proben 2)

Die Stirnflächen der Proben 1 wurden mit einer Spiralstrategie von außen nach innen bearbeitet, wie in Abbildung 39 dargestellt. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe. Erstens erzeugt die letzte Bahn eine Wölbung und diese ist an der Kante unerwünscht und zweitens können auf diese Weise Druckeigenstressungen in Prozessrichtung eingebracht werden. Der Stempel 1 wurde mit einem Durchmesser von 9,8mm bearbeitet bei einem Hub h von 0,8mm. Bei Stempel 2 wurde der Außendurchmesser mit 9mm festgelegt und der Hub mit $h=1$ mm etwas schonender gewählt. Für beide gelten derselbe Kugeldurchmesser des Aktuatorsystems von 6mm und eine Frequenz von 200Hz bei einem Bahnabstand von 0,05mm. Der Vorschub war jeweils 600mm/min. Zusätzlich wurde ein Kantenschutz (siehe Kapitel 4.5) vorgesehen, bei dem der Hub je nach Distanz zur Kante nur $h=0,3$ mm beträgt.

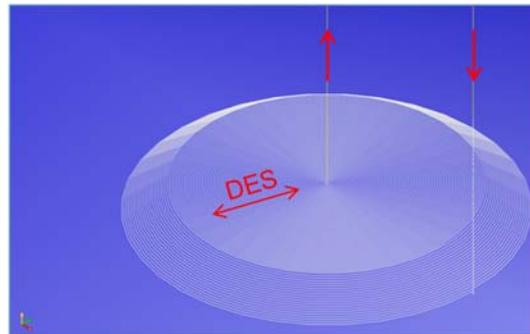


Abbildung 39: Spiralstrategie des Stempels 2 mit Druckeigenspannungen und An- sowie Abfahrtsweg

Für die Stempel der Firma Welser Profile kam, wie in Abbildung 40 dargestellt, eine mehrteilige Strategie zum Einsatz. Umfangsseitig wurde eine Spiralstrategie mit einem Bahnabstand von 0,3mm verwendet. Für die Stirnfläche bearbeitete man das Werkstück mit einer Spiralstrategie mit variierendem Bahnabstand zwischen 0,13mm und 0,3mm. Der Stempel A wurde mit einem Hub von $h=0,6\text{mm}$, Stempel B mit $h=0,8\text{mm}$ bearbeitet. Um die Kante vor Ausbrüchen zu schützen, wurde als Kantenschutz bei der letzten NC-Bahn der Hub h auf 1mm erhöht. Der Vorschub betrug bei beiden Stempeln 1200mm/min bei einer Schlagfrequenz von 200Hz.

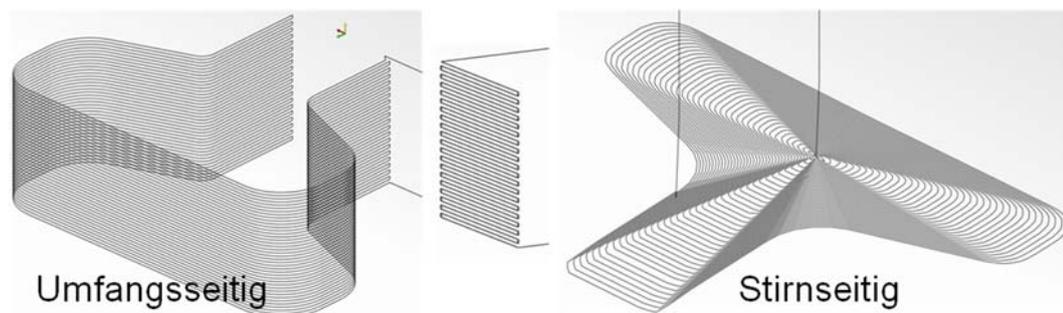


Abbildung 40: Bearbeitungsstrategie der Stempel der Firma Welser

Die Messungen der Rauheit und der Härte der bearbeiteten Werkstücke sind in Tabelle 7 abgebildet. Durch die spiralförmige Bearbeitung der Proben 1 ergibt sich ein einheitliches Rauheitsbild. Stempel 1 erreichte $R_a = 0,08\mu\text{m}$ ($R_z = 0,6\mu\text{m}$), der zweite Stempel, der schonender bearbeitet wurde, ein $R_a = 0,13\mu\text{m}$ ($R_z = 1,08\mu\text{m}$). Die Härte konnte von 53HRC auf 65HRC bei beiden Stanzwerkzeugen erhöht werden. Als problematisch stellte sich eine sichtbare Verformung der Kante bei Stempel 1 heraus. Dies hätte zu einem massiven Qualitätsverlust geführt und so wurde der Stempel nach Rücksprache mit GW St. Pölten nicht für die Produktion verwendet und

auch nicht weiter betrachtet. Stempel 2 genügte dank des Kantenschutzes den Anforderungen, wurde in der Produktion eingesetzt und der Verschleiß dokumentiert.

Stempel GW St. Pölten		Einheit	Stempel 1	Stempel 2
Durchmesser Hartmetallkugel d		mm	6	6
Bahnabstand l_p		mm	0,05	0,05
Schlagabstand h		mm	0,8	1
Vorschub v		mm/min	600	600
Frequenz f		Hz	200	200
Eindruckabstand a		m	0,05	0,05
Ergebnisse	Einheit	Unbearbeiteter Stempel	Stempel 1	Stempel 2
Härte	HRC	53	65	65
Resultierende Rauheit Ra	μm	0,5	0,08	0,13

Tabelle 7: Härte und Rauheit der Stanzstempel der Firma GW St. Pölten

In Abbildung 41 sind Mikroskop-Aufnahmen einiger markanter Stellen der Stempel zu sehen. Der unbearbeitete Stempel weist nach 34.000 Hieben ein wesentlich geringeres Verschleißverhalten auf als der MHP-bearbeitete. Bei diesem sind deutliche Deformationen und auch Ausbrüche zu erkennen. Dies resultiert daraus, dass durch die MHP-Bearbeitung Material leicht über die Kante geschoben und somit diese Stellen anfälliger für Verschleiß wurden. Die Kerbbildung ist bei dem bearbeiteten Stempel deutlich höher. Der Verschleiß tritt nicht regelmäßig auf.



Abbildung 41: Vergleich der Kanten mittels Mikroskopaufnahmen

Die Proben 2 der Firma Welser Profile wurden lediglich nach der MHP-Bearbeitung vermessen und anschließend dem Unternehmen wieder übergeben, um in der Fertigung eingesetzt zu werden. Bei der Härtemessung ergab sich eine Steigerung von 57 HRC auf 59 HRC bei dem Stempel A beziehungsweise auf 61,5 HRC bei Stempel B. Dies entspricht Steigerungen um 3,5% und 8%.

