

**Weber Ultrasonics AG
Karlsbad**

**Entwicklung eines automatisierten Entgratungsverfahrens
durch Ultraschall für die Metallverarbeitung bei deutlicher
Reduzierung der Prozessenergie.**

**Schlussbericht über das von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt
geförderte Kooperationsprojekt**

Projektlaufzeit: 23.03.2016 bis 30.09.2020
AZ: 33170/01

Zuwendungsempfänger	
Weber Ultrasonics AG	COO Nathalie Etienne Dipl.-Ing. Günter Hiedels
LPW Reinigungssysteme GmbH	Dipl.-Ing. Gerhard Koblenzer
HEMO GmbH	Dipl.-Ing. Volker Hösel
Fraunhofer-Gesellschaft, IPA - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung	Dr.-Ing. Markus Rochowicz

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33170/01	Referat	21/2	Fördersumme	426.000 €
Antragstitel		Entwicklung eines automatisierten Entgratungsverfahrens durch Ultraschall für die Metallverarbeitung bei deutlicher Reduzierung der Prozessenergie			
Stichworte		<i>Reinigung in der Fertigung, Vergleichsverfahren sehr energieintensiv, Hauptenergiefresser, Ultraschall-Schwinger, Kavitationswirkung, Kavitationsblasen, Energiebedarf reduziert, Ultraschallinduzierter Kavitation, Kavitationsintensität, Energieeffizienz, Generator, Konverter, Booster, Sonotrode, Hochdruckpumpe, Betriebskosten, Simulationsrechnungen, Materialerosion, Verschleißrate, kavitationsresistente Werkstoffe, Oberflächenmodifikationen, Verschleißmesseinrichtung, Prozesstechnologien, Feinst-Reinigung, Ressourcenverbrauch, nachhaltiges Wirtschaften, ressourcenschonend, schadstofffrei.</i>			
Laufzeit	Projektbeginn Phase 1	Projektende Phase 1	Geplante Projektphase(n)		
21 Monate	23.03.2016	30.11.2017	2		
Laufzeit	Projektbeginn Phase 2	Projektende Phase 2			
34 Monate	01.12.2017	30.09.2020			
Schlussberichte	Bericht über die Wirksamkeit des Ansatzes zum Ende der Entwicklung				
Bewilligungsempfänger	Weber Ultrasonics AG			Tel	07248 9207 13
	Im Hinteracker 7, 76307 Karlsbad			Fax	07248 9207 23
	Nathalie Etienne, Markus Weber https://www.weber-ultrasonics.com			Projektleitung Nathalie Etienne	
				Bearbeiter Johannes Drosdol jd@dwhs.de	
Kooperationspartner	Weber Ultrasonics Weld & Cut GmbH			http://www.wuwc.de	
	LPW Reinigungssysteme GmbH			http://www.lpw-reinigungssysteme.de	
	HEMO GmbH			https://hemo-gmbh.de	
	Fraunhofer-Gesellschaft, IPA - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung			https://www.ipa.fraunhofer.de	
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Im Ultraschall-Schwinger wird hochfrequente elektrische Energie in mechanische Schwingungen umgewandelt. Im Flüssigkeitsbad werden so kleinste Luftbläschen erzeugt, die sofort wieder implodieren, dabei sehr große Druckspitzen erzeugen und somit einen mechanischen/ kavitätischen Effekt auf der Bauteiloberfläche bewirken. Die zum Entgraten erforderlichen Kräfte werden durch das Implodieren dieser Kavitationsblasen erzeugt, wobei sehr starke – wenn auch kurzzeitige – Druckstöße entstehen, die mehrere 100 MPa annehmen können (1MPa = 10 bar = 1 N/mm²).</p> <p>Durch eine sehr gezielte und lokal fokussierte Erzeugung von Bereichen mit hoher Kavitationswirkung an der Sonotrode kann der Energiebedarf auf ein Minimum reduziert werden. Erste Voruntersuchungen zeigen etwa, dass sich durch Ultraschall-Kavitation, die mit einer elektrischen Leistung von ca. 100 Watt ein vergleichbares Entgrat-Ergebnis erzielen lässt wie mit einer Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung mit einer Anlage, deren Anschlussleistung 100 Kilowatt beträgt.</p> <p>Ziel des F&E-Projektes ist es, durch Ultraschall-Technologie ein vergleichbares Entgrat-Ergebnis zu erzielen, wie mit einer Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung und dabei jeweils die verbrauchte Prozessenergie zu messen und zu vergleichen. Durch die Zusammenlegung von Entgratung und Reinigung in einer Anlage, was mit der neuen Ultraschall-Technologie problemlos möglich ist, ergeben sich weitere Energiesparpotentiale.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Sichtung der internationalen Entgrat-Technologie
- Entgrat-Versuche mit vorhandener Ultraschallgeräten, zunächst mit einer einfachen Handsonotrode
- Analytische Betrachtung der Sonotroden-Technologie mit Darstellung zukünftiger Entwicklungsstufen
- Konstruktive Entwicklung einer ersten automatisierten Ultraschall-Entgratanlage
- Systematische Entgratversuche an industriellen Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien
- Einbeziehen der Werkstück-Geometrien in die Ergebnistabelle
- Bewertung aller Entgratversuche mit dem Keyence Hochleistungsmikroskop jeweils vor und nach der Entgratung
- Verfahrensvergleich durch die Entgratung identischer Bauteile an Entgrat-Anlagen für HDWS und US mit Berücksichtigung der Prozesszeiten.
- Systematische Messungen der benötigten Prozessenergien für die Geräte beider Entgratverfahren.
- Qualitätsvergleich der Entgrat-Ergebnisse durch Mikroskop-Messungen und -Bilder.

Ergebnis und Diskussion

Nachgewiesen werden konnte, dass industrielle Gussteile aus Aluminium oder Alu-Legierungen oder aus Messing, Bronze oder Zink, mit einer heute vorhandenen Sonotrode qualitätsgleich entgratet werden können mit einer automatisierten Ultraschall-Entgratanlage wie mit einer Hochdruckwasserstrahl-Entgratung. Beide Anlagen benötigen dazu die gleiche Zeit. Aber das Ultraschall-Entgraten erzielt dieses gleiche Ergebnis mit nur 0,8 % der Energie, die eine HDWS-Entgratanlage verbraucht.

Für komplexere Bauteile benötigt der Ultraschall heute noch in etwa die doppelte Bearbeitungszeit. Diese Zeit wird behoben werden durch die Entwicklung spezifischer Sonotroden bei der Weber Ultrasonics AG. Weiche Kunststoffe (wie thermoplastisches PVC) oder zähe Metalle (wie Stähle/ Edelmetalle/ verchromte Bauteile/ etc.) lassen sich mit der aktuellen Ultraschall-Entgrat-Technologie nicht entgraten, sondern erlauben maximal eine Fliattergratbeseitigung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Vortrag „Ultraschallentgraten“, Dr. Michael Rochowicz, Fraunhofer IPA, Oktober 2015
- Vorstellung der Ultraschall-Technologie bei BMW AG und ZF AG, Dr. Michael Rocowicz und Dipl.-Ing. Stefan Boos, Fraunhofer IPA
- „Ultraschallentgraten – fokussiert auf Energieeffizienz, Flexibilität und Prozesssicherheit“, Nürtingen, 6.4.2016, Dr. Michael Rochowicz, Fraunhofer IPA und Dr. Thomas Dreyer, Weber Ultrasonics AG
- „Reinigungsgerechte Produktion“, Seminar, 2015(16/17, Dr. Michael Rochowicz, Fraunhofer IPA
- Entgraten mit Ultraschall: Neueste Entwicklungen und Anwendungsbeispiele, Nürtingen 21.02.2017, Dr. Thomas Dreyer, Weber Ultrasonics AG
- Präsentation auf der „Deburring EXPO“ in Karlsruhe. März 2017
- Knochennagel entgratet in Zusammenarbeit mit „Jugend Forscht“. März 2018
- Präsentation auf der „Deburring EXPO“ in Karlsruhe. März 2019
- Intensive Kundengespräche mit Firmen, die mit Entgratungen arbeiten.

Fazit

Den Projekt-Ansatz haben die Kooperationspartner systematisch untersucht mit diesen Ergebnissen:
Gleiches Entgrat-Ergebnis bei dem industriellen Bauteil aus Aluminium, Messing oder Bronze: 0,7 kWh für Ultraschall-Entgratung; für die Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung 88 kWh.

Als konkrete Umweltentlastung kann zahlenmäßig angegeben werden:

Mit dem Ultraschall-Entgrat-Technologie kann ca. 99,2 % der Prozessenergie eingespart werden. Hinzu kommen Investitionseinsparungen für die Anlage in der Größenordnung von 70 % der Kosten einer Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratanlage.

Gliederung

Zusammenfassung

1. Einleitung zur Entgrat-Technik
 - 1.1 Stand der Entgrat-Technik
 - 1.2 Ultraschalltechnik

2. Entwicklung einer ersten automatisierten Ultraschall-Entgratanlage
 - 2.1 Versuchsanordnung
 - 2.2 Messen und Beurteilen
 - 2.3 Handentgrat-Apparat
 - 2.4 Erste Drei-Achs Entgrat-Anlage
 - 2.5 Erste robotergestützte Ultraschall-Entgratanlage

3. Ergebnisse der Ultraschall-Entgrat-Versuche
 - 3.1 Ergebnisse für unterschiedliche Materialien
 - 3.2 Ergebnisse zu besonderen Werkstück-Geometrien
 - 3.3 Einschränkungen bezüglich der Sonotroden

4. Resultate der Projektarbeit
 - 4.1 Entgrat-Qualität
 - 4.2 Prozessenergie
 - 4.3 Wirtschaftlichkeit
 - 4.4 Fazit

5. Öko-Bilanz und Empfehlung

Unterschriften der Projektbeteiligten

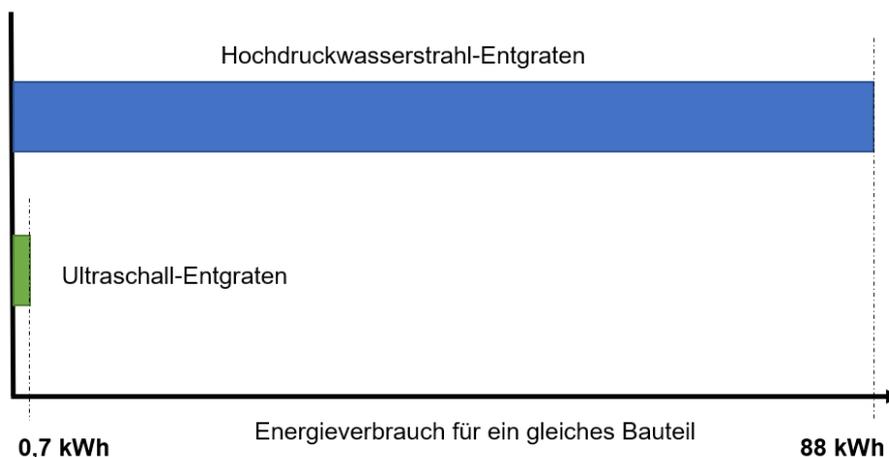
Literaturverzeichnis

Zusammenfassung

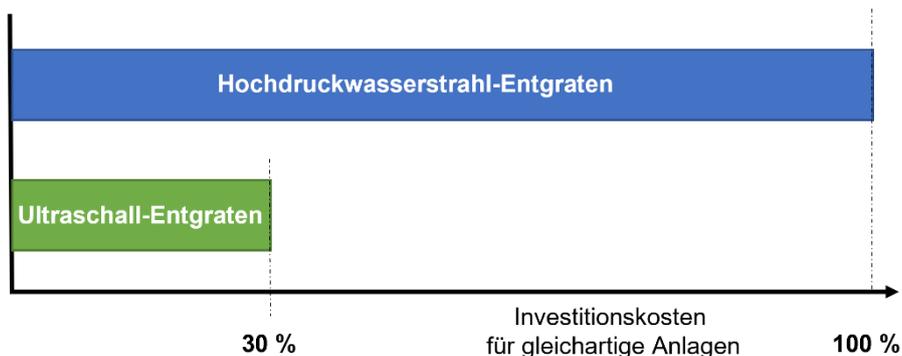
Der vorliegende Abschlussbericht zur Entwicklung der ersten automatisierten Entgrat-Anlage für industrielle Serienwerkstücke mittels Ultraschall beschreibt die wichtigsten Entwicklungsschritte auf dem Weg, eine solche Anlage erstmals zu entwickeln, zu vermessen und zu betreiben. Er handelt aber auch davon, dass erste Laborversuche die These eindrucksvoll bestätigen, dass Ultraschall-Entgraten automatisiert ablaufen kann und dafür erheblich weniger Prozessenergie aufgewendet werden muss als für alle anderen Entgrat-Technologien. Zusammenfassend wird festgestellt:

Ein Entgrat-Ergebnis gleicher Qualität wird erzielt bei gleichen industriellen Bauteilen mit **0,7 kWh für die Ultraschall-Entgratung** und mit **88 kWh für das Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung**, was eine **Energieeinsparung von 99,2 %** bedeutet.

Infolge der ersten Entwicklungen gilt diese nur für das Entgraten von Bauteilen aus Aluminium oder Alu-Legierungen, Messing, Bronze oder Zink mit den aktuellen Sonotroden.



Hinzu kommen **Investitionskosteneinsparungen** für die Anlagen in der **Größenordnung von 70 %** der Kosten einer Hochdruckwasserstrahl-Entgratungsanlage.



Zu berücksichtigen ist auch die anlagentechnisch sich anbietende Anbindung von **Reinigungseinheiten** im unmittelbaren Anschluss an die Entgratungsstationen in einem kontinuierlichen Prozess. Auch das spart viel Prozessenergie und reduziert den Anlagenbestand und -aufwand.

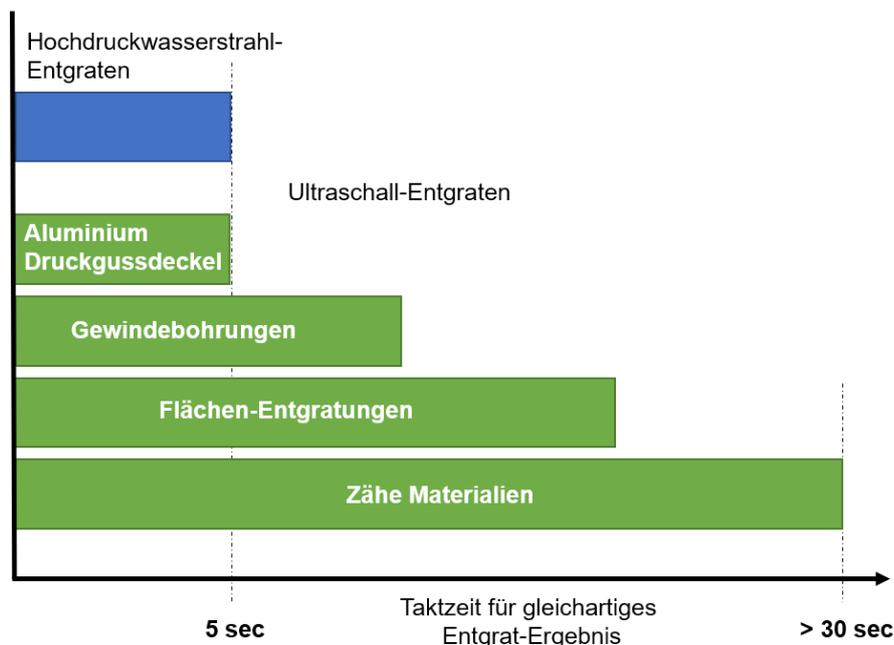
Für alle bearbeiteten Bauteile aus Aluminium, Messing, Bronze oder Zink stellt das automatisierte Ultraschall-Entgratverfahren eine wirtschaftliche und ökologische Alternative zum Hochdruckwasserstrahl-Entgratverfahren dar.

70 % Einsparung beim Kauf der Anlage

99,2 % Einsparung der Betriebsenergie

Gleiche Zeit pro Werkstück und gleiche Entgratqualität

Leider benötigt die Ultraschall-Entgrat-Technologie heute noch für die Entgratung vieler anderer Entgrat-Aufgaben **deutlich mehr Zeit**. Das liegt zum größten Teil an den verwendeten Sonotroden, die noch weiterentwickelt werden müssen. Mit den heute verfügbaren Sonotroden ergibt sich bei einem automatisierten Betrieb für die gleichen Teile eine höhere Taktzeit für das **US-Entgraten** gegenüber dem **HDWS-Entgraten**.



Gehärtete Bauteile oder solche aus **hochwertigem Stahl** lassen sich hingegen mit aktuellen Werkzeugen **nicht mit dem durch Ultraschallschwingungen** erzeugten Kavitationskräfte entgrate.

Die **Sonotroden-Entwicklung** selbst für das Ultraschall-Entgraten und die Fertigung von Sonotroden, die für die Entgratung verwendet werden können mit guter Standzeit steht unerwartet noch in den Anfängen und bleibt als Herausforderung. Die Widerstandsfähigkeit gegen Kavitationsschäden an den Sonotroden selbst ist dringend zu erhöhen.

Hier stehen Versuche mit speziell **beschichteten Sonotroden** an. Alternativ dazu werden Sonotroden entwickelt, die einen **austauschbaren Wechselkopf** inklusive einer Verschleißerkennung aufweisen, um damit die Wirtschaftlichkeit des Ultraschall-Entgratens weiter zu verbessern.

Ein weiteres Entwicklungsziel betrifft Länge und Durchmesser der zu verwendenden **Sonotroden**. Um von einer möglichen Vorgabe der Bearbeitungsreihenfolge für die Hersteller von z.B. Zylinderköpfen unabhängig zu werden, werden zurzeit bei der Weber Ultrasonics AG Stabsonotroden mit Längen von > 400 mm und Durchmessern < 6 bis 8 mm entwickelt.

Außerdem wird speziell für „**Bohrungsverschneidungen**“ eine Sonotrode entwickelt, die eine Querschwingung anregt, sodass bessere Ergebnisse prognostiziert werden können.

Mit Hilfe des Autofrettage¹-Verfahrens gegen Kavitationserosion werden höchst widerstandsfähige Sonotroden entwickelt, die dazu allerdings axial durchbohrt werden müssen.

¹ Als **Autofrettage** (frz.:Selbst beringt) bezeichnet man ein Verfahren zur Festigkeitssteigerung von Rohrleitungen für den Einsatz bei hohen und pulsierenden Innendrücken. Bei diesem Verfahren wird die Sonotrode kurzzeitig mit extrem hohen Drücken (bis 15 kbar) beaufschlagt, so dass eine plastische Deformation der Innenfläche auftritt. Nach dem Expandieren des Druckes verbleiben große Druckeigenspannungen in der Oberfläche, die eine deutlich erhöhte Verschleißbeständigkeit zur Folge haben. Das Verfahren wird angewandt bei z.B. Hochdruckleitungen, Waffenläufen, sowie Hochdruckwasserstrahlanlagen.

1. Einleitung

„Ein Grat ist das unerwünschte Werkstoffgebilde, das an Kanten oder auf der Werkstückoberfläche bei der Fertigung entsteht und über die ideale Werkstückoberfläche hinausragt“ (Schäfer 1975, S. 17)

Grate und Späne lassen sich bei kaum einem Verfahren der Herstellung oder Bearbeitung vermeiden. Die Grate stellen dabei eine Verletzungsgefahr dar und sind eine Gefahr für Qualität und Funktion der Produkte. In Branchen wie beispielsweise der Automobilindustrie, der Luftfahrt, der Medizintechnik, der Feinwerktechnik, der Elektrotechnik, dem Maschinenbau und vielen mehr, erfüllen außerdem die grat- und spanbehafteten Teile, die heute geforderten und teilweise sehr strengen Sauberkeitsanforderungen, nicht mehr. (vgl. Schulz 2013)

In der Automobilindustrie bspw. müssen Grate aufwändig entfernt und abgereinigt werden. Grate können in medienführenden Bereichen von Systemen mobil werden, von scheinbar unkritischen Bauteilen in sensible Systemkomponenten gelangen und dort zu einer Funktionsbeeinträchtigung bis hin zum Systemausfall führen.

Deshalb spielt das Entfernen von Graten in der Automobilindustrie aber auch in den anderen oben genannten Industriebereichen eine sehr große Rolle. (vgl. Schäfer 1975, S. 22-26)

Es existieren bereits zahlreiche Entgrat-Verfahren, die auf unterschiedlichsten Prinzipien beruhen, jedoch diverse Nachteile mit sich bringen, beginnend mit hohem Energiebedarf über begrenzte Einsetzbarkeit bis zu unzureichender Entgrat-Qualität. Auf die Einzelnen, bis jetzt bestehenden Verfahren, wird in diesem Kapitel genauer eingegangen werden.

1.1 Stand der Entgrat-Technik

Grate lassen sich durch verschiedene Größen und Merkmale eindeutig definieren. Zu den gängigen Bezeichnungen am Grat gehören der Gratquerschnitt, die Gratlängsrichtung, das Gratlängsprofil, die Gratfußfläche und das Gratquerschnittsprofil. Diese Größen sind in Abbildung 1-1 dargestellt. (vgl. Thilow 2012, S. 34)

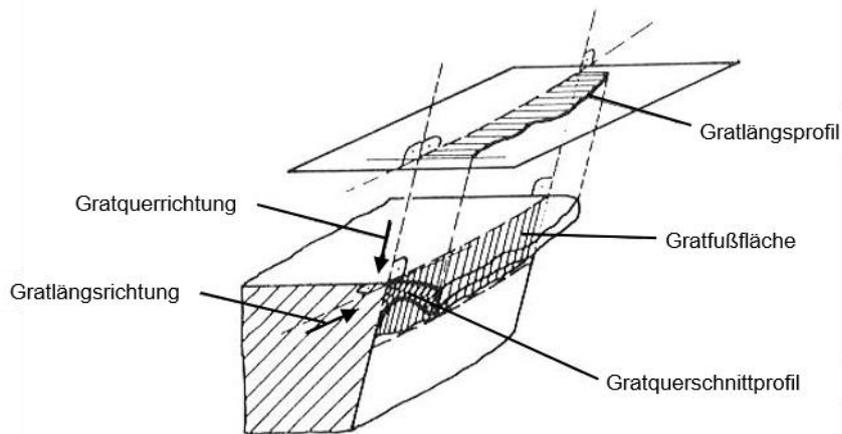
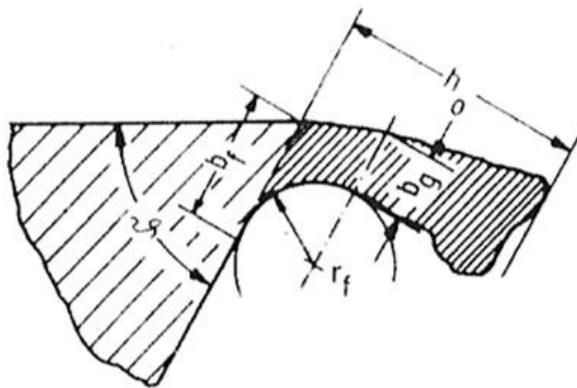


Abbildung 1-1: Bezeichnungen am Grat (Thilow 2012, S. 34)

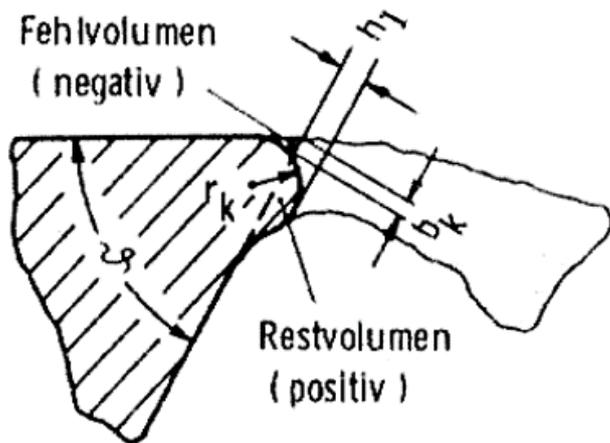
Im Querschnittsprofil vor dem Entgraten werden die Messgrößen Gratfußbreite b_f , die Gratdicke b_g , der Gratfußradius r_f und die Grathöhe h_0 gemessen. Diese sind in Abbildung 1-2 eingezeichnet. (vgl. Thilow 2012, S. 36)



b_f	Gratfußbreite
b_g	Gratdicke
r_f	Gratfußradius
h_0	Grathöhe
ϑ	Kantenwinkel des Werkstücks

Abbildung 1-2: Querschnittsprofil vor dem Entgraten (Thilow 2012, S. 36)

Die Messgrößen der Entgrat-Qualität, die Restgrathöhe h_1 , die Kantenverrundung r_k und die Kantenfehlbreite b_k , werden im Querschnittsprofil nach dem Entgraten gemessen (siehe Abbildung 1-3). Je nach Einsatzbereich des Bauteils sind unterschiedliche Größen von Bedeutung. Zum Beispiel für das bündige Fügen von Bauteilen darf keine Restgrathöhe h_1 mehr vorhanden sein oder beispielsweise für die Verringerung der Verletzungsgefahr muss die Kantenverrundung r_k minimiert werden. Um Kosten und Zeit zu sparen, müssen deshalb nicht immer alle Größen bestimmt werden. (vgl. Thilow 2012, S. 36)



h_1	Restgrathöhe
b_k	Kantenfehlbreite
r_k	Kantenverrundung
φ	Kantenwinkel des Werkstücks

Abbildung 1-3: Querschnittsprofil nach dem Entgraten (Thilow 2012, S. 36)

Der Kantenwinkel des Werkstücks, welcher sowohl im Querschnittsprofil vor als auch nach dem Entgraten eingezeichnet ist, bleibt konstant. (vgl. Thilow 2012, S. 36)

Die Anwendung von vorher bestimmten Messgrößen bei der Ermittlung der Entgratqualität ist von Vorteil, da dadurch nur jene Kennwerte betrachtet werden, die durch die Entgratung beeinflusst werden bzw. für den Grund der Entgratung relevant sind. Dies führt zu Kostenersparnissen in der Fertigung durch die Fokussierung auf das wesentliche Ziel der Entgratung und ermöglicht die Versachlichung der Diskussionen zwischen der Konstruktion, der Arbeitsvorbereitung, der Fertigung und der Kontrolle bzw. Qualitätssicherung. (vgl. Thilow 2012, S. 36)

Aufgrund der unterschiedlichsten Formen und Profile, die sich durch die Entgratung ergeben, hat sich in der Fertigungstechnik eine Normzahlenreihe etabliert, die es erlaubt, die unterschiedlichsten, durch Forderungen der Praxis entstandenen und gemessenen Ergebnisse in Klassen zusammenzufassen. Die Nummern eins bis neun stehen dabei für die unterschiedlichsten Fertigungen und damit verbunden, für die verschiedensten Gründe der Entgratung. Die Nummer eins steht beispielsweise in der Normzahlenreihe für die Feinwerktechnik. Die verwendeten Normalzahlenreihen werden dabei in einem Koordinatensystem in allen vier Quadranten aufgetragen. Angaben der Qualität sind dem symbolischen Achsenkreuz zu entnehmen, in dem für die jeweiligen Quadranten des Querschnittsprofils die gewünschten Klassen eingetragen sind. Die Zahlenwerte der Entgratgrößen reichen dabei von 0,005 mm bis zu 2,5 mm. Die Aufteilung der Zahlen im Koordinatensystem und der Anteil der Restgrathöhe h_1 , der Kantenverrundung r_k und der Kantenfehlbreite b_k , sowie die EQ-Klassen sind in

Abbildung 1-4 dargestellt (vgl. Thilow 2012, S. 37, vgl. Schäfer 1975, S. 52).

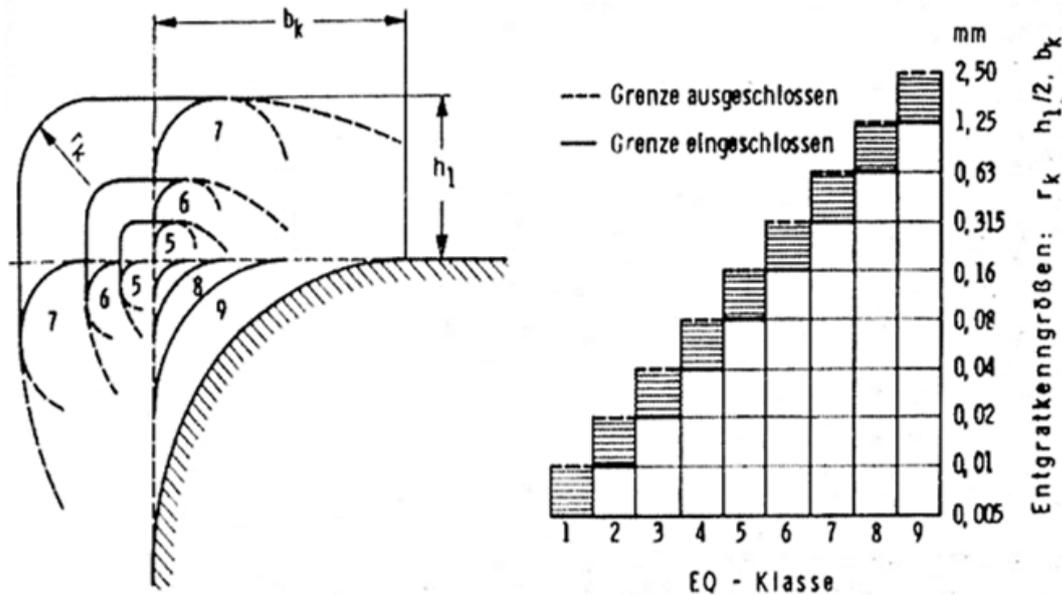


Abbildung 1-4: Klassifizierung der Entgrat-Qualität (Thilow 2012, S. 37)

Angesichts der unterschiedlichsten Gratbildungen, der Vielzahl der Werkstückgeometrien und Werkstoffe, der Lage der Grate (innen oder außen) und der Forderungen und Wünsche an die Entgrat-Qualität haben sich infolge ihrer teilweise komplett verschiedenen Wirkprinzipien diverse Entgrat-Verfahren entwickelt und etabliert. (vgl. Thilow 2012, S. 1)

Die existierenden Entgrat-Verfahren lassen sich grundsätzlich in gezielt und ungezielt arbeitende Entgrat-Verfahren einteilen. Bei den gezielt arbeitenden Entgrat-Verfahren wird der Grat entfernt und das verbleibende Werkstück bzw. die verbleibende Oberfläche wird nicht bearbeitet. Bei den ungezielt arbeitenden Entgrat-Verfahren hingegen wird die komplette Oberfläche bearbeitet, wobei der Grat bevorzugt abgetragen wird, da er sich meist von der restlichen Oberfläche absetzt. (vgl. Schäfer 1975, S. 55)

Zu den bekanntesten und am meisten verbreiteten Entgrat-Verfahren zählen das Gleitschleifen, das elektrochemische und chemische Badpolieren und Badentgraten, das elektrochemische Formentgraten (ECM), die thermische Entgrat-Methode (TEM), das Bürsten und das CO₂-Schneestrahlen. Auch auf einige Sonderverfahren der Entgratetechnik (Druckfließlappen, Magnetabrasives Feinschleifen (MAF), Hochdruckwasserstrahlen (HWS) und Feinschleifen mit Ultraschall (US)), wird in den folgenden Unterkapiteln genauer eingegangen. (vgl. Thilow 2012, S. 3-29)

Welches Verfahren für die jeweilige Anwendung in Frage kommt und damit die Kosten- und Qualitätsanforderungen erfüllt, kann nur mit Kenntnissen der Gratentstehung, Gratvermeidung, Gratreduzierung und dem Wissen zu den Entgrat-Verfahren selbst geklärt werden (vgl. Thilow 2012, S. 1-2). Dazu kommen laut Schäfer Kenntnisse zum Werkstück, d.h. Lage des Grates, Werkstückgröße, Werkstückgestalt, Werkstückgewicht,

Werkstoff, Maß- und Formtoleranz, Oberflächenqualität und weitere für die Entgratung relevante Werkstückmerkmale (Schäfer 1975, S. 56-58).