Die Rauigkeitswerte wurden an drei Messstellen, wie in Abbildung 42 ersichtlich, evaluiert. Die Rauheitswerte an der Stirnseite zeigten keine besonderen zusätzlichen Glättungseffekte. Abbildung 43 zeigt die Kanten des Stempels A von Welser Profile nach der MHP-Bearbeitung. Hier ist eine eindeutige Deformation über der Kante ersichtlich. Das durch die Bearbeitung nach außen geschobene Material steht über die Kante vor. Dies hat eine Nachbearbeitung bei dem Unternehmen Welser Profile erforderlich gemacht, bevor die Stempel in den Produktionsprozess eingebunden werden konnten.

Die Stempel standen zu Vermessungszwecken nach der Produktion nicht zur Verfügung, das Feedback des Unternehmens war allerdings, dass die MHP-bearbeiteten Stempel keine besseren Ergebnisse erzielen konnten als die herkömmlich verwendeten. Die benötigte Nacharbeit der Stempel hat eher zu einem Mehraufwand geführt.

Tabelle 8 zeigt abschließend die gesammelten Bearbeitungsparameter und Ergebnisse der Proben 2.

Stempel Welser Profile		Einheit	Stempel A	Stempel B	
Umfangsseitig	Durchmesser Hartmetallkugel d	mm	5	5	
	Bahnabstand l_p	mm	0,3	0,3	
	Hub h	mm	0,6	0,8	
	Vorschub v	mm/min	1200	1200	
	Frequenz f	Hz	200	200	
	Eindruckabstand a	mm	0,1	0,1	
Stirnseitig	Durchmesser Hartmetallkugel d	mm	5	5	
	Bahnabstand l_p	mm	0,13 - 0,3	0,13 - 0,3	
	Hub h	mm	0,6	0,8	
	Vorschub v	mm/min	1200	1200	
	Frequenz f	Hz	200	200	
	Eindruckabstand a	mm	0,1	0,1	
Ergebnisse		Einheit	Unbearbeiteter Stempel	Stempel A	Stempel B
Härte		HRC	57	59	61,5
Resultierende Rauheit Ra	Messstelle 1	μm	0,47	0,49	0,42
	Messstelle 2	μm	0,33	0,6	0,57
	Messstelle 3	μm	0,51	1,03	0,48

Tabelle 8: Härte und Rauheit der Proben 2 von Welser Profile

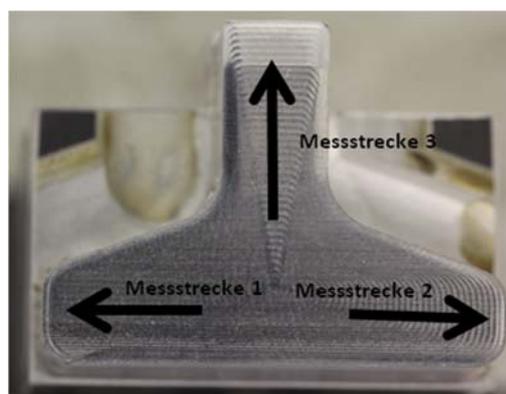


Abbildung 42: Messstrecken für die Rauheitsmessung

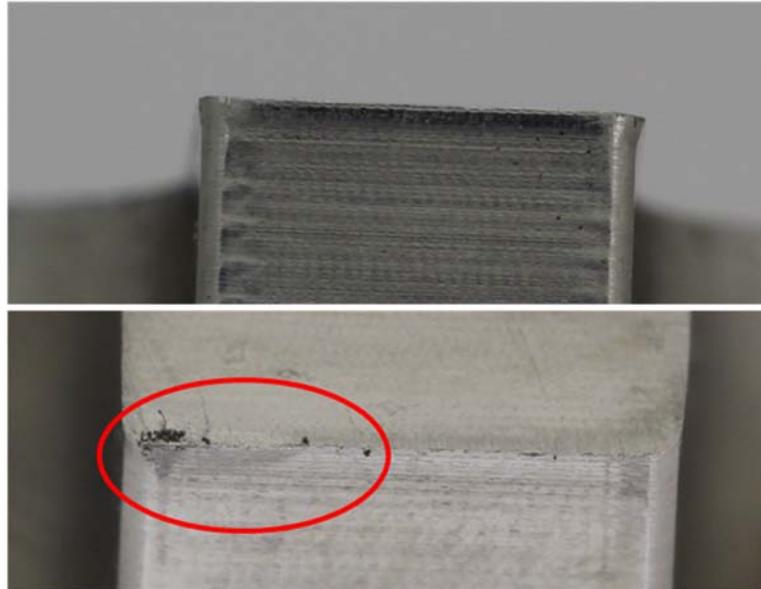


Abbildung 43: Kanten der Welser Stempel nach der MHP-Bearbeitung

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuche mit den Materialproben für das Referenzwerkzeug haben eindeutig gezeigt, dass sich geeignete Prozessparameter finden lassen, um ausgehend einer definierten Rauheit eine Endrauheit abzuleiten. Hierdurch ergibt sich das Potential zeitlicher Optimierung der Prozesskette, da direkt nach einem Schruppprozess das Oberflächenfinish durchgeführt werden kann. Der Polierprozess kann je nach gewünschter Rauheit teilweise oder gänzlich substituiert werden.

Die Versuche mit den Stanzwerkzeugen lieferten nicht die erhofften Ergebnisse. Je nach Einsatz der Stanzwerkzeuge ist die Kante der verschleißintensivste Teil des Werkzeuges. Die Kante ist nicht ohne die Gefahr einer Beschädigung des Werkzeuges zu bearbeiten. Dies führt dazu, dass der MHP-Prozess fast ausschließlich auf die Stirnflächen angewandt wird, an denen kaum Verschleiß auftritt. Die erreichte Rauheit war teilweise schlechter als am unbearbeiteten Stanzstempel. Dies lässt sich auf einen zu geringen Hub und damit einer zu geringen Umformenergie erklären. Der Umformprozess wird nicht ausreichend gleichmäßig durchgeführt und die allenfalls auftretenden Eindrücke des MHP-Werkzeugs erhöhen die Rauheit statt sie zu senken. Eine Möglichkeit wäre es, die Stanzwerkzeuge an einem früheren Prozessschritt zu bearbeiten. Durch die Behandlung der Matrize mit MHP, aus der die Stanzwerkzeuge erodiert werden, könnte die gesamte Geometrie der Stempel bearbeitet werden. In diesem Fall würden auch eventuelle Prozessschritte des Härtens und Polierens entfallen.