Ein Überblick über die Auswahl des optimalen Entgrat-Verfahrens für die jeweilige Anwendung mit den gegebenen Umgebungs-, Material- und Qualitätsparametern ist in Abbildung 1-5 dargestellt.

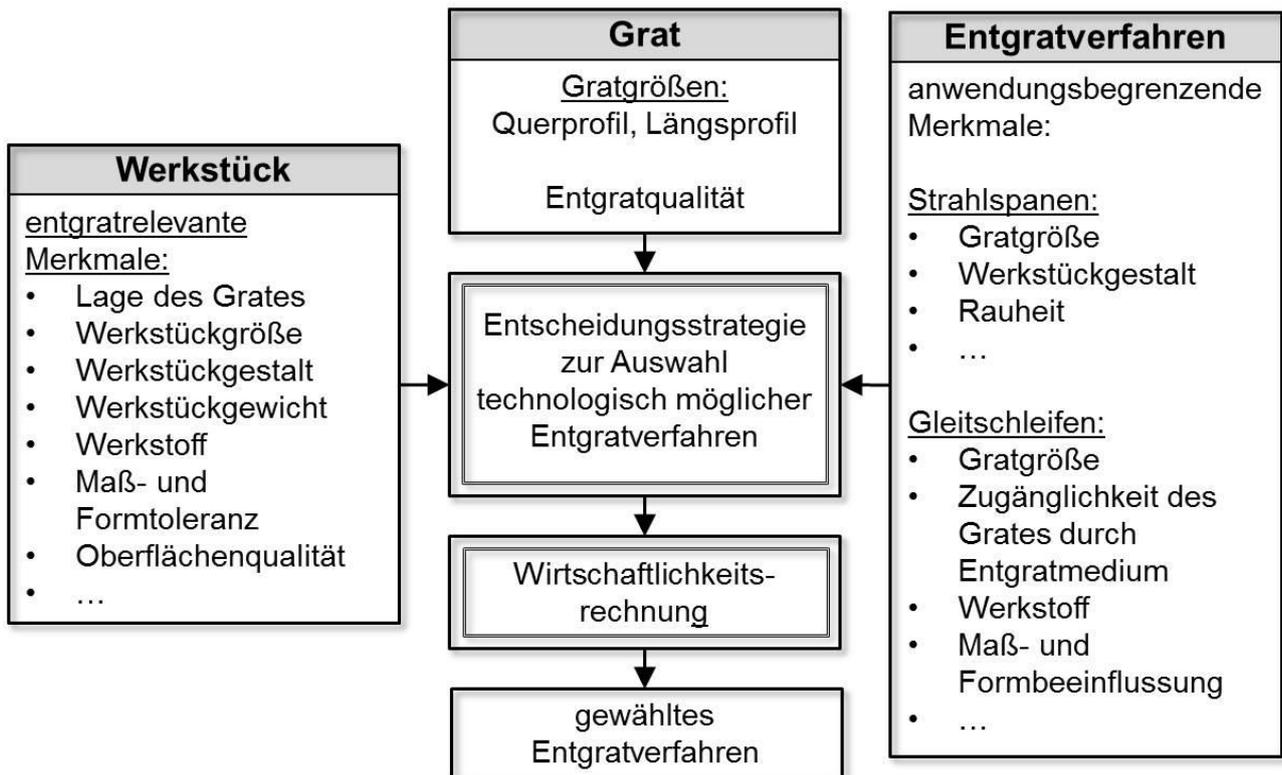


Abbildung 1-5: Lösungsweg zur Auswahl von Entgrat-Verfahren (Schäfer 1975, S. 63)

1.1.1 Gleitschleifen

Das Prinzip des Gleitschleifens ist ein sehr altes Fertigungsverfahren. Es ist ein Verfahren mit undefinierter Schneide, da die enthaltenen Schleifkörper durch vielfache und undefinierte Relativbewegungen die Schleifarbeit am Werkstück ausführen. Die Werkstücke und Schleifkörper bewegen sich dabei in den Arbeitsbehältern, mit in Wasser gelösten chemischen Mitteln, den sogenannten Compounds. (vgl. Thilow 2012, S. 45-47) Das Verfahren ist in Abbildung 1-6 abgebildet.



Abbildung 1-6: Gleitschleifvorgang
(Manfred Brunner 2015)

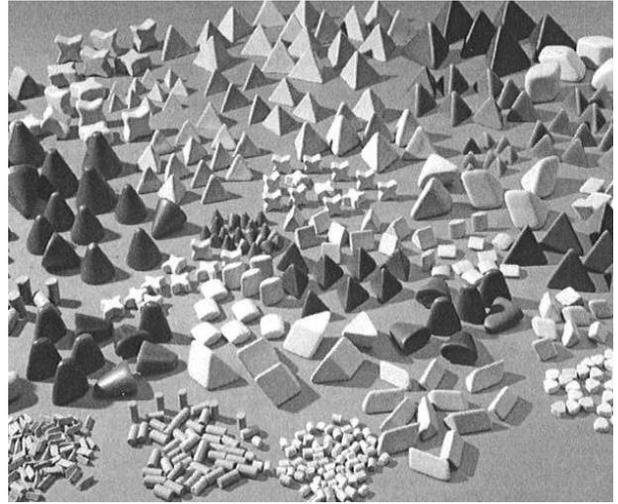


Abbildung 1-7: Schleifkörperformen und Größen
(Thilow 2012, S. 60)

Die Schleifkörper sind in unterschiedlichster Form und Größe und aus diversen Materialien erhältlich (siehe Abbildung 1-7). Nach der Bearbeitung bleiben nur die bearbeiteten, d.h. entgrateten und geschliffenen Teile und das Abwasser, welches aufbereitet werden muss, zurück. Die Elemente des Gleitschleifens sind in Abbildung 1-8 detailliert dargestellt. (Thilow 2012, S. 45–47)

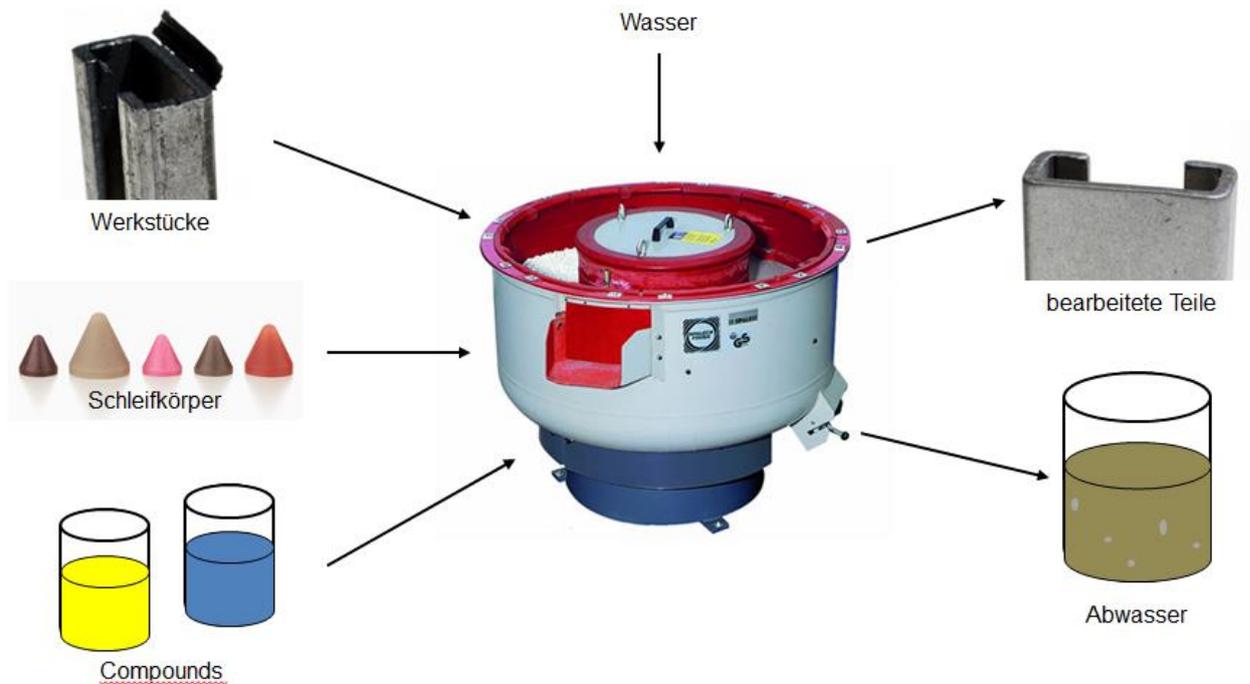


Abbildung 1-8: Elemente des Gleitschleifens (Thilow 2012, S. 46; Stadler 2013a; Stadler 2013b; Fuchs 2015)

Aufgrund des recht einfachen Prinzips gibt es mittlerweile unzählige Anwendungen, die vom Putzen von Guss bis hin zum Hochglanzpolieren von Kontaktlinsen reichen.

Grundsätzlich lassen sich die Gleitschleif-Anlagen in Anlagen mit rotierender Schüttung, mit vibrierender Schüttung und Anlagen mit ruhender Schüttung einteilen, auf denen Metalle, Metalllegierungen, Formteile aus Gummi, Kunststoff oder keramischen Materialien bearbeitet werden können. Abhängig von Gewicht, Form und Größe des Bauteils bzw. Werkstücks können einzelne oder wenige Teile bis hin zu mehreren tausend Stück gleichzeitig bearbeitet werden. Teilweise dienen dabei sogar die Werkstücke selbst als Schleifkörper. (vgl. Thilow 2012, S. 47-55)

Angesichts der guten Wirtschaftlichkeit besitzt das Gleitschleifen einen sehr großen Anwendungsbereich und mehr als 50 % aller Entgrat-Operationen in der Industrie werden heutzutage mit diesem Verfahren durchgeführt. Das automatisierbare Verfahren ersetzt dabei die schwere körperliche Arbeit bei manuellen Entgrat-Vorgängen und schützt den Menschen vor einem Einatmen des gesundheitsschädlichen Schleifstaubs. (vgl. Thilow 2012, S. 46)

Nachteilig bei diesem Verfahren ist allerdings, dass das Gleitschleifen ein empirisches Verfahren darstellt, d.h. es sind kaum exakte bzw. keine wissenschaftlichen Grundlagen vorhanden. Durch die vielen beeinflussbaren Parameter wie Art und Größe des Grates, Zugänglichkeit, Materialeigenschaften, Schleifmittel u.v.m. ist das Ergebnis einer Gleitschleifoperation nur durch Erfahrung, Versuchsbearbeitung oder Erprobung und nicht durch Berechnung vorhersehbar. Desweiteren entstehen durch die teilweise großen Werkstücke und Schleifkörper hohe Lärmpegel, die geeignete Schutzmaßnahmen erfordern, um die Lärmbelastung auf ein geringes und annehmbares Maß zu reduzieren. Die notwendigen Hilfsstoffe, wie Compounds und Wasser, müssen in Aufbearbeitungsanlagen von den Schleifpartikeln und Rückständen bis zu einem festgeschriebenen Maß befreit werden bzw. der Entsorgung zugeführt werden. (vgl. Thilow 2012, S. 45-47)

1.1.2 Elektrochemisches- und chemisches Badentgraten

Das elektrochemische und chemische Badentgraten wird vor allem zur Fein- und Feinstbearbeitung bzw. zur dekorativen und funktionellen Verbesserung der Oberflächenqualität eingesetzt. Wirtschaftlich sinnvoll wird das Verfahren nur durch die positiven Begleiterscheinungen, die bei der elektrochemischen und chemischen Behandlung auftreten. Diese sind neben der Entgratung, die Steigerung der Dauerfestigkeit der Oberfläche und die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit. Das elektrochemische und chemische Badentgraten gehört, wie das Gleitschleifen, zu der Gruppe der ungezielt arbeitenden Entgratverfahren, da die komplette Bauteiloberfläche und nicht nur die zu entgratenden Bauteilgeometrien bearbeitet werden. Der Erfolg dieses Entgratverfahrens wird

sehr stark durch Form und Größe der Grate bestimmt. Da es sich um eine Fein- bzw. Feinstbearbeitung handelt, die das Material über die Oberfläche angreift, sind kleine Grate mit großem Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen besser bzw. überhaupt zu entfernen im Gegensatz zu großen Graten mit einem sehr niedrigen Oberflächen-Volumen-Verhältnis. Dieser Zusammenhang zwischen Größe der Grate und Oberflächen-Volumen-Verhältnis ist in Abbildung 1-9 schematisch dargestellt. Bearbeitbar ist eine große Bandbreite von Materialien, z.B. Stahl, Nickel/Nickellegierungen, Kupfer/Kupferlegierungen, Aluminium, Titan und Molybdän. (vgl. Thilow 2012, S. 75-80)

Grat#1:

- kleiner Grat
- großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis

Seitenansicht:



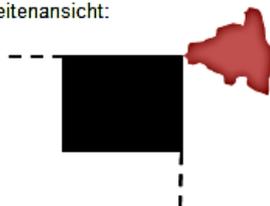
Vorderansicht:



Grat#2:

- großer Grat
- kleines Oberflächen-Volumen-Verhältnis

Seitenansicht:



Vorderansicht:



Abbildung 1-9: Gratbeispiele - elektrochemisches- und chemisches Badentgraten

Das elektrochemische Badentgraten funktioniert durch die Umkehrung des galvanischen Prinzips, d.h. das zu bearbeitende Werkstück wird anodisch in einen Gleichstromkreis eingebettet, in ein Elektrolytbad getaucht und elektrisch über Gegenelektroden kontaktiert. Die Entfernung der Grate wird dabei durch das Anführen einer Gegenelektrode an die zu bearbeitenden Stellen des Bauteils durchgeführt. Die Anpassung dieser Gegenelektroden ist sehr aufwendig und kostenintensiv, da diese an die jeweilige, teilweise sehr komplexe, Bauteilform angepasst werden muss. Die Entfernung des Materials erfolgt dabei unter der Wirkung von Gleichstrom und Elektrolyt und ohne jegliche mechanische-, thermische- oder chemische Belastung der Werkstückoberfläche. (vgl. Thilow 2012, S. 75-80)

Das chemische Badentgraten arbeitet nach einem sehr ähnlichen Prinzip wie das elektrochemische Badentgraten, mit dem Unterschied, dass die Energie nicht durch eine Gleichstromquelle zur Verfügung gestellt wird, sondern durch eine chemische Reaktion im Elektrolyten produziert und geliefert wird. Vorteil dieser Energiebereitstellung ist, dass auch Oberflächenbereiche bearbeitet werden können, die durch die Elektrodenpositionierung beim elektrochemischen Entgraten nicht erreicht werden können. (vgl. Thilow 2012, S. 75-80)

Die Ergebnisse einer Fein- bzw. Feinstbearbeitung durch elektrochemisches und chemisches Badentgraten ist in den Abbildung 1-10 und Abbildung 1-11 anhand eines Filterblechs und einer Nadelspitze dargestellt.

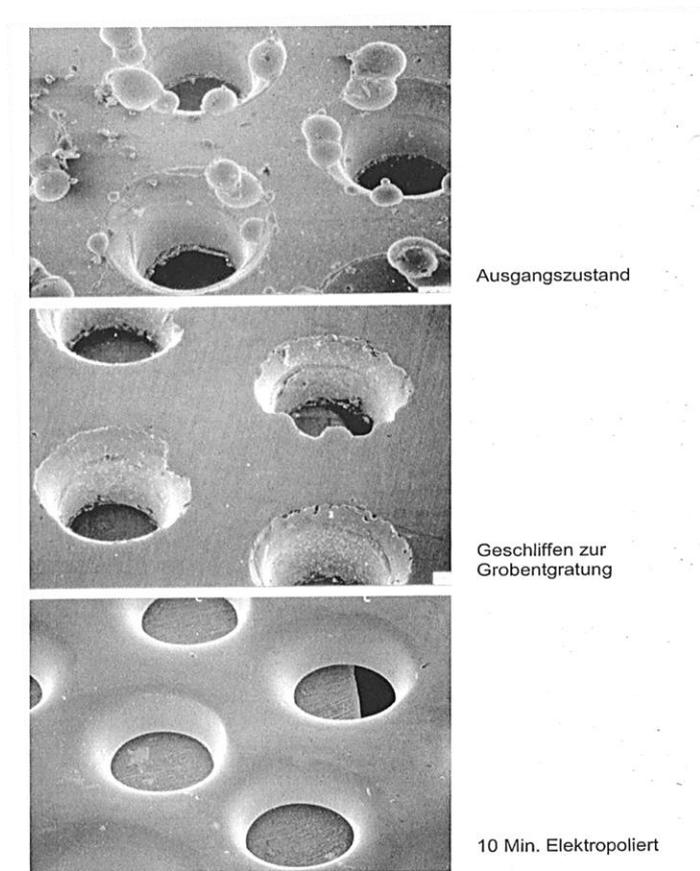


Abbildung 1-10: Filterblech: Ausgangszustand, Geschliffen, Elektropoliert (Thilow 2012, S. 87)

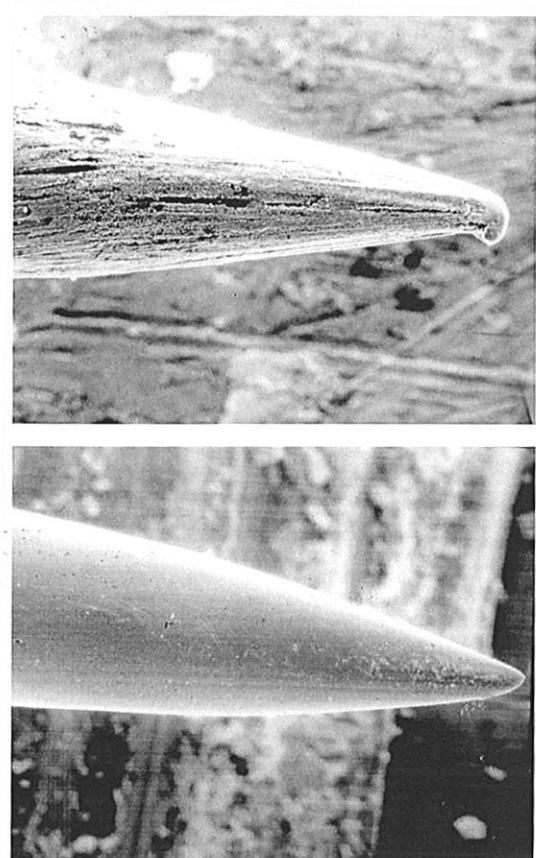


Abbildung 1-11: Nadelspitze: poliert und chemisch badentgratet (Thilow 2012, S. 88)

Die Kosten für das elektrochemische und chemische Badentgraten sind maßgeblich von der Dauer der Behandlung, der erforderlichen Vorbehandlung, sowie von den genutzten Chemikalien abhängig. Zusätzlich gilt, umso komplizierter der Aufbau des zu entgratenden Werkstücks, desto teurer wird vor allem beim elektrochemischen Behandeln die Herstellung und Anbringung der Kontakte. (vgl. Thilow 2012, S. 90)

Da beide Verfahren mit Säuren arbeiten, welche beim Spülen des Werkstücks nach der Behandlung in geringen Mengen im Spülwasser vorhanden sind, muss dieses gemäß

den gesetzlichen Vorschriften neutralisiert werden, um eine Umweltbelastung auszuschließen. (vgl. Thilow 2012, S. 90)

1.1.3 Elektrochemisches Formentgraten

Das elektrochemische Formentgraten ist dem Verfahren des Badentgratens sehr ähnlich, mit dem bedeutenden Unterschied, dass es bei diesem Verfahren nicht wie beim elektrochemischen oder chemischen Badentgraten, wie in Kapitel 0 beschrieben, zu einem ungezielten kompletten Flächenabtrag kommt. Der gezielte Abtrag wird beim elektrochemischen Formentgraten durch eine isolierende Kunststoffschicht an allen Elektrodenpartien, die unbearbeitet bleiben sollen, erreicht. Das Entgratprinzip ist in Abbildung 1-12 vereinfacht dargestellt. (vgl. Thilow 2012, S. 91-94)

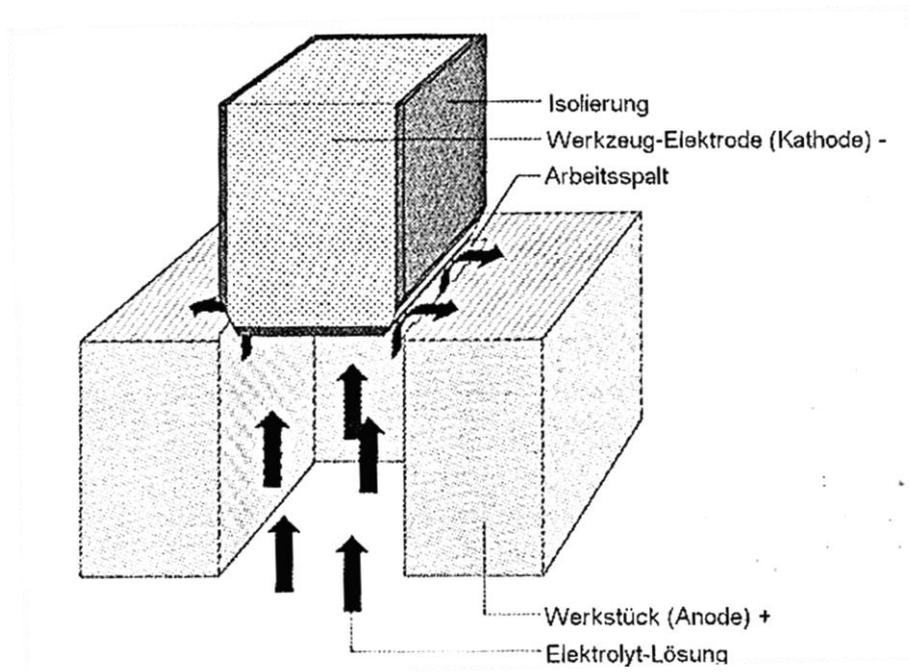


Abbildung 1-12: Elektrochemisches Formentgraten (Thilow 2012, S. 93)

Die gezielte Wirkung ist wirtschaftlich sehr vorteilhaft, da dadurch in einem Arbeitsgang einfache Konturen gratfrei hergestellt werden können. (vgl. Thilow 2012, S. 91-94)

Beim elektrochemischen Formentgraten werden hauptsächlich umweltfreundliche und physiologisch unbedenkliche Elektrolytlösungen, wie z.B. Kochsalz (NaCl) oder Natriumnitrit (NaNO_2), eingesetzt. Die Hydroxide, gewissermaßen die „Späne“, die bei der elektrochemischen Behandlung anfallen, müssen trotzdem mit Hilfe von Reinigungsanlagen aufwendig und daher mit hohen Kosten verbunden, aus dem Kreislauf entzogen werden. (vgl. Thilow 2012, S. 105)

1.1.4 Thermische Entgratmethode (TEM)

Die thermische Entgratmethode, kurz TEM, gehört ebenfalls zu den ungezielt wirkenden Entgratverfahren und erreicht eine sichere Gratentfernung auch an schwer zugänglichen Innengeometrien ohne an der Werkstückoberfläche Abtrag zu erzeugen. TEM wird vor allem bei gut oxidierenden Werkstoffen mit komplizierten Strukturen und schlechten Zugänglichkeiten eingesetzt. (vgl. Thilow 2012, S. 106)

Beim thermischen Entgraten, bzw. bei dem thermisch-chemischen Entgratverfahren, wird eine Brennkammer, in der sich das zu entgratende Bauteil befindet, mit einem Sauerstoff-Brenngasgemisch gefüllt. Durch eine Zündung kommt es zu einem sehr kurzen, ein paar Millisekunden dauernden Verbrennungsvorgang, wodurch die Grate verglühen bzw. verbrennen. Der Aufbau einer TEM-Anlage ist in Abbildung 1-13 dargestellt. Durch die sehr kurzen Verbrennungsvorgänge wird das Werkstück beim Verbrennungsvorgang nur unwesentlich erwärmt, wodurch es zu keiner Beeinträchtigung des Bauteils selbst kommt. In den Bereichen des Werkstücks, die ein großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen, d.h. vor allem an den Graten, kommt es hingegen zu einem Wärmestau bzw. Glühen, wodurch der Grat verbrennt. Das Verfahren lässt sich dabei in die beiden Phasen „Anzünden“ (Erhitzen – thermisch) und „Entgraten“ (Verbrennen – chemisch) einteilen. Als Brenngase eignen sich dabei vorzugsweise Wasserstoff, Methan oder Erdgas (bei max. 5% Stickstoffanteil). (vgl. Thilow 2012, S. 106–107)

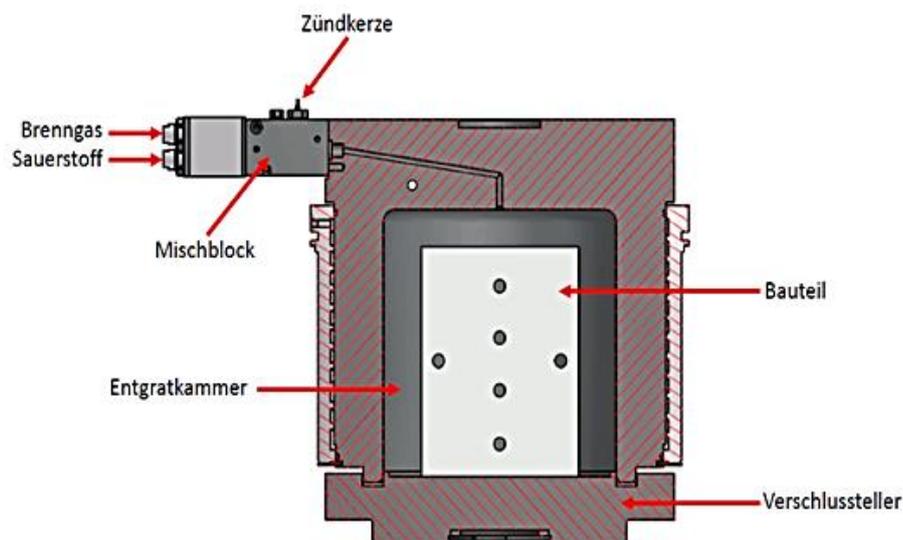


Abbildung 1-13: Aufbau TEM-Anlage (Struckmann 2014)

TEM erfordert eine gründliche Vor- und Nachbehandlung. In der Vorbehandlung müssen vor dem Erhitzen und Verbrennen für den TEM-Prozess störende Fertigungsrückstände und lose Verunreinigungen entfernt werden. Die nach dem Prozess an der Oberfläche haftenden Verbrennungsrückstände müssen durch eine entsprechende Nachbehandlung

entfernt werden, was zu hohen Kosten und nur bei komplizierten Strukturen und schlechten Zugänglichkeiten zu einem wirtschaftlichen Einsatz führt. (vgl. Thilow 2012, S. 117)

1.1.5 Bürsten

Das Bürsten arbeitet nach dem Prinzip, dass viele einzelne Borsten die Oberfläche angreifen, Rillen durch elastische Verformungen im Werkstück erzeugt werden, der Werkstoff dadurch ermüdet und einzelne Partikel in Folge dessen ausbrechen. Entscheidend für die Größenordnung des Materialabtrags ist dabei der Verschleiß der Bürste. Bei harten Werkstoffen werden die Oberflächenrauigkeiten bei fast keinem Materialabtrag verschoben. Bei weichen Materialien kommt es bei großem Materialabtrag sogar zur Entstehung neuer Grate, welche allerdings durch darauffolgende Borsten, die sich an der Bürste befinden, leicht abgebrochen werden können. Beim Überstreichen der Oberfläche gleiten die Borsten nicht über die Oberfläche, sondern springen, was zwar einen guten Effekt für den Abtrag des Werkstoffes darstellt, allerdings schlechte Rauheitswerte an der Oberfläche zur Folge hat. (vgl. Thilow 2012, S. 154-155)

In der Praxis kommen die unterschiedlichsten Bürstenformen zum Einsatz, sogar teilweise mit Besetzung, z.B. durch Stahldraht oder Diamanten. Vier Beispielbürsten sind in Abbildung 1 14 zu sehen. (vgl. Thilow 2012, S. 166-170)

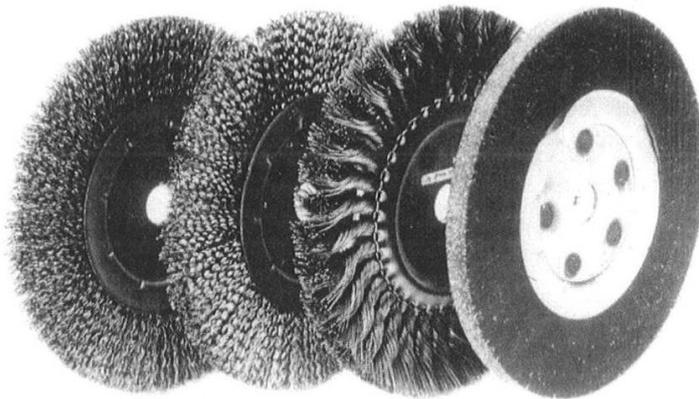


Abbildung 1-14: Bürstenformen (Thilow 2012, S. 154)

Wenn, bedingt durch die Gratfußstärke oder die Lage des Grates, der zu bearbeitende Grat durch Bürstenentgraten nicht entfernt werden kann oder eine Kantengeometrie gefordert ist, die nicht durch Bürsten erzielbar ist, kommen Fräsen, Schleifen, Hackentgraten oder Feilen zum Einsatz. (Thilow 2012, S. 175)

1.1.6 CO₂-Schneestrahlen

Beim CO₂-Schneestrahlen wird CO₂-Schnee durch Entspannen (rapide Abkühlung des CO₂ auf -78,5°C) aus der Flüssigphase heraus erzeugt. Die so erzeugten Schneekristalle treffen auf die zu entgratende Werkstückoberfläche und lösen dort einen mechanischen sowie thermischen Effekt und einen Sublimationseffekt aus. Die drei Effekte erzielen neben der Entgratung auch eine Reinigung des Bauteils. (vgl. Kaiser 2014)