6 Potentiale von MHP im Formenbau

In diesem Kapitel wird auf einen konkreten Anwendungsfall von Machine Hammer Peening im Werkzeug- und Formenbau eingegangen. Es wurden Versuche an einer Aluminium-Druckgussform, die das Lebenszyklusende erreicht hatte, durchgeführt um die Tauglichkeit von MHP im Refitting, also dem Reparieren beziehungsweise wieder in den Einsatz bringen von Formen, zu testen.

6.1 Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 44 zu sehen. Der Aktuator (A) ist mittels Werkzeugaufnahme in der HAAS VF3 Werkzeugmaschine befestigt. Darunter befindet sich das Werkstück (B), welches in Kapitel 6.2.2 genauer behandelt wird. Mit (C) ist weiters das Steuerungssystem von accurapuls zu sehen.

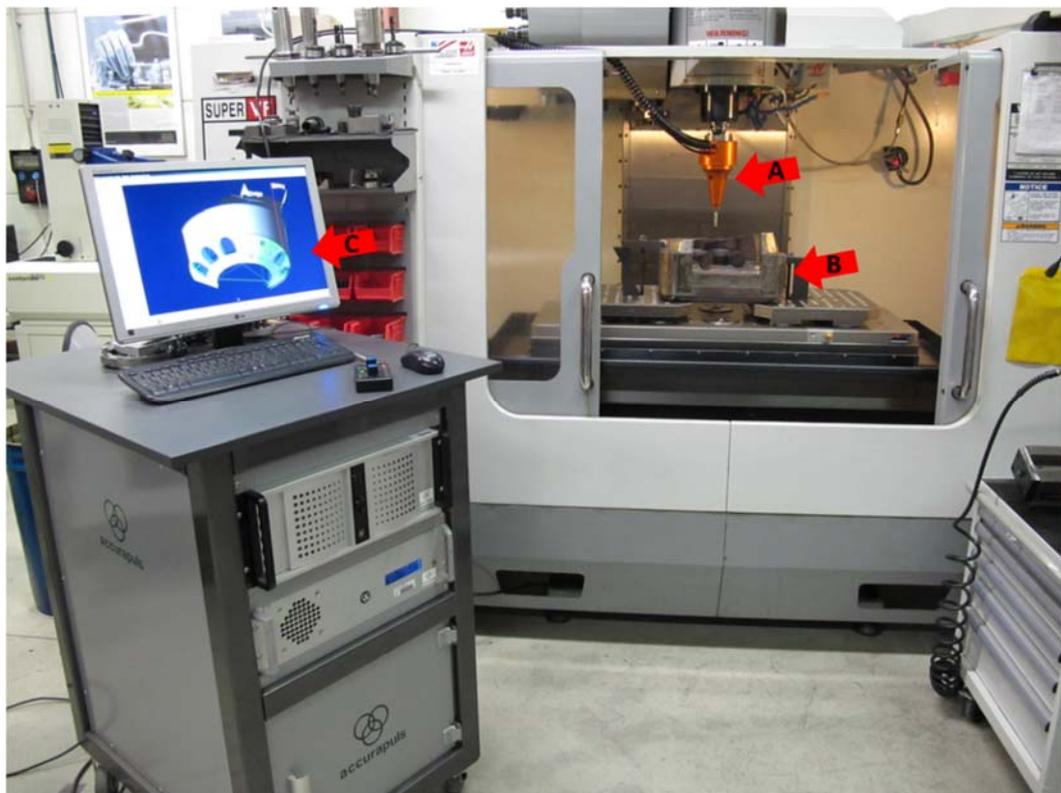


Abbildung 44: Versuchsaufbau Al-Druckgussform

6.1.1 Machine-Hammer-Peening-Aktuator

Das verwendete elektromagnetische Aktuatorssystem der Firma accurapuls wurde in Kapitel 2.2 und Abbildung 7 bereits beschrieben. Das System erzeugt die für den Bearbeitungsvorgang benötigte oszillierende Bewegung des Stößels. Der frei wählbare Frequenzbereich liegt bei etwa 20Hz bis 500Hz und ist stufenlos einstellbar. Um zusätzlich Einfluss auf die Schlagkraft zu nehmen, besteht die Möglichkeit einer ebenfalls stufenlosen Einstellung der sogenannten Größe der Intensität, deren Wert in Prozent angegeben wird. Die Intensität führt zur Beeinflussung der an der Tauchspule anliegenden Stromstärke, die sich, abhängig von der Intensitätsvorgabe, zwischen 1A und 10A bewegt. Die Kühlung der Tauchspule erfolgt während der Bearbeitung durch Druckluft, die über die herkömmliche Maschinenleitung zugeführt wird.

6.1.2 Werkzeugmaschine

Zum Einsatz kam eine konventionelle drei-achsige Werkzeugmaschine VF3 der Marke HAAS. Der elektromagnetische Aktuator für die MHP-Bearbeitung hatte eine Hartmetallkugel mit 10mm Durchmesser und 90 HRC. In Abbildung 45 ist die Al-Druckgussform mit der Spannvorrichtung in der Werkzeugmaschine detailliert zu sehen.

6.2 Versuche Aluminium-Druckgusswerkzeug

Ein Optimierungspotential durch Machine-Hammer-Peening liegt im Refitting, dem Wiederaufbereiten von verschlissenen Werkzeugen. Hierbei werden Werkzeuge, deren Lebenszyklus am Ende angekommen ist, mittels MHP bearbeitet, um die Werkzeuge anschließend wieder in der Produktion einzusetzen.

Gehärtete Stahlformen lassen in der Fertigung hohe Stückzahlen mit großer geometrischer Genauigkeit von endkonturnahen Bauteilen zu. Daher hat sich das Druckgießverfahren besonders in der Automobilindustrie zu einem Standardverfahren für die Herstellung komplexer, dreidimensionaler Bauteile entwickelt. Im Jahr 2010 wurden in Deutschland 432.400 Tonnen Aluminiumformguss mittels Aluminiumdruckguss hergestellt. Mit zunehmender Produktion und weiteren Anwendungsgebieten stieg auch die Bedeutung von Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens (vgl. [37]). Machine-Hammer-Peening könnte einen wichtigen Beitrag zur Verlängerung der Lebensdauer von Al-Druckgussformen leisten.