Der mechanische Effekt entsteht dabei durch die kinetische Energie der Schneekristalle, welche auf die Oberfläche treffen, sowie durch turbulente Strömungen um die Grate. (vgl. Kaiser 2014)

Der thermische Effekt sorgt durch die -78,5°C kalten Trockeneispartikel für eine Abkühlung der Schmutzschicht, die sich in Folge dessen zusammenzieht und spröde wird, was ein Ablösen der ungewünschten Verschmutzungen auslöst. Die Temperatur des Werkstücks bzw. der Werkstückoberfläche sinkt dabei kaum. (vgl. Kaiser 2014)

Das CO₂ wirkt zusätzlich wie ein Lösungsmittel und entfernt Verschmutzungen wie beispielsweise Fette oder Öle. (Schulz 2013)

1.1.7 Sonderverfahren der Entgrattechnik

Unter den Sonderverfahren der Entgrattechnik versteht man Verfahren, die aus wirtschaftlichen- und/oder technischen Gesichtspunkten normalerweise nicht in die Verfahrensauswahl miteinbezogen werden. Sie dienen allerdings in einigen Fällen als Notbehelf, wenn kein anderes Verfahren zum gewünschten Ergebnis führt. Zu ihnen gehören das Druckfließläppen, das magnetabrasive Feinschleifen (MAF), das Feinschleifen mit Ultraschall (US) und das Hochdruckwasserstrahlen (HWS). Im Einsatz befinden sich diese Verfahren bei Spezialanwendungen in der Industrie, wie beispielsweise dem Entgraten von sehr komplexen Bauformen bzw. speziellen Materialarten, und in Forschungsinstituten zur Erprobung, Verbesserung und Weiterentwicklung der Verfahren. (vgl. Thilow 2012, S. 120)

1.1.8 Druckfließläppen

Beim Druckfließläppen, auch als Strömungsschleifen bekannt, werden Werkstückkonturen mit einer Paste unter Druck mit vorgegebenen Frequenzen beaufschlagt. Die viskose Paste mit Schleifkörpern unterschiedlichster Größe wird dabei mithilfe von Zylindern und Kolben in eine geschlossene Vorrichtung gepresst, die das Bauteil umschließt. In der

Praxis muss dieser Vorgang bis zu hundert Mal wiederholt werden, bis die gewünschte Entgratung und Oberflächenqualität vorliegt. Verstellbare Parameter sind die Pastenvolumina und die Druckbereiche, in der das Druckfließläppen abläuft. (vgl. Thilow 2012, S. 120-130)

1.1.9 Magnetabrasives Feinschleifen

Das magnetabrasive Feinschleifen bearbeitet die Oberfläche von vor allem rotationssymmetrischen Werkstücken in einer Anordnung aus mehreren Elektro- oder Dauermagneten. Zwischen den Polen befinden sich dabei das zu bearbeitende Werkstück und ein magnetisches Schleifmittel. Das Magnetfeld hält das Arbeitsmittel im Raum und presst es an das Werkstück. Erst durch den Werkstück- oder Magnetantrieb entsteht zwischen Werkstück und Schleifmittel eine Relativbewegung, die den eigentlichen Bearbeitungseffekt hervorruft. Die Werkstückgröße ist durch die Magnetfeldstärke nach oben begrenzt. Es kommen preiswerte Dauermagnete, mit dem Nachteil der begrenzten Einstellbarkeit und Stärke, aber auch teurere Elektromagnete zum Einsatz, die diese Nachteile nicht aufweisen. (vgl. Thilow 2012, S. 131-136)

1.1.10 Feinschleifen mit Ultraschall

Das Feinschleifen mittels Ultraschall lässt sich in das gezielte- und ungezielte Bearbeiten mit Ultraschall einteilen. (vgl. Thilow 2012, S. 148)

Beim gezielten Bearbeiten wird ein Werkzeug, bestehend aus einem Verstärkerrüssel mit integrierter Schleifmittelversorgung, durch einen an einen Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Konverter in Ultraschallschwingungen versetzt. Der Entgrateffekt entsteht durch das Umströmen der Grate mit Schleifmittel und durch die Hämmerwirkung und die damit verbundene Ermüdung des Werkstoffs, was zum Ausbrechen der Grate führt (siehe Abbildung 1 15). (vgl. Thilow 2012, S. 148)

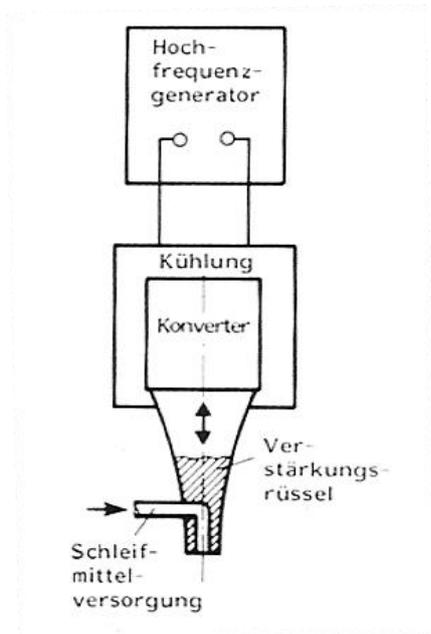


Abbildung 1-15: Gezieltes Feinschleifen mit Ultraschall (Thilow 2012, S. 149)

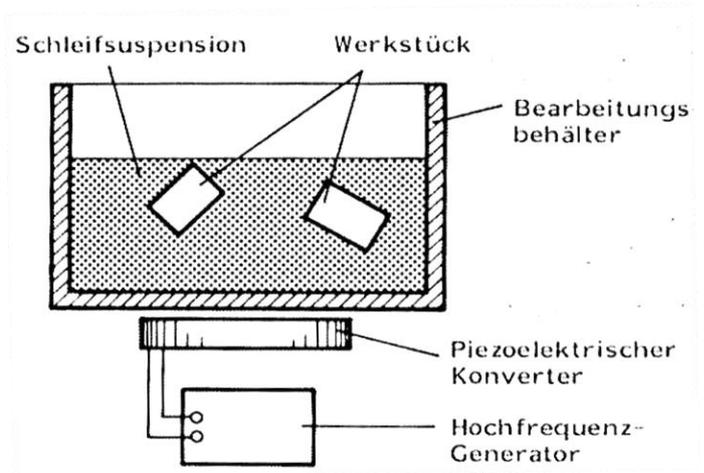


Abbildung 1-16: Ungezieltes Feinschleifen mit Ultraschall (Thilow 2012, S. 151)

Beim ungezielten Bearbeiten wird ein kompletter Behälter, welcher das Werkstück und ein Schleifmittel enthält, in Schwingungen versetzt. Das Bearbeitungsprinzip entspricht näherungsweise dem Reinigen mit Ultraschall (siehe Abbildung 1 16). Probleme bei der ungezielten Bearbeitung bereiten die hohen Bearbeitungszeiten und die Schleifmittel, welche nur schwierig im Wasser in der Schwebe gehalten werden können. (vgl. Thilow 2012, S. 148)

Die Ultraschallwirkung kann durch chemische Zusätze beim gezielten- als auch beim ungezielten Bearbeiten gesteigert werden. (vgl. Thilow 2012, S. 148)

1.1.11 Hochdruckwasserstrahlen

Der Hochdruckwasserstrahl kann durch zwei Abtragungsprinzipien – das sekunden-schnelle Abbrechen des Grates an der dünnsten Stelle des Grates oder das erosive Abtragen über längere Bearbeitungszeiten – genutzt werden. Das erosive Abtragen ist dabei ein undefinierter Bearbeitungsvorgang, der erst mit der Zeit durch Beaufschlagung durch den Wasserstrahl eintritt. Der sinnvollere und deshalb auch meist gewünschte Abtragungseffekt ist das Abbrechen der Grate. Abrasivstoffe, die dem Wasser zugemischt werden, steigern zwar die Entgratergebnisse, aufgrund der höheren Verschmutzung der Anlagen, des höheren Düsenverschleißes und der schwierigeren Reinigung des Wassers wird diese Verfahrensvariation allerdings kaum eingesetzt. (vgl. Thilow 2012, S. 136-137).

Verstärkt zum Einsatz kommen in der Praxis hochdruckfähige Reinigungsmedien (siehe Abbildung 1 17), die wie die Abrasivstoffe die Reinigungswirkung verstärken, allerdings mit geringeren Nachteilen für die Anlage, die Düsen und das Wasser. (vgl. Schulz 2013)



Abbildung 1-17: Hochdruckwasserstrahlen an Zylinderkopf (Schulz 2013)

Die Strahlleistung setzt sich beim Hochdruckwasserstrahlen aus der Durchflussmenge Q , der Strahlgeschwindigkeit v und der Strahlkraft F zusammen. Die am Austritt angebrachte Düse – von handelsüblichen Düsen bis zu Sonderdüsen – entscheidet über das resultierende Strahlbild sowie die Leistungsverteilung im Strahl und grenzt so den Anwendungsbereich ein. (vgl. Schlatter 1986, S. 40)

Bei den heutigen, mit einem Hochdruckwasserstrahl arbeitenden Maschinen, lassen sich zwei grundsätzliche Typen, das Jet Cutting und das Hochdruckwasserstrahlen, unterscheiden. Die Bearbeitung beim Jet Cutting wird bei sehr hohem Druck, bis zu 4000 bar, mit geringem Durchfluss durchgeführt. Dieses Prinzip wird vor allem zum Wasserstrahlschneiden genutzt, da bei derart hohen Drücken die Gefahr der Bauteilbeschädigung bei einer Entgratanwendung zu hoch ist. Die Mehrzahl der Entgratanlagen arbeitet nach dem Prinzip des Hochdruckwasserstrahls, das bei niedrigerem Druck, bis zu 1000 bar, und großen Durchflussmengen abläuft. (vgl. Thilow 2012, S. 136-137)

Der große Vorteil des Hochdruckwasserstrahlens stellt das gleichzeitige Reinigen und Entgraten des Werkstücks dar, was Zeit und Kosten im Bearbeitungsprozess einspart. (vgl. Schulz 2013)

Der bedeutendste Nachteil beim Hochdruckwasserstrahlen sind allerdings die immens großen Energiemengen, die benötigt werden, um mit Hilfe der Pumpen, die erforderlichen Drücke bis zu 4000 bar zu erzeugen. (vgl. Schulz 2013)

1.1.12 Zusammenfassung der Entgrat-Techniken

Es existiert eine Vielzahl von Entgratverfahren, die in der Industrie zum Einsatz kommen. Viele Bauteile werden heutzutage in der Industrie durch Gleitschleifen entgratet. Durch das Fehlen von exakten wissenschaftlichen Grundlagen und die vielen beeinflussbaren Parameter stellt es allerdings ein nicht planbares und risikoreiches Verfahren in jedem Produktionssystem dar. Zusätzlich hat das Verfahren mit den Umweltbelastungen der Abwässer zu kämpfen. Auch das elektrochemische- und chemische Badentgraten sowie das elektrochemische Formentgraten haben durch den Einsatz von Chemikalien einen großen Entsorgungsaufwand zur Folge. Die Thermische Entgratmethode (TEM) kommt zwar ohne den Einsatz von Chemikalien aus, jedoch sind enorme Mengen Energie nötig, um die gewünschten Abbruch- und Ablöseeffekte der Grate zu erzielen. Alle anderen Verfahren – wie das Bürsten, das CO₂-Schneestrahlen, das Druckfließläppen, das magnetabrasive Feinschleifen, das Feinschleifen mit Ultraschall und das Hochdruckwasserstrahlen – stellen Verfahren für spezielle Anwendungsgebiete dar. (vgl. Thilow 2012, S. 45-180)

Die Nachteile der einzelnen Verfahren bzw. die begrenzte Nutzbarkeit zeigt den Bedarf nach Entwicklung neuer Entgrattechniken, wie beispielsweise dem Entgraten mittels Ultraschall-Sonotroden, welche ohne Chemikalien auskommen sowie einen extrem niedrigeren Energiebedarf aufweisen und gleichzeitig für viele Anwendungen in der Industrie in Frage kommen.

1.2 Ultraschalltechnik

Heutzutage kommt die Ultraschalltechnik in fast allen technischen Teilbereichen zum Einsatz. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zur Aufspürung von Lunkern, Inhomogenitäten und Rissen (siehe Abbildung 1 18), zum Reinigen von Oberflächen jeglicher Art in Reinigungsprozessen (siehe Abbildung 1 19), in der Elektronik, Mikroelektronik und Signaltechnik für aktive und passive Bauelemente zur Umwandlung und Verarbeitung hochfrequenter elektronischer Signale, in der Medizin für Anwendungen in der Ultraschalldiagnostik, bei der Geburtenhilfe und zur biologischen und medizinischen Behandlung durch die Wirkung des Ultraschalls, sowie bei sehr hohen Ultraschalleistungen in der Verbindungstechnik, z.B. Ultraschalllöten und -schweißen, und der Ultraschallkavitation, der Bildung und Auflösung von Dampfblasen bzw. mit Dampf gefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten. (vgl. Sorge 2002, S. 64-110)

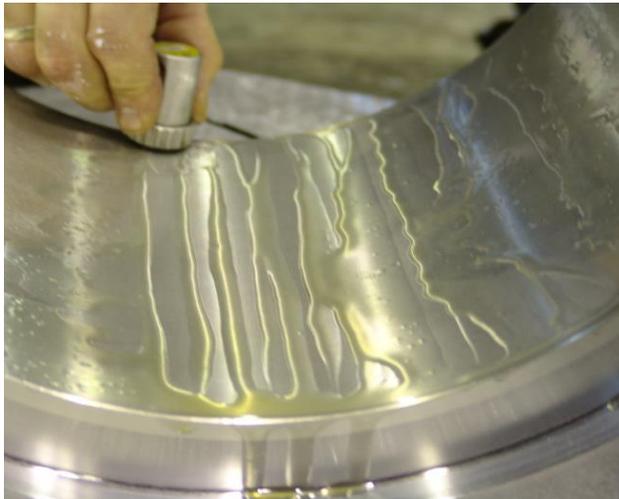


Abbildung 1-18: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Donner 2007)



Abbildung 1-19: Ultraschallreinigung (Hilge 2007)

Der Ultraschallbereich befindet sich in einem Frequenzbereich von ca. 10^4 Hz bis 10^9 Hz und ist für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbar. Unterhalb des Ultraschallbereichs befindet sich der Bereich des Infra- und Hörschalls, oberhalb der des Hyperschalls und der Phononen (siehe Abbildung 1 20). Die Frequenz steigt vom Infrashall zu Phononen, dagegen sinkt jedoch gleichzeitig die Wellenlänge auf einen verschwindend geringen Anteil. (vgl. Sorge 2002, S. 16)

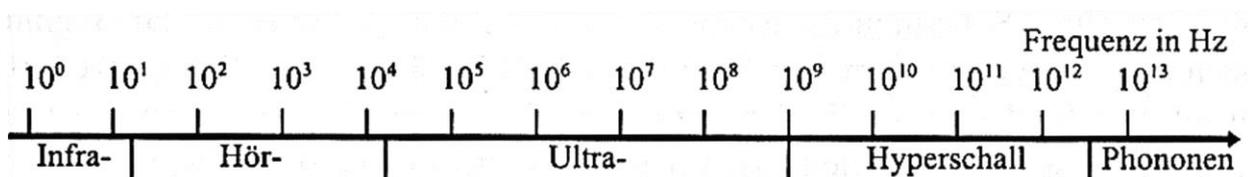


Abbildung 1-20: Frequenzspektrum elastischer Wellen (Sorge 1985, S. 13)

Die Ultraschaltechnik beruht auf den grundlegenden Entdeckungen der Magnetostriktion 1847 durch J. P. Poule und dem Piezoeffekt der Brüder Curie von 1880 (Sorge 2002). Die Magnetostriktion beschreibt dabei jegliche Änderung der Dimension eines Körpers durch Änderung seines magnetischen Zustandes (Mücklich/Trinh 2010). Die Entdeckung des Piezoeffektes der Brüder Curie beschreibt hingegen das Auftreten von elektrischen Ladungen durch mechanische Spannung oder mechanische Dehnung in definierten Richtungen auf bestimmten Flächen. (vgl. Sorge 2002, S. 20)

Es existieren die unterschiedlichsten Ultraschallerzeuger, die die oben genannten Spannungen bzw. Dehnungen erzeugen. Der Älteste ist der mechanische Ultraschallgeber, welcher allerdings stark an Bedeutung verloren hat. Ein wichtiger Ultraschallgenerator stellt der nach dem magnetostriktiven Prinzip dar. Die mit Abstand am häufigsten verwendeten Ultraschallgeneratoren funktionieren jedoch heutzutage Mithilfe des piezoelektrischen Effekts. (vgl. Sorge 2002, S. 18-20)

Beide, sowohl der magnetostriktive als auch der piezoelektrische Schwingungserzeuger, wandeln die elektrische Energie in eine mechanische Energie analog zu einem Lautsprecher (vgl. Gross 1985, S. 9).