6.2.1 Ziel der Versuche

Das Ziel der vorliegenden praktischen Anwendung von MHP war es, ein abgenutztes, bereits ausgemustertes Aluminium-Druckgusswerkzeug (siehe Abbildung 45) wieder

für den Einsatz in der Produktion aufzubereiten. Das Werkzeug zeigt an ausgewählten Stellen starke Gebrauchsspuren in Form von Brandrissen. Diese zu schließen, ist das Hauptaugenmerk der Bearbeitung.

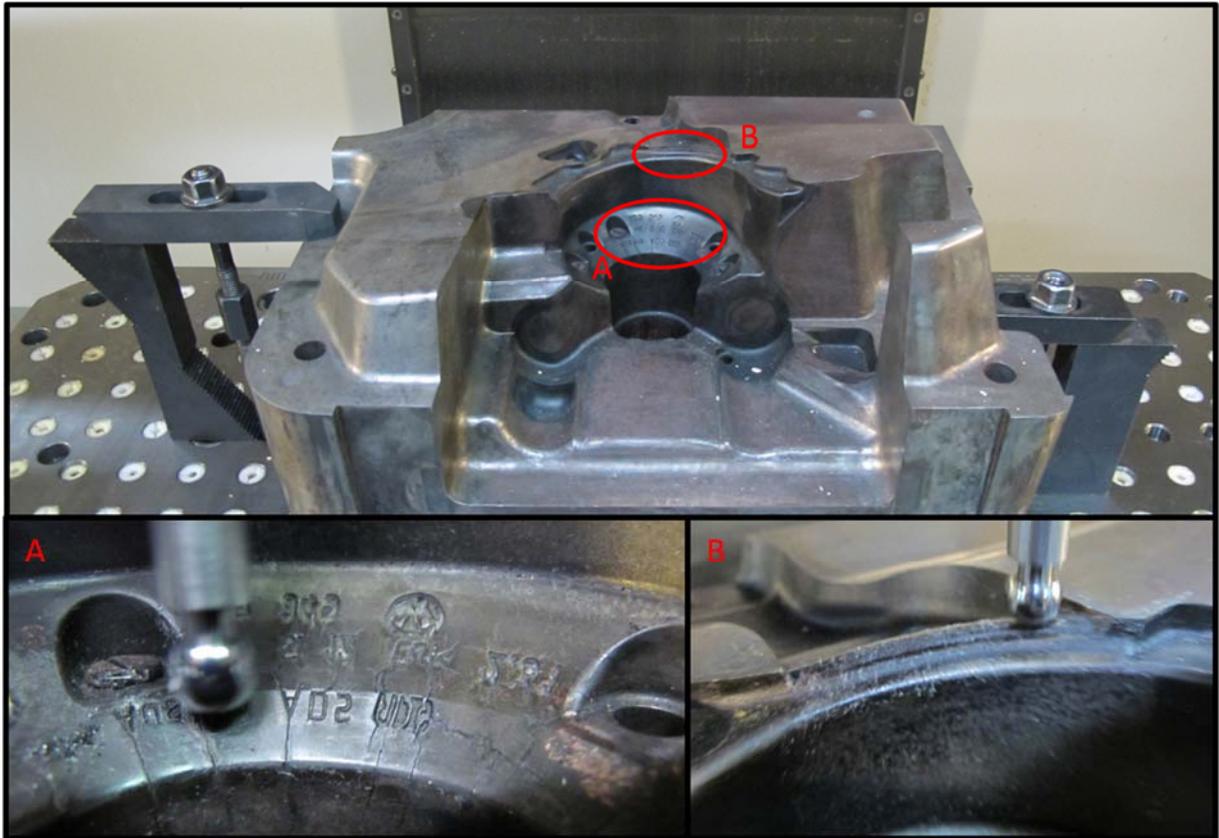


Abbildung 45: Al-Druckgussform in der Maschine eingespannt und Detailansicht der Bearbeitungsstellen

Ein Vergleich der Prozessketten ist in Abbildung 46 abgebildet. Nach der Inbetriebnahme und Werkzeugtests folgt die von ständigen Qualitätskontrollen begleitete Serienfertigung. Vielfach lassen sich Qualitätsprobleme der Serienfertigung durch eine Anpassung der Parameter beim Druckguss beheben treten allerdings wie in dem beschriebenen Werkzeug sogenannte Brandrisse auf, liegt das Qualitätsproblem am Werkzeug selbst. In diesem Fall folgt in der Regel die Ausmusterung des Werkzeugs. Aluminium-Druckgusswerkzeuge sind hochpreisig, daher ist es wichtig, dass möglichst viele Teile gleichbleibender Qualität hergestellt werden, um die Stückpreise gering halten zu können. Je mehr Teile gegossen werden können, desto günstiger gestaltet sich die Produktion. Die Kosten einer MHP-Bearbeitung liegen weit unter den Anschaffungskosten eines neuen Werkzeugs.



Abbildung 46: Prozesskettenvergleich des herkömmlichen und aufbereiteten Werkzeugs

Die bereits beschriebenen Brandrisse, auch Firecracks genannt, zeigen sich auch deutlich als Qualitätsmangel am gegossenen Produkt (Abbildung 47). Links ist in der Abbildung das gesamte Al-Druckguss-Teil abgebildet, rechts sind die von den Brandrissen betroffenen Regionen mit roten Kreisen markiert.