1.2.1 Magnetostriktiver Ultraschallgenerator

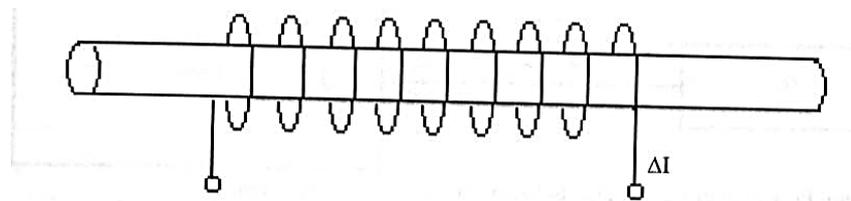


Abbildung 1-21: Magnetostriktionseffekt in ferromagnetischem Material (Sorge 2002, S. 20)

Magnetostriktive Ultraschallgeneratoren beruhen auf dem Prinzip, dass ein ferromagnetischer Körper, meist ein Stab, in einem Magnetfeld (siehe Abbildung 1 21) seine Abmessungen periodisch verändert bzw. deformiert wird (vgl. Sorge 2002, S. 20-23). Die Umwandlungsgrade von elektrischer Energie in mechanische Schwingungen liegen dabei bei ca. 60 % (vgl. Gross 1985, S. 9). Bei Anregung in der Grundfrequenz des Stabes erhält man für die Amplitude maximal etwa ein Zehntausendstel seiner Länge (vgl. Sorge 2002, S. 20-23). Die Folgen daraus, die einen großen Nachteil bei den magnetostriktiven Ultraschallgeneratoren darstellen, sind die sehr niedrigen erreichbaren Frequenzen (vgl. Sorge 2002, S. 20-23).

1.2.2 Piezoelektrischer Ultraschallgenerator

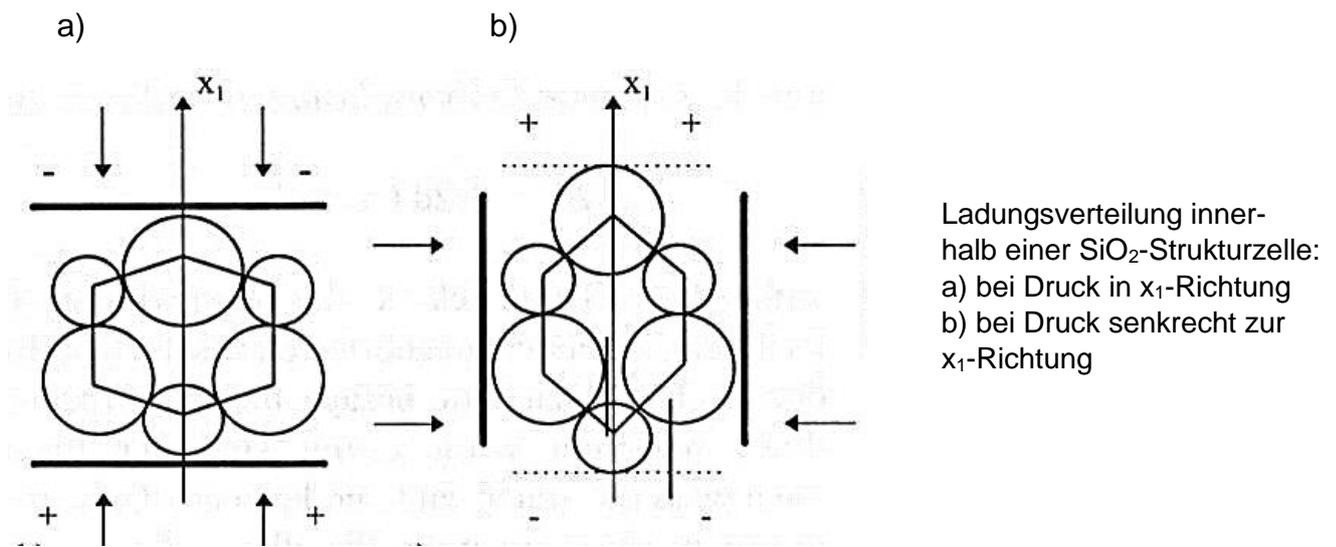


Abbildung 1-22: Druckrichtungen und deren Veränderung der SiO₂-Struktur (Sorge 2002, S. 21)

Der piezoelektrische Ultraschallgenerator beruht auf dem Effekt, dass bei manchen Kristallen (z.B. Quarz) unter mechanischer Spannung bzw. Dehnung in definierten Richtungen auf bestimmte Flächen elektrische Ladungen auftreten (siehe Abbildung 1 22). Diesen Effekt nennt man den „piezoelektrischen Effekt“. Genutzt wird allerdings die Umkehrung dieses Effektes – der reziproke piezoelektrische Effekt. Das heißt es wird elektrische Spannungen an Kristallflächen angelegt, an denen ursprünglich Ladungen auftraten. Dadurch kommt es zum periodischen Zusammenziehen bzw. Ausdehnen des Kristalls (vgl. Sorge 2002, S. 20-23). Die Umwandlungsrate liegt, verglichen mit der des magnetostruktiven Ultraschallerzeugers deutlich höher, bei ca. 90 % (vgl. Gross 1985, S. 10). Man verwendet bei technischen Anwendungen zur Erzeugung von Ultraschall keine kompletten Quarzeinkristalle sondern schneidet aus ihnen geeignete Schwinger heraus. Die Frequenz ist dabei maßgeblich von der Dicke des Schwingers abhängig und die Amplitude des erzeugten Schalldrucks ist im Schwinger proportional zu der am Kristall anliegenden elektrischen Spannung. Das heißt sowohl Frequenz als auch Amplitude sind durch Schwingungskörper- und Spannungszuführungsparameter genau einstellbar. Genutzt werden neben Quarz bereits Lithiumsulfat, Lithiumniobat, Bleimetanniobat und viele Keramiken auf Basis von Bariumtitanat und Bleizirkonattitanat. Vorteile von Keramiken gegenüber den klassischen Schwingern aus Quarz sind die von vorneherein beeinflussbare Formgebung, die niedrigeren Betriebsspannungen bei gleicher Leistung, die dadurch resultierenden niedrigen Kosten und das Vorhandensein größerer Stückzahlen. (vgl. Sorge 2002, S. 20-23)

1.2.3 Ultraschall mit hoher Leistungsdichte

Die Anwendungen des Ultraschalls, welche unter sehr hohen Leistungen ablaufen, wie beispielsweise das Ultraschalllöten und -schweißen, beruhen auf der Wirkung von Kavitation (vgl. Lehfeldt 1973, S. 64-66). „Unter Kavitation versteht man ganz allgemein die Bildung von zunächst mikroskopisch kleinen Hohlräumen durch Unterdruck in einer Flüssigkeit. Beim anschließenden Zusammenschlagen solcher Hohlräume treten dann an ihren Grenzen sehr starke Kräfte auf“ (Lehfeldt 1973, S. 64-66). Diese Kräfte werden genutzt, um mit ihrer hohen Energie, Material bzw. Verunreinigungen von Oberflächen abzutragen.

Bei Turbinenschaufeln oder Schiffschrauben ist das Phänomen der Kavitation hingegen schon lange als Problem bekannt, da durch Kavitation Schäden auf Grund des langsamen Abtrags der metallischen Oberfläche ausgelöst werden (vgl. Lehfeldt 1973, S. 64-66). Abbildung 1-23 zeigt einen derartigen Abtrag.

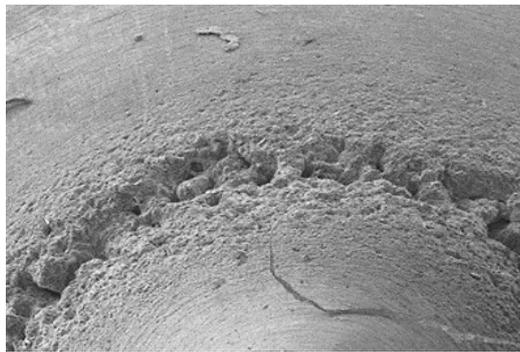


Abbildung 1-23: Kavitationsschaden (Rappen 2014)

Die Größe der Kavitations-Blasen ist abhängig von der anliegenden Ultraschall-Frequenz. Bei kleiner werdenden Ultraschall-Frequenzen steigt der Blasen-Resonanzradius überproportional an (siehe Abbildung 1-24). (Jung 2013)

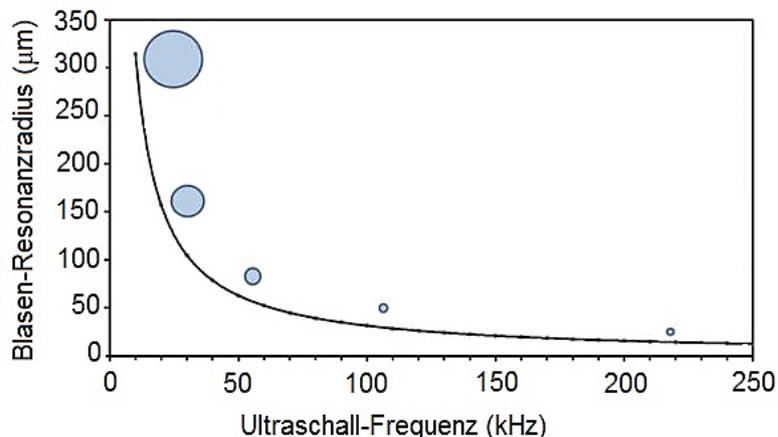


Abbildung 1-24: Abhängigkeit der Kavitationsblasengröße (Jung 2013)

Die oszillierende Blase wächst hingegen mit zunehmender Ultraschallintensität und nach dem Erreichen einer bestimmten Größe kommt es zum Blasen kollaps (Implosion), bei dem sich die Blase innerhalb von kürzester Zeit zusammenzieht. Bei diesem Kollaps treten die oben beschriebenen Kräfte an den Grenzflächen auf. Diese Grenzflächenkräfte nennt man „Micro Jet“, welche Geschwindigkeiten zwischen 100 – 500 km/h erreichen können. Diese wiederum lösen bei Schiffschrauben die genannten Schäden aus oder können bei technischen Anwendungen genutzt werden (siehe Abbildung 1 25). (vgl. Jung 2013)

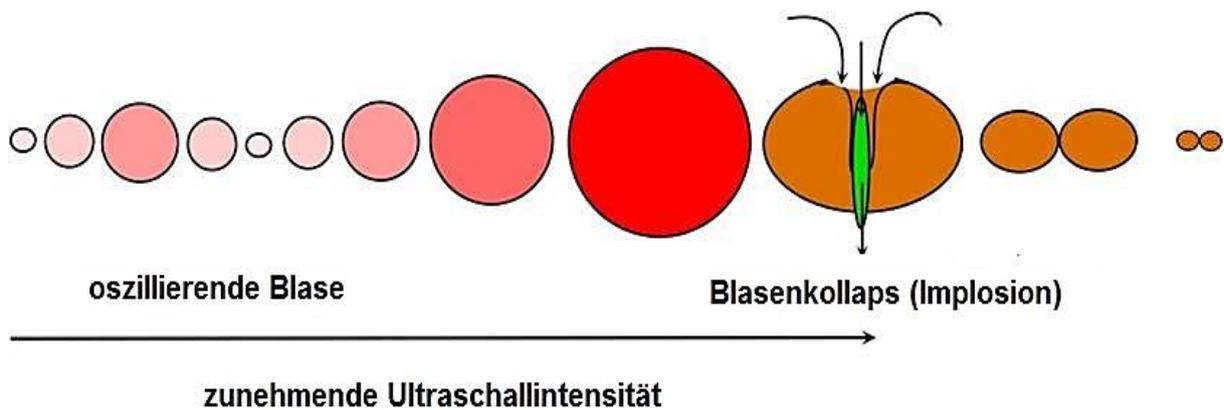


Abbildung 1-25: Blasen kollaps (Jung 2013)

1.2.4 Schalltechnik und Sonotrodentechnik

Schallwellen können sich überall dort ausbreiten, wo Moleküle oder Atome vorhanden sind, d.h. in gasförmigen-, flüssigen- und festen Stoffen. Es existieren dabei drei wesentliche Wellenformen: die Longitudinalwelle, bei der die Schallausbreitung axial zur Erregungsrichtung, d.h. in gleicher Richtung wie der Wellenerreger, erfolgt, die Transversalwelle, welche sich im rechten Winkel zur Erregung ausbreitet und die Biegewelle, die durch asymmetrische Massenverhältnisse verursacht wird und nur in festen Körpern auftritt. Bei der Ultraschallbearbeitung kann nur die Longitudinalwelle genutzt werden. Die Transversalwelle und die Biegewelle besitzen die falsche Ausbreitungsrichtung bzw. Ausbreitungsart und führen deswegen nicht zu den gewünschten Effekten, die für die Ultraschallbearbeitung genutzt werden. (vgl. Gross 1985, S. 12)

Um eine verlustarme Übertragung mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu realisieren, ist es erforderlich alle Übertragungsglieder auf Resonanz abzustimmen. Dieser Zustand

ermöglicht die größte Schwingungsamplitude und zwar an den frei schwingenden Enden des Schwingungskörpers und wird als λ - oder als $\lambda/2$ -Schwinger bezeichnet. Abbildung 1-26 zeigt die Schwingweiten eines einfach mit Resonanzfrequenz erregten Stabes mit konstantem Querschnitt mit den Maximalwerten A_{Zug} und A_{Druck} , sowie die 0-Phase im Mittelpunkt. (vgl. Gross 1985, S. 12)

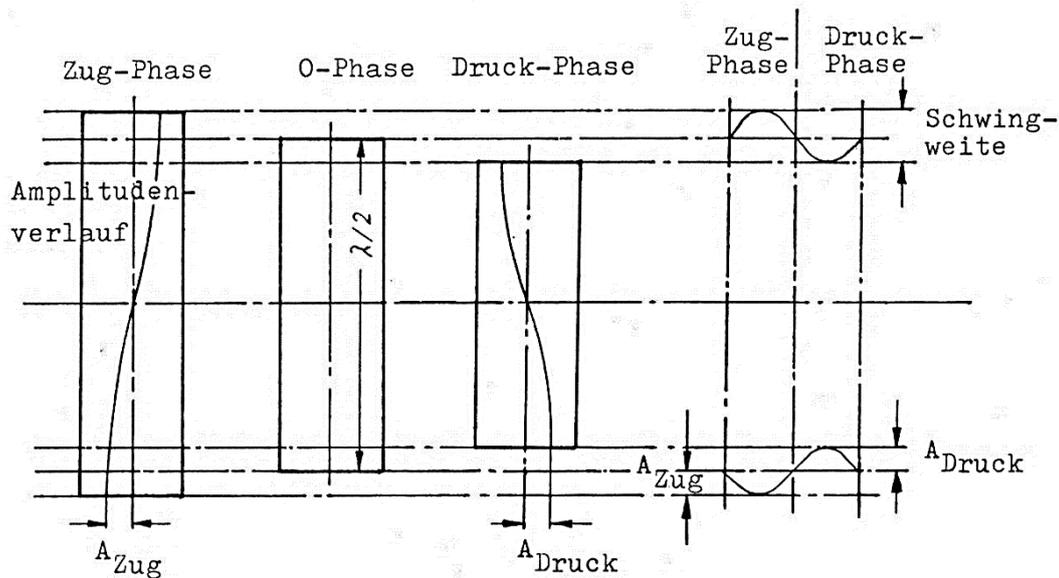


Abbildung 1-26: Schwingverhalten eines $\lambda/2$ -Schwingers (Gross 1985, S. 13)

In der Regel führt die Schwingungsamplitude eine sinusförmige Bewegung aus, die eine Funktion der Zeit t und des Ortes x darstellt. Sie setzt sich aus der Auslenkung a , einer Konstanten b , der Schallgeschwindigkeit c des Materials, dem Maximalausschlag A , sowie der Kreisfrequenz ω zusammen und lautet wie folgt:

$$a = b + A \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad \text{(vgl. Gross 1985, S. 13)}$$

Weitere physikalische Größen für die Berechnung eines $\lambda/2$ -Schwingers stellen die Resonanzfrequenz f , die Wellenlänge λ , die Schallgeschwindigkeit c_L und c_T (Schallgeschwindigkeit longitudinal und transversal) und die Resonanzlänge l dar. (vgl. Gross 1985, S. 14)

Sonotroden

Sonotroden sind Ultraschallwerkzeuge, die durch das Einleiten von hochfrequenten mechanischen Schwingungen in Resonanz versetzt werden. (Weber 2011)



Abbildung 1-27: Ultraschallsonotroden (Weber 2011)

Die Ausführungen sind vielfältig. Es existieren Exemplare mit unterschiedlichen Frequenzspektren, Längen, Formen, Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen, welche an die verschiedenen Anwendungen angepasst sind, was in Abbildung 1- 27 deutlich wird. (Weber 2011)

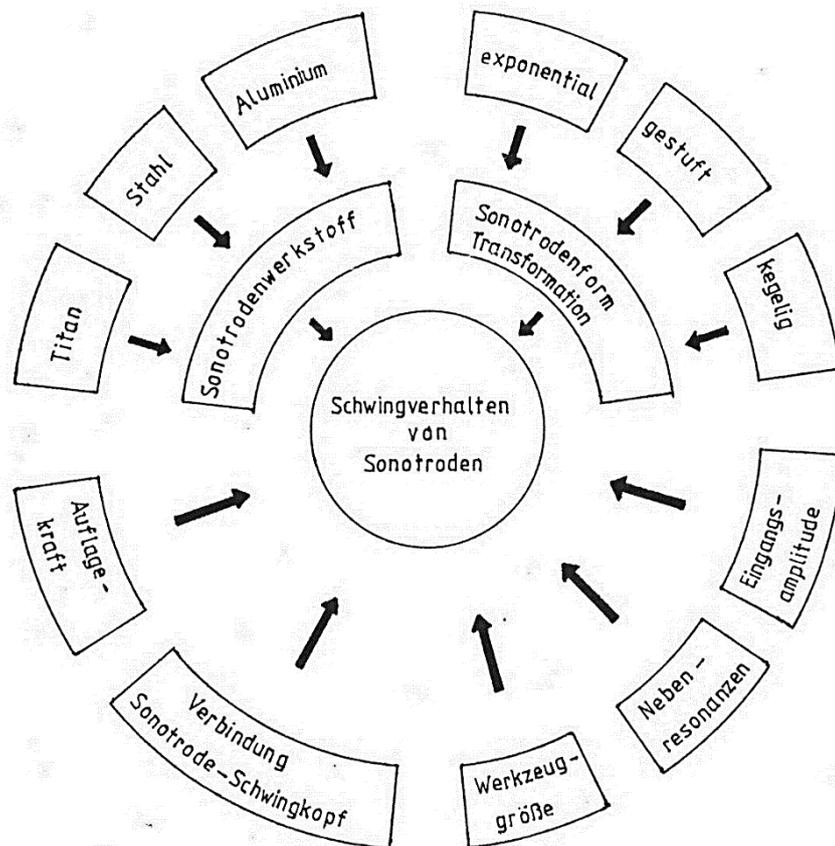


Abbildung 1-28: Einflussgrößen Sonotrodenschwingungsverhalten (Gross 1985, S. 33)

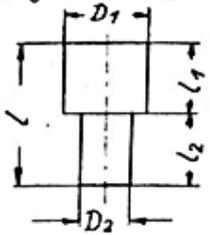
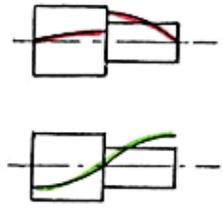
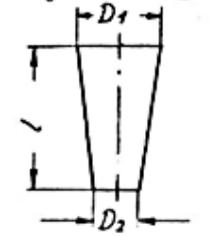
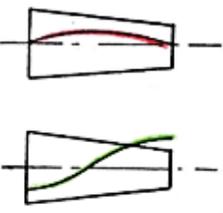
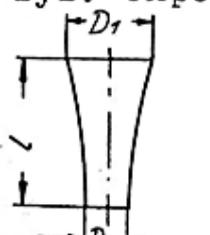
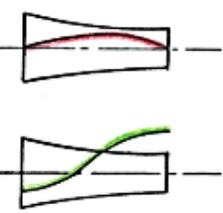
Das Schwingungsverhalten der Sonotrode ist von verschiedenen Parametern abhängig, die in unterschiedlicher Form und Stärke Einfluss nehmen. Die größten Einflussfaktoren neben dem Sonotrodenwerkstoff und der Sonotrodenform bzw. Transformation sind in Abbildung 1 28 aufgezeigt. (Gross 1985, S. 33)

Für Hersteller von Sonotroden sind hochfeste Titanlegierungen am besten geeignet, da sie über ausgezeichnete akustische Eigenschaften, sowie über sehr hohe Zug-Druck-Wechselfestigkeit verfügen. Ebenfalls sehr gute akustische Eigenschaften weisen Aluminiumlegierungen auf, diese kommen aufgrund der geringen Belastbarkeit jedoch nur bei wenigen Anwendungsfällen zum Einsatz. Weitere Sonotrodenwerkstoffe sind verschiedene Stähle, die jedoch schlechtere akustische Eigenschaften aufweisen. (vgl. Gross 1985, S. 19)

Die Sonotroden und damit verbunden die Ultraschalltechnik werden mittlerweile in diversen Bereichen der Industrie erfolgreich eingesetzt. Die Einsatzgebiete reichen vom Reinigen von Bauteilen, über das Kunststoffschweißen, das Trenn- und Metallschweißen und Sieben bis hin zur Sonochemie. Unter Sonochemie versteht man den Einfluss des Ultraschalls auf Molekülebene. Anwendung findet diese bei der Synthese von Polymeren. (vgl. Steck 2009)

Jedes Einsatzgebiet erfordert eine entsprechend angepasste Sonotrodenform. Die einfachsten und am meisten verbreiteten Formen sind in Abbildung 1 29 aufgeführt. In dieser Darstellung finden sich auch deren Berechnungen mit ihren spezifischen Resonanzlängen, der Transformation, auf die hier nicht genauer eingegangen werden soll, und deren Spannungs- und Amplitudenverläufe.

Bei Betrachtung der Spannungs- und Amplitudenverläufe fällt auf, dass sprunghafte Durchmesseränderungen, wie bei der zylindrisch abgestuften Sonotrodenform, zu großen Spannungsspitzen an den Übergängen führen, wohingegen der Amplitudenverlauf nur von der Länge der Sonotrode abhängig ist. Jede dieser einzelnen Formen lässt sich beispielsweise durch Kerben weiter differenzieren und den Bedürfnissen des Bearbeitungsvorgangs anpassen. (vgl. Gross 1985, S. 20)

Sonotrodenform	Resonanzlänge l (mm)	Transformation T	Spannungsverlauf Amplitudenverlauf
zyl. abgest. 	$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2} \cdot f$	$T = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$ Sonderfall bei $l_1 = l_2$	
zyl. Kegel 	Lösung durch Iterationsverfahren	$T = \frac{D_1}{D_2} \cdot \cos\left(\frac{\omega \cdot l}{c}\right) + \frac{c}{l \cdot \omega} \cdot \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega \cdot l}{c}\right)$	
zyl. expo. 	$l = \frac{c}{2f} \cdot a$ $a = \sqrt{1 + \left(\frac{\ln T}{\pi}\right)^2}$	$T = \frac{D_1}{D_2}$	

- c = Schallgeschwindigkeit
- f = Resonanzlänge
- ω = Kreisfrequenz
- λ = Wellenlänge
- T = Periodendauer

Abbildung 1-29: Sonotrodenformen und ihre Berechnung (vgl. Gross 1985, S. 20)

1.2.5 Ultraschallsonotrodensysteme

Ultraschallsonotrodensysteme bestehen aus einem Konverter, meist piezoelektrischer Art, in dem aus elektrischen Spannungen mechanische Schwingungen erzeugt werden. (vgl. Steck 2009). Diese Schwingungen werden anschließend zum Teil durch sogenannte Booster bzw. Piezos an die Anwendung angepasst und an die Sonotrode weitergeleitet, welche daraufhin zwischen der oberen und unteren Schwingbreite, der Schwingungsamplitude, zu schwingen beginnt und gegebenenfalls am Bauteil oder der Flüssigkeit Veränderungen vornimmt (siehe Abbildung 1 30). (vgl. Steck 2009; Hannig u.a. 2012) Bevorzugt kommen Sonotrodensysteme zum Einsatz, deren Werkzeug longitudinal durch hochfrequente und gerichtete Vibrationen in Schwingung versetzt werden können. (vgl. Hannig u.a. 2012)

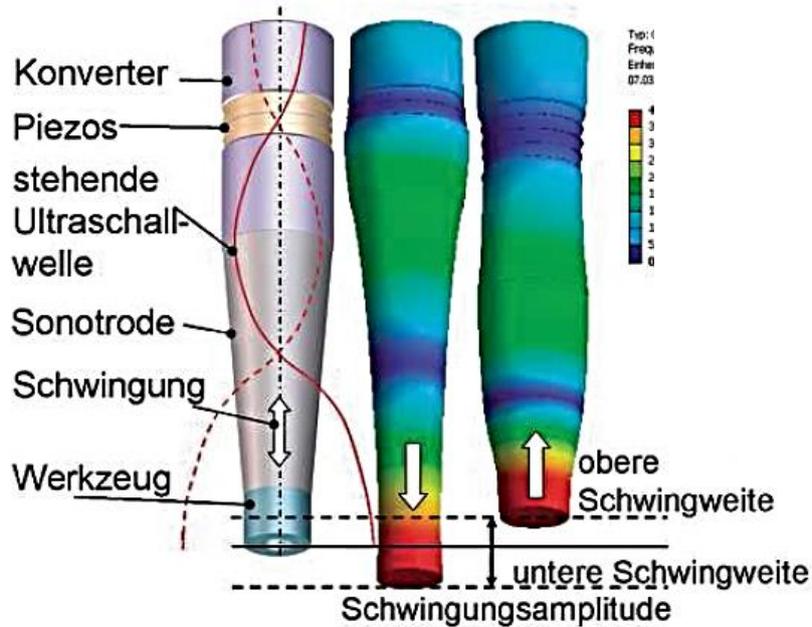


Abbildung 1-30: Aufbau eines Ultraschallsystems mit Longitudinalmodus (Hannig u.a. 2012)

Die primäre Eigenschaft der Sonotrode ist, dass diese an der kompletten Form dieselbe Schwingungsamplitude besitzt. Die auftretenden Kräfte können bei schlechter Formgebung an manchen Stellen so groß werden, dass es zu einer Zerstörung der Sonotrode durch Eigenschwingung kommen kann. Dies stellt die größte Herausforderung bei der Konstruktion dar. Es wird versucht durch Schlitze, Rillen oder gezieltes Abfräsen von Sonotrodenanteilen die Eigenschwingungen zu vermeiden. Früher setzte diese Abstimmung große Erfahrung, viel Zeit und viele Versuche voraus. Heutzutage ermöglichen CAD-Systeme und FEM-Analysen eine gezieltere, schnellere und kostengünstigere Konstruktion. Durch Simulation der Schwingungen kann auf bereits konstruierten Sonotroden zurückgegriffen oder diese einfach angepasst werden (siehe Abbildung 1 31). (vgl. Steck 2009)

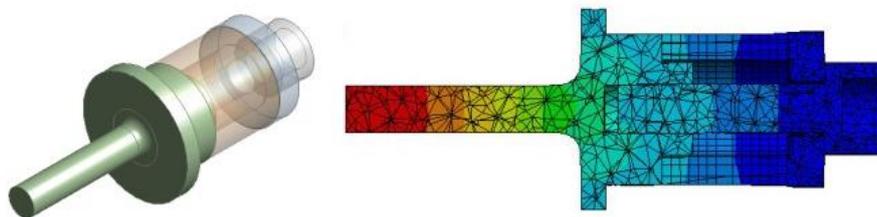


Abbildung 1-31: FEM-Analyse eines Ultraschallkonverters (Littmann, 2014)

Auch wenn Sonotroden bereits in vielen Bereichen zum Einsatz kommen, so stellt das in diesem Projekt durchgeführte Entgraten von Bauteilen eine komplett neue Aufgabe und Herausforderung dar.

2. Entwicklung einer ersten automatisierten Ultraschall-Entgratanlage

Die Motivation für das vorliegende Entwicklungsprojekt liegt darin begründet, mit einer elektrischen Leistung von ca. **100 Watt mittels Ultraschall-Kavitation** ein vergleichbares Entgrat-Ergebnis zu erzielen, wie bei einer **Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung** mit einer Pumpe, deren **Anschlussleistung 100 - 180 Kilowatt** beträgt.

Um diesen Ansatz auch in einem automatisierten Prozess im Industriebetrieb nachweisen zu können, wurden seit April 2016 von der Weber Ultrasonics AG und den Kooperationspartnern viele einzelne Entwicklungsschritte verfolgt, die im Folgenden beschrieben sind.

Die Ziele für das gesamte Entwicklungsprojekt sind es, den Entgratungsprozess mit Ultraschall zu automatisieren und das notwendige Equipment wie Sonotroden und Generatoren zu entwickeln sowie die Prozessparameter zu bestimmen.

Dazu gehören auch die Aussagen, für welche Materialien und welche industriellen Bauteile das Ultraschall-Entgraten automatisiert und wirtschaftlich angewendet werden kann.

Deshalb wird eine erste Ultraschall-Entgrat-Station aufgebaut, die industrielle Teile automatisch entgraten kann. Das Thema Standfestigkeit der eingesetzten Werkzeuge, Energieverbrauch und Servicebedingungen werden im Entwicklungsprojekt ebenso bearbeitet.