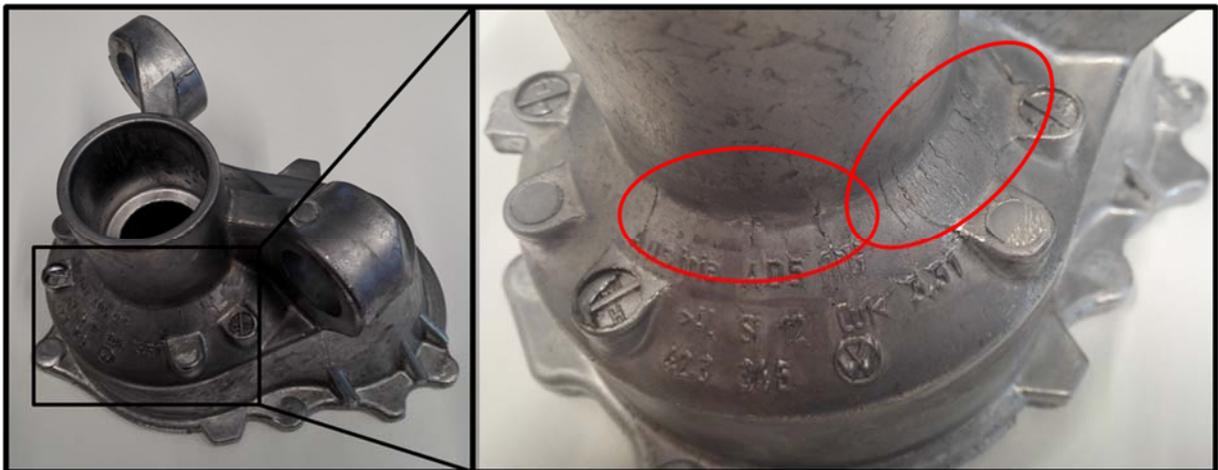


Abbildung 47: Druckguss-Produkt mit Brandrissen

6.2.2 Werkstück

Das Werkstück ist ein Al-Druckgusswerkzeug, welches nach 194.000 Schuss sein Lebensende erreicht hat. Die betroffene Gussform besteht aus dem Warmarbeitsstahl 1.2343 (X38CrMoV5-1), der sich durch gute Brandrissbeständigkeit auszeichnet. Brandrisse treten als Folge von häufigen Temperaturwechseln, die im Al-Druckguss vorkommen, im Oberflächenbereich auf. Warmrisse sind Spannungsrisse, die besonders bei Werkzeugen mit Gravuren und Querschnittsübergängen und Kanten auftreten. Warmrisse reichen im Unterschied zu Brandrissen bis tief in das Werkzeug und können durch gute Warmzähigkeit von Materialien verhindert werden (vgl. [38]).

Beim Al-Druckgussverfahren wird Aluminium im flüssigen oder teigartigen Zustand unter hohem Druck, 100 bis 3.500 bar, in eine vorgewärmte, geteilte Stahlform gepresst. Während des Erstarrungsvorgangs des gegossenen Materials wird der Druck aufrechterhalten. Dadurch ist das Fertigen von komplexen, dünnwandigen Formen mit hoher Oberflächengüte möglich. Die Gießtemperatur beträgt bei Aluminium-Legierungen zwischen 680°C und 780°C. Vorteile des Verfahrens sind die hohe Wirtschaftlichkeit durch hohe Stückzahlen und gute Oberflächen sowie die gute Maßhaltigkeit der Werkstücke. Die Lebensdauer der Stahlformen ist durch die starke Erosion begrenzt, auftretende Brandrisse führen zu einem raschen Lebenszyklusende (vgl. [39]).

Abbildung 45 zeigt das Werkstück in der Bearbeitungsmaschine Haas VF3. Die Detailansicht A zeigt den mit Brandrissen behafteten Bereich der Gussform. In Detail B ist der obere zu bearbeitende Teil der Form, der Anguss, zu sehen, der ebenfalls starke Verbrauchsspuren aufweist. Beide Bereiche wurden mit Machine-Hammer-Peening bearbeitet, um die Form wieder für den Einsatz vorzubereiten.

6.2.3 Versuchsdurchführung

Als Strategie wurde eine einfache Linearstrategie verwendet, um die Brandrisse zu schließen. Dabei wurde quer zu den Rissen gearbeitet. Die Schraubenausnehmungen im Werkzeug wurden ausgelassen. In Abbildung 48 sind die CAD-Darstellung des Werkstücks sowie die Bearbeitungsstrategie zu sehen. Im unteren Bereich, der Detaildarstellung A, ist der größte Teil der Bearbeitung dargestellt. In gelber Farbe sind die Werkzeugverfahrungswege eingezeichnet, in weißer Farbe die MHP-Linien, die vom Aktuator abgefahren werden. Die nicht bearbeiteten Stellen sind das Logo sowie Ausnehmungen am Werkzeug, welche für die finale Form des Werkstücks benötigt werden. Im rechten, mittleren Teil der Abbildung sind die Bearbeitungsbahnen für den oberen Teil abgebildet. Der Abstand zwischen zwei Bahnen wurde auf 0,2mm festgesetzt. Als Vorschub wurden 1200mm/min gewählt bei einer Hubhöhe von 0,4mm. Bei einer Frequenz von 200Hz ergibt sich dazu ein Eindrucksabstand a von 0,1mm. Die Parameter sind in Tabelle 9 gesammelt dargestellt.

Al- Druckgusswerkzeug	Einheit	Parameter
Durchmesser Hartmetallkugel d	mm	10
Bahnabstand l_p	mm	0,2
Hub h	mm	0,4
Vorschubgeschwindigkeit v	mm/min	1200
Frequenz f	Hz	200
Eindruckabstand a	mm	0,1

Tabelle 9: MHP-Prozessparameter für das Al-Druckgusswerkzeug

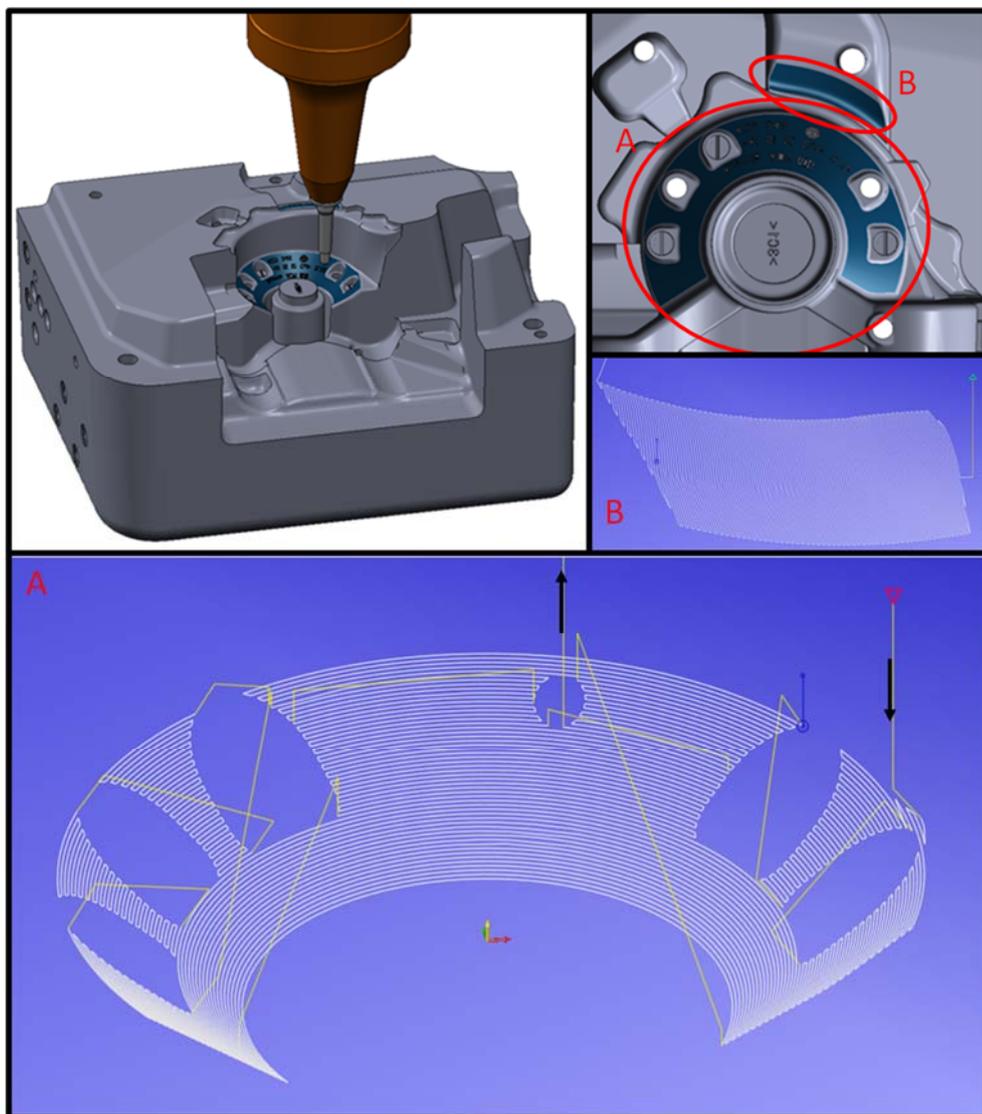


Abbildung 48: Al-Druckgussform-CAD-Darstellung sowie die angewandte Bearbeitungsstrategie

6.2.4 Auswertung

Nach der Bearbeitung der verschlissenen Stellen konnte die Al-Druckgussform wieder in der Produktion eingesetzt werden. Es wurden damit weitere 89.000 Gusszyklen absolviert, ehe es wieder zu qualitätsbeeinträchtigendem Verschleiß an der Form kam und das Werkzeug endgültig ausgemustert wurde. Dies führte dazu, dass das Werkzeug in Summe 283.000 Stück produzieren konnte und seine Lebensdauer damit um 45,9 Prozent verlängert wurde. Druckgusswerkzeuge absolvieren häufig nicht mehr als 120.000, Zyklen bevor sie ausgemustert werden. Der in Abbildung 46 unten gezeigte Prozess konnte einfach implementiert werden, da sich an der Form des Werkzeugs nach der Reparatur nichts geändert hat. Der Einsatz der mittels MHP bearbeiteten Form erfolgte ohne Komplikationen.

Die Kosten für eine Machine-Hammer-Peening-Bearbeitung liegt deutlich unter den Anschaffungskosten eines neuen Druckgusswerkzeuges. Dies führt zu offensichtlichem Potential von MHP in der Werkzeug- und Formenbauindustrie aber auch in der Gussindustrie.

6.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Anwendung der MHP-Technologie im Bereich des Refittings einer verschlissenen Aluminium-Druckgussform ist als vielversprechend zu bewerten. Eine wesentliche Voraussetzung ist, dass die Geometrie der zu bearbeitenden Stellen des Werkstücks derartig angeordnet ist, sodass eine Bearbeitung mittels MHP möglich ist. Ähnlich dem schon üblichen Kugelstrahlen von Druckgussformen werden auch hier Druckeigenspannungen in die Oberfläche eingebracht, um die Haltbarkeit der Oberfläche zu erhöhen.

Machine-Hammer-Peening ist eine Technologie, die Brandrisse von Al-Druckgusswerkzeugen glätten kann. Die Einschränkung ist derzeit noch durch den relativ großen Aktuator gegeben, der fast ausschließlich in der Lage ist, Flächen zu bearbeiten, die offen an der Oberfläche des Werkstücks liegen. Die Verlängerung des Lebenszyklus eines Druckgusswerkzeugs ist, wie in Kapitel 6.2.4 bereits erwähnt, eine Möglichkeit, die Herstellungskosten der Produkte zu senken. Der Neupreis von Al-Druckgusswerkzeugen bewegt sich je nach Auslegung, Komplexität, Größe und Kavitäten um die 100.000€. Eine Verlängerung der Einsatzzeit um 45,9% birgt somit erhebliche Sparpotentiale in der Anschaffung von Werkzeugen. Die Bearbeitung mittels MHP ist in Hinblick auf die damit verbundenen Einsparungspotentiale wesentlich günstiger.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit widmete sich der Untersuchung der Eignung von Machine-Hammer-Peening im Werkzeug- und Formenbau. Dabei wurden zuerst gängige Oberflächenbearbeitungsverfahren und Prozesseigenschaften von MHP in Kapitel 2 recherchiert. In Kapitel 4 wurde auf die Wirkmechanismen von Oberflächenbearbeitungsverfahren und einige Versuche an Werkzeugen und Materialien beschrieben. Abschließend wurde MHP an einer verschlissenen Druckgussform angewendet, bei der durch den Druckgussprozess Brandrisse in der Form aufgetreten sind. Diese Brandrisse konnten durch den MHP-Prozess geglättet werden, sodass das Werkzeug wieder in der Produktion eingesetzt werden konnte.

Die Versuche an Stanzwerkzeugen lieferten nicht die gewünschten Erkenntnisse, sodass ein Einsatz von MHP in diesem Bereich nicht weiter verfolgt wurde. Die Bearbeitung der Stempel geht mit möglichen Qualitätseinbußen an den Kanten des Werkzeugs einher, wodurch die Prozessstabilität und Qualität nicht gewährleistet werden können. Die Anwendung von Machine-Hammer-Peening auf die mit Brandrisen behaftete Aluminium-Druckgussform kann im Gegensatz dazu als Erfolg betrachtet werden. Die Glättung der Oberfläche führte dazu, dass die Form noch einige Zeit in der Produktion zum Einsatz kam und somit der Lebenszyklus des Werkzeuges verlängert wurde. Dies eröffnet beträchtliche Einsparungspotentiale.

Anhand der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick über den Stand der Technik bei mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren mit Fokus auf Machine-Hammer-Peening gegeben. Weiters wurden durch die durchgeführten Versuche Anwendungsbereiche im Werkzeug- und Formenbau gefunden, die durchaus großes Potential für die Anwendung von MHP offenbaren. Ausgehend von den in dieser Arbeit präsentierten Resultaten sowie weiteren Tätigkeiten im Bereich des Machine-Hammer-Peenings wurden Folgeprojekte zu diesem Thema gestartet. Seitens des Instituts für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik werden weitere Einsatzgebiete der MHP-Technologie erforscht, etwa das Anbringen des MHP-Aktuators an einem Roboterarm.

8 Literaturverzeichnis

- [1] P. Vetter, „Wärmebehandlungs- und Oberflächenveredelungstechniken,“ in *Werkzeugbau in der Kunststoffverarbeitung. 5. Aufl.*, G. Menning, Hrsg., München, Carl Hanser Verlag, 2008, pp. 534-566.
- [2] F. Lienert, J. Hoffmeister und V. Schulze, „Residual stress depth distribution after piezo peening of quenched and tempered AISI 4140,“ *Materials Science Forum*, Bd. 768, pp. 526-533, 2014.
- [3] C. Montross, T. Wei, G. Clark und Y. Mai, „Laser Shock Processing and its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloys: A Review,“ *International Journal of Fatigue*, Bd. 24, pp. 1021-1036, 2002.
- [4] 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*, Bd. 61, pp. 375-378, 2012.
- [5] A. Cherif, „Analyse und Beurteilung gekoppelter thermisch- mechanischer Prozesse zur Randschichtenverfestigung,“ *Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik Metallische Werkstoffe der Universität Kassel*, Bd. 12, 2011.
- [6] F. Klocke und W. König, *Fertigungsverfahren 4 Umformen*, 5. Auflage Hrsg., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [7] G. Tani, L. Orazi, A. Fortunato, A. Ascari und G. Campana, „Warm Laser Shock Peening: New developments and process optimization,“ *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 60, pp. 219-222, 2011.
- [8] M. Qin, D. Y. Ju und R. Oba, „Investigation of the influence of incidence angle on the process capability of water cavitation peening,“ *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 1409-1413, 2006.
- [9] T. Hashimoto, Y. Osawa, S. Itoh, M. Mochizuki und K. Nishimoto, „Long-Term Stability of Residual Stress Improvement by Water Jet Peening Considering Working Processes,“ *Journal of Pressure Vessel Technology*, Bd. 135, 2013.
- [10] E. Macherauch und H. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*, 11. Auflage Hrsg., Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.

- [11] A. M. Abrao, B. Benkena, B. Breidenstein und T. Mörke, „Surface and subsurface alterations induced by deep rolling of hardened AISI 1060 steel,“ *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2014.
- [12] W. Grzesik und K. Zak, „Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Nr. 212, pp. 315-322, 2012.
- [13] „Firmenwebseite accurapuls GmbH - Verfahrensbeschreibung,“ [Online]. Available: <http://accurapuls.de/Verfahrensbeschreibung.html>. [Zugriff am 16 03 2015].
- [14] Offenlegungsschrift, „Klopfvorrichtung und -verfahren“. Bundesrepublik Deutschland Patent 10 2006 033 004.8, 13 09 2007.
- [15] „Firmenwebseite accurapuls GmbH - accurapuls-CAM-Software,“ [Online]. Available: <http://accurapuls.de/accura-cam.html>. [Zugriff am 16 03 2015].
- [16] Offenlegungsschrift, „Kaltschmiedevorrichtung, Kaltschmiedeanlage und Verfahren zur Bearbeitung von Metalloberflächen und -werkstücken“. Bundesrepublik Deutschland Patent 10 2009 041 720.6, 06 05 2010.
- [17] Offenlegungsschrift, „Kaltschmiedevorrichtung und Kaltschmiedeverfahren“. Bundesrepublik Deutschland Patent 10 2010 019 547.2, 16 12 2010.
- [18] C. Lechner, Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings), Dissertation, Wien: TU Wien, 2014.
- [19] M. Steitz, „Richtlinien zur Terminologie für das Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung "Maschinelles Oberflächenhämmern",“ Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, TU Darmstadt, 2014.
- [20] D. I. f. Normung, Hrsg., *DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [21] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 5 Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing*, Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [22] VDG, „Grundlagen der Gießereitechnik - Eine kompakte PowerPoint-Präsentation,“ Verein Deutscher Gießereifachleute e.V. (VDG), Düsseldorf, 2005.

- [23] A. Grüning, Thermo-mechanisch gekoppelte Experimente zur BEurteilung der Schädigungsentwicklung an Werkzeugen zur Warmumformung, Kassel: kassel university press GmbH, 2013.
- [24] P. Karlinger und F. Hinken, „Werkzeugkonstruktion,“ in *Werkzeugbau in der Kunststoffverarbeitung. 5. Aufl.*, G. Menning, Hrsg., München, Carl Hanser Verlag, 2008, pp. 301-331.
- [25] G. Schuh, R. Schmitt, T. Kühn und M. Hienzsch, „"Low Cost" Tools Through Life Cycle Observation,“ *Procedia CIRP*, Bd. 15, pp. 256-530, 2014.
- [26] P. Groche, M. Engels, M. Steitz, C. Müller, J. Scheil und M. Heilmaier, „Potential of mechanical surface treatment for mould and die production,“ *International Journal of Materials Research*, Bd. 103, pp. 783-789, 2012.
- [27] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, M. Obermair, F. Heindl und M. Rodriguez Ripoll, „Improving the tribological characteristics of tool and mould surfaces by machine hammer peening,“ *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Bd. 62, pp. 239-242, 2013.
- [28] J. Berglund, M. Liljengren und B.-G. Rosén, „On finishing of pressing die surfaces using machine hammer peening,“ *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 52, pp. 115-121, 2011.
- [29] H.-J. Bargel und G. Schulze, *Werkstoffkunde*, 10. Auflage Hrsg., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [30] L. Spieß, G. Teichert, R. Schwarzer, H. Behnken und C. Genzel, *Moderne Röntgenbeugung/Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*, 2. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner/GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [31] H. Hertz, „Über die Berührung fester elastischer Körper,“ *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Nr. 92, pp. 156-171, 1881.
- [32] I. Hermann, Anwendung und Erweiterung der Methode des elastischen Kugeleindruckversuchs zur Bestimmung mechanischer Oberflächeneigenschaften, Dissertation, Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2004.
- [33] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

- [34] I. S. Jawahir, E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D. K. Aspinwall, J. C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello und A. D. Jayal, „Surface integrity in material removal processes: Recent advances,“ *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, pp. 603-626, 2011.
- [35] General Electric Company, Krautkramer TIV/Technisches Handbuch und Bedienungsanleitung, Ausgabe 4, 2007.
- [36] „InfiniteFocus,“ Alicona, [Online]. Available: <http://www.alicon.at/home/produkte/infinitefocus.html>. [Zugriff am 17 06 2015].
- [37] C. Herrmann, H. Pries und G. Hartmann, Hrsg., Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [38] „Warmarbeitsstahl,“ BÖHLER-UDDEHOLM Deutschland GmbH, [Online]. Available: <http://www.bohler.de/german/505.php>. [Zugriff am 18 08 2015].
- [39] A. Böge und W. Böge, Hrsg., Handbuch Maschinenbau, 22. Hrsg., Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [40] B. Ilschner und R. F. Singer, Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, 5. Auflage Hrsg., Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Oberflächenbeschichtungsverfahren (vgl. [1])	6
Abbildung 2: Maschinelle Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung (vgl. [4])	8
Abbildung 3: Schematische Darstellung von Laser Shock Peening nach [3]	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung von Water Cavitation Peening (vgl. [9]).....	11
Abbildung 5: Druckluft- (links) und Schleuderradstrahlanlage (rechts) (vgl. [10]).....	12
Abbildung 6: Auswahl von Deep Rolling Werkzeug Prinzipien (vgl. [11])	13
Abbildung 7: Aktuator in Werkzeugmaschine und schematische Darstellung	14
Abbildung 8: Darstellung der MHP Winkelmaße (vgl. [19])	16
Abbildung 9: Darstellung der MHP-Prozessparameter (vgl. [22]).....	17
Abbildung 10: Eingliederung von Gießverfahren in die DIN 8580 (vgl. [20], [21]).....	18
Abbildung 11: Prinzipdarstellung einer Warmkammermaschine (vgl. [22])	19
Abbildung 12: Kaltkammerdruckgussmaschine in hydromechanischer Ausführung (vgl. [22])	20
Abbildung 13: Prozesskette mit Reduktion des Zeitbedarfs nach Groche [26].....	22
Abbildung 14: Technologisch optimierte Prozesskette der Werkzeug- und Formenbau- Industrie sowie Veränderung des Werkzeugs-Lebenszyklus in der Nutzungsphase (vgl. [27])	23
Abbildung 15: Elementarzellen der häufigsten metallischen Atomgitter nach [29]	27
Abbildung 16: Punktförmige und lineare Gitterbaufehler (vgl. [29])	27
Abbildung 17: Klein- und Großwinkelkorngrenze (vgl. [29])	28
Abbildung 18: Plastische Verformung durch Versetzungsbewegung (vgl. [29])	28
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Kugeleintritts nach Hertz (vgl. [18], [32])	31
Abbildung 20: Spannungsverteilung eines kugelförmigen Eindringkörpers in eine Oberfläche (vgl. [18], [33]).....	33
Abbildung 21: Auswertung der Einschlaggeometrie in Abhängigkeit der Schlagdistanz (vgl. [18])	34
Abbildung 22: Bahnweise Flächenbearbeitung: a) Überlagerte Einzelbahnen und Messpositionen für die Profilerstellung; b) Profilschnitt durch die Probe an der Stelle von vier Bearbeitungsbahnen; c) Überlagerung zweier Profilschnitte zur Bestimmung der Materialanteilsflächen (vgl. [18]).....	35
Abbildung 23: Verdrängte Materialanteilsflächen in Abhängigkeit des Hubs (vgl. [18])	36
Abbildung 24: Bahnabstandsabhängige Materialausrichtung unterhalb des Werkzeugs (vgl. [18]).	37
Abbildung 25: Prozesseinlaufphase durch Überlagerung von einer, sechs und zwölf Bahnen ($d=8\text{mm}$, $l_p=a=0,1\text{mm}$, $h=1\text{mm}$) (vgl. [18]).	37
Abbildung 26: Übergangsbereiche des bearbeiteten MHP-Feldes (vgl. [18]).....	38

Abbildung 27: a) Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu gefräster Fläche b) Einstellungen der Kantenschutzfunktion in der accurapuls CAM-Software (vgl. [18]).	39
Abbildung 28: Beispielhafte Auswertung zur Bewertung der Kantenschutzstrategie (vgl. [18])	42
Abbildung 29: Auswertung der getesteten Kantenschutz-Strategien (vgl. [18]).....	43
Abbildung 30: Höhenprofile der Versuche ohne Kantenschutz, mit CAM-Strategie und Strategie 13 (vgl. [18])	44
Abbildung 31: Eigenspannungen an der Probenoberfläche und Prozessparameter (vgl. [18], [34])	46
Abbildung 32: Maximale Druckeigenspannungen und Prozessparameter (vgl. [18], [34])	47
Abbildung 33: Eigenspannungstiefenprofile (vgl. [18], [34])	47
Abbildung 34: Referenzwerkzeug mit Spritzgussteilen.....	51
Abbildung 35: (a), (b) Pfade der beiden MHP-Durchläufe; (c), (e) Materialproben mit Ra-Werten; (d), (f) Proben mit optischem Glättungseffekt.....	54
Abbildung 36: Zusammenhang von Oberflächenrauheit und Bearbeitungszeit.....	56
Abbildung 37: Stanzstempel der Firma GW St. Pölten (Proben 1)	57
Abbildung 38: Stanzstempel der Firma Welser Profile (Proben 2)	57
Abbildung 39: Spiralstrategie des Stempels 2 mit Druckeigenspannungen und An- sowie Abfahrtsweg	58
Abbildung 40: Bearbeitungsstrategie der Stempel der Firma Welser	58
Abbildung 41: Vergleich der Kanten mittels Mikroskopaufnahmen.....	60
Abbildung 42: Messstrecken für die Rauheitsmessung.....	61
Abbildung 43: Kanten der Welser Stempel nach der MHP-Bearbeitung	62
Abbildung 44: Versuchsaufbau Al-Druckgussform	63
Abbildung 45: Al-Druckgussform in der Maschine eingespannt und Detailansicht der Bearbeitungsstellen.....	65
Abbildung 46: Prozesskettenvergleich des herkömmlichen und aufbereiteten Werkzeugs	66
Abbildung 47: Druckguss-Produkt mit Brandrissen	66
Abbildung 48: Al-Druckgussform-CAD-Darstellung sowie die angewandte Bearbeitungsstrategie	68

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Ausgangsfelder (vgl. [18])	40
Tabelle 2: Darstellung der Kantenschutzstrategien und Parameter (vgl. [18])	41
Tabelle 3: Prozessparameter der Bearbeitung der zylindrischen Testscheibe (vgl. [18])	45
Tabelle 4: Fräsparameter und erzielte Werte	52
Tabelle 5: MHP-Parameter und erzielte Werte für die Materialproben	53
Tabelle 6: Ergebnisse der Bearbeitung der Materialproben	55
Tabelle 7: Härte und Rauheit der Stanzstempel der Firma GW St. Pölten.....	59
Tabelle 8: Härte und Rauheit der Proben 2 von Welser Profile	61
Tabelle 9: MHP-Prozessparameter für das Al-Druckgusswerkzeug	68