Wie in Abbildung 2 1 und Abbildung 2 2 zu erkennen, entstehen kritische Gratformen, d. h. lange Gratfahnen mit einem hohen Risiko für die Freisetzung von funktionskritischen Partikeln dort, wo ein Werkzeug bzw. eine Werkzeugschneide bei der Bearbeitung aus dem Werkstück austritt, wohingegen auf der Eintrittsseite nur ein sehr kleiner und fest anhaftender Eintrittsgrat entsteht.



Abbildung 2-1: Bohreintrittsseite (Thilow 2012, S. 33)



Abbildung 2-2: Bohraustrittsseite (Thilow 2012, S. 33)

Aus diesem Grund wurden die Machbarkeitsuntersuchungen an zwei charakteristischen Zerspanungsszenarien erprobt:

- **Bohraustrittsgrate** im inneren von Bauteilen, insbesondere an Bohrungsverschneidungen. Diese Aufgabenstellung hat eine hohe Relevanz z.B. für alle fluidischen Systeme im Automobil und Hydraulik wie etwa Bremse (ABS-Block), Kraftstoff (Hochdruckpumpe oder Common-Rail), Öl (Schaltschieber in Automatikgetrieben oder Ölkanäle im Motorblock und Zylinderkopf), Abgas (Turbolader) usw.
- **Fräseraustrittsgrate** an der Außenseite von Bauteilen, wie sie bei der Bearbeitung sämtlicher Aluminiumteile (Sandguss, Strangguss, etc.) auftreten etwa an Planflächen für Flansche- und Dichtungen von Motorblöcken, Zylinderköpfen, Schalt- und Achsgetrieben, Elektromotoren und vielen weiteren Teilen. Bei diesen Versuchen kamen auch Probenkörper aus PVC und Stahl zum Einsatz.

2.1 Versuchsanordnung

2.1.1 Probekörper

Die für die Versuchsreihe verwendeten, quaderförmigen Probekörper (Länge & Breite: 15 mm, Höhe: 30 mm) wurden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Kaiserslautern durch Prof. Dr.-Ing. Torsten Hielscher aus einem großen Gussteil gefertigt, welches wiederum bei der Gießerei Technologie Aalen GmbH gegossen wurden. Die Größe des Probekörpers wurde durch die Abmaße des CT-Scan-Tisches (Skyscan 1172 der Firma Bruker) begrenzt und festgelegt. Sowohl die Legierungszusammensetzung AlSi7MgCu0,5 als auch der Aufbau der Probekörper, vor allem deren Längs- und Querbohrungen, sind in Anlehnung an das Zylinderkopfgehäuse des Automobilherstellers BMW entstanden und sollen der praxisnahen Erprobung dienen. Die Probekörper besitzen jeweils eine Zentralbohrung mit dem Durchmesser 10 mm der Länge nach und sechs weitere kleinere Bohrungen mit dem Durchmesser 5 mm, die die gewünschten Grate im Inneren der großen Zentralbohrung erzeugen.

Das Ziel war die Erzeugung vergleichbarer definierter Grate, um aussagekräftige Resultate zu erzielen. Die technische Zeichnung und das reale Erscheinungsbild der Probekörper sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Die verwendeten Werkzeuge sowie Bearbeitungsparameter zur Erzeugung der Bohrungen und damit der Grate sind der Projektarbeit „Definierte Grate“ von Marco Elig (Hochschule Kaiserslautern/Prof. Dr.-Ing. Torsten Hielscher) zu entnehmen.

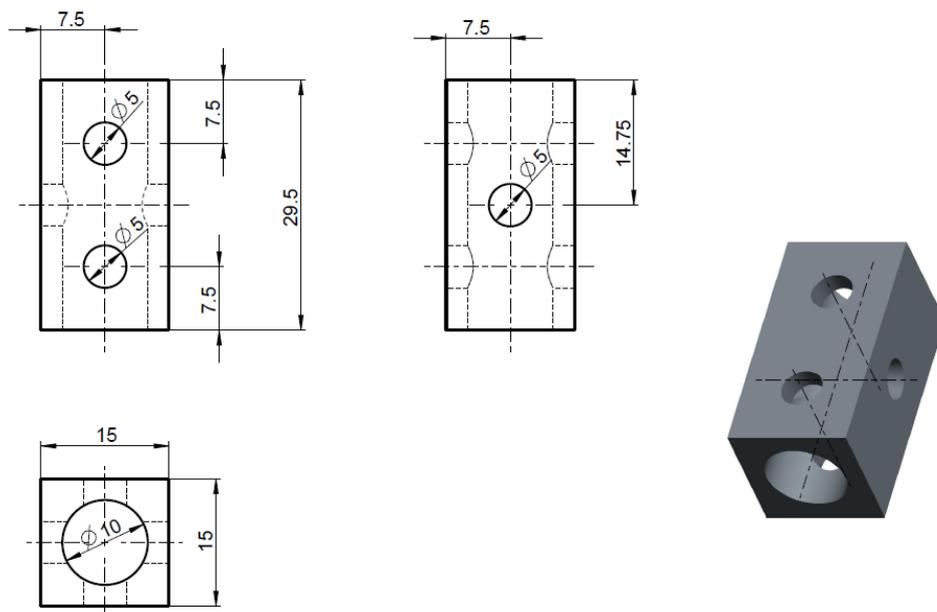


Abbildung 2-3: Technische Zeichnung der Probekörper Versuchsreihe I



Abbildung 2-4: Probekörper Versuchsreihe I

Um einen reibungslosen und reproduzierbaren Versuchsablauf zu gewährleisten, d.h. die Probekörper während des Entgratvorgangs fest verspannen und genau positionieren zu

können, wurde ein Probekörperhalter in Catia konstruiert. Die Einzelkomponenten wurden in der mechanischen Werkstatt des Fraunhofer IPA angefertigt. Die kranartige Konstruktion diente dabei dem Versenken in einem mit Wasser gefüllten Aquarienkasten. Der schwarze Arretierbolzen (1) wurde für die Befestigung der Schiene (2) und dem damit verbundenen Einspannen des Probekörpers zwischen den beiden Doppelauslegern (3) genutzt. Zur besseren Veranschaulichung zeigen Abbildung 2 5 und Abbildung 2 6 die gefertigte und zusammengebaute Probekörperhalterung.

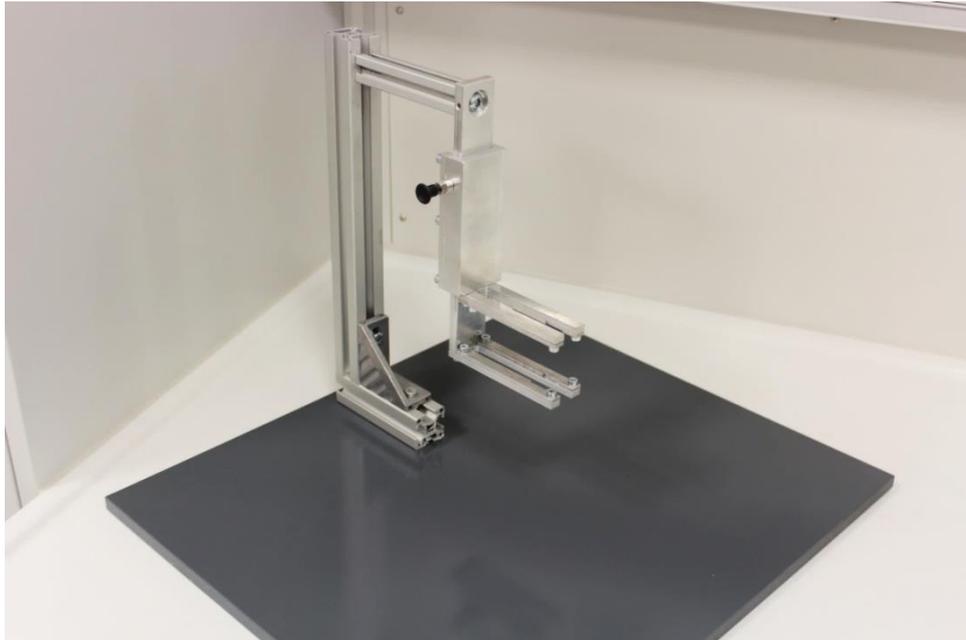


Abbildung 2-5: Probekörperhalterung (1)



Abbildung 2-6: Probekörperhalterung (2)

2.1.2 Sonotroden

In der Versuchsreihe I wurden zwei verschiedene Sonotrodenformen eingesetzt. Die Sonotroden unterscheiden sich dabei in der Ausführung der Sonotroden spitze, die bei der Sonotrode (S26D7) flach ausgeführt ist und bei der anderen Sonotrode eine kegelartige Form (Sonderform), ähnlich eines Bohrsenkers, aufweist (siehe Abbildung 2 7, Abbildung 2 8, Abbildung 2 9). Beide Sonotroden bestehen aus Titan und haben eine Länge von 95 mm. Die Abstrahlfläche der S26D7-Sonotrode besitzt einen Durchmesser von 7 mm und damit eine Abstrahlfläche von 39 mm². Die keilartige Form (30° Winkel) wurde ausgewählt, um die Abstrahlungsleistung seitlich zu erhöhen und ähnlich wie mit einem Bohrsenker, in eine Bohrung eintauchen zu können, um diese besser zu entgraten. Dieser keilartige Kopf wurde speziell für das Fraunhofer IPA angefertigt und stellt eine Sonderform auf Basis der S26D7 dar.



Abbildung 2-7: Sonotroden



Abbildung 2-8: Sonotrodenkopf (1) (S26D7)



Abbildung 2-8: Sonotrodenkopf (2) (Sonderform)

2.1.3 Ablaufplan:

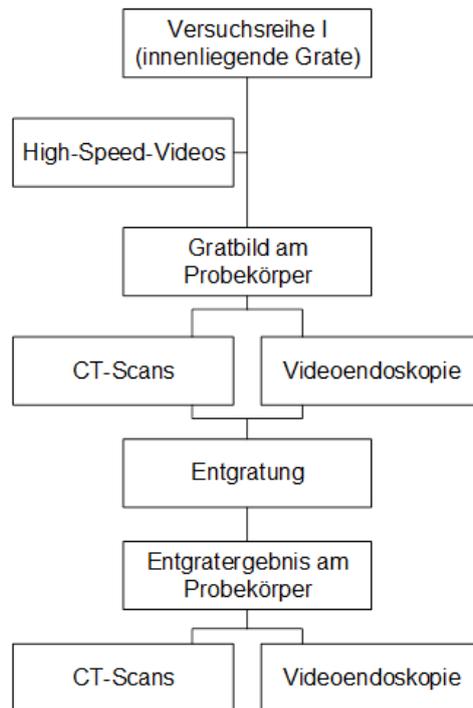


Abbildung 2-9: Ablaufplan Versuchsreihe I

2.1.4 High-Speed-Kamera-Aufnahmen

Um die Entstehung der Kavitationssäulen und die Entfernung der Grate und die damit einhergehenden Effekte genauer betrachten zu können, wurden High-Speed-Kamera-Aufnahmen (HSKA) mit 1000 Bildern pro Sekunde erstellt (siehe Abbildung 2 11). Die technischen Daten bzw. Spezifikationen der High-Speed-Kamera sind Tabelle 2 1 zu entnehmen.

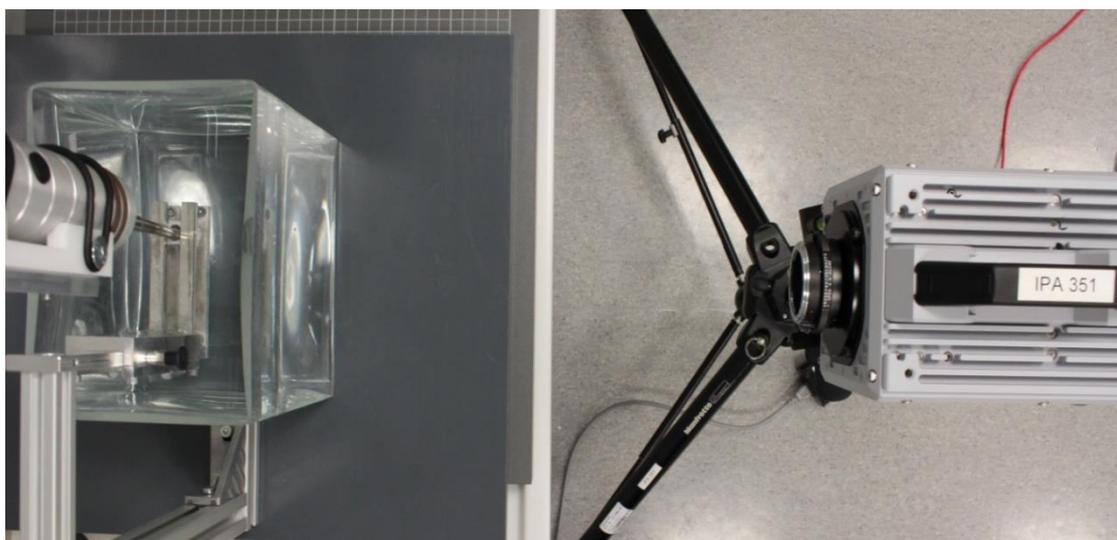


Abbildung 2-10: High-Speed-Kamera Aufbau

Tabelle 2-1: Fastcam SA4 Photron

Fastcam SA4 Photron:	
Max. Frame Rate	500.000 fps
Maximum Performance	1,024 x 1,024 pixels
Sensor	12-bit ADC (Bayer system color, single sensor) with 20 µm pixel
Memory	8GB (standard: 5,457 frames @ maximum resolution)
Video Outputs	Live and playback video thorough Dual HD-SDI or single RS-170 (NTSC /PAL) outputs
Operating Temperature	0 - 40 degrees C (32 - 104 degree F)
Dimensions	160mm (6.30") H×153mm (6.02") W×242.5mm (9.55") D
Interface	Gigabit Ethernet interface
Weight	5.9 kg
Power Requirements	100V-240V AC ~ 1.5A, 50-60Hz DC operation 20-36 V DC, 100VA

Zuerst wurden die Sonotroden (S26D7 und Sonderform) unter Schwingung alleine betrachtet und anschließend miteinander verglichen. Zusätzlich erfolgte die Betrachtung bei der Entgratung der Probekörper.

2.1.5 Durch Bohren entstehende Grate

Der Ausgangszustand der Probekörper wurde jeweils mit zwei verschiedenen Methoden festgehalten. Zum einen wurde ein CT-Scan der Probekörper mit dem SkyScan (Skyscan 1172) der Firma Bruker durchgeführt. Dieser erstellt in einem sehr zeitintensiven Verfahren durch Drehung der Probekörper um jeweils 0,1 Grad – d.h. durch insgesamt 3600 Einzelbilder und eine anschließende Rekonstruktion – ein dreidimensionales Gesamtbild der Körper. Die technischen Daten und Spezifikationen des Skyscan 1172 sind Tabelle 2 2 zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Skyscan 1172

Skyscan 1172:	
X-ray source	20-100kV,10W,<5 µm spot size or 20-80kV, 8W, <8 µm spot size
X-ray detector	11Mp, 12-bit cooled CCD fiber-optically coupled to scintillator
Maximum object size	27mm in diameter (single scan) or 50mm in diameter (offset scan)
Detail detectability	0.5 µm at highest resolution
Reconstruction	hierarchical (InstaRecon®) and GPU-accelerated FDK reconstruction as standard
Optional stages	micro-positioning, cooling, heating, compression/tension
Radiation safety	<1 µSv/h at any point on the instrument surface

Die Abbildung 2 12 und Abbildung 2 13 zeigen einen beispielhaften Ausgangszustand eines Probekörpers.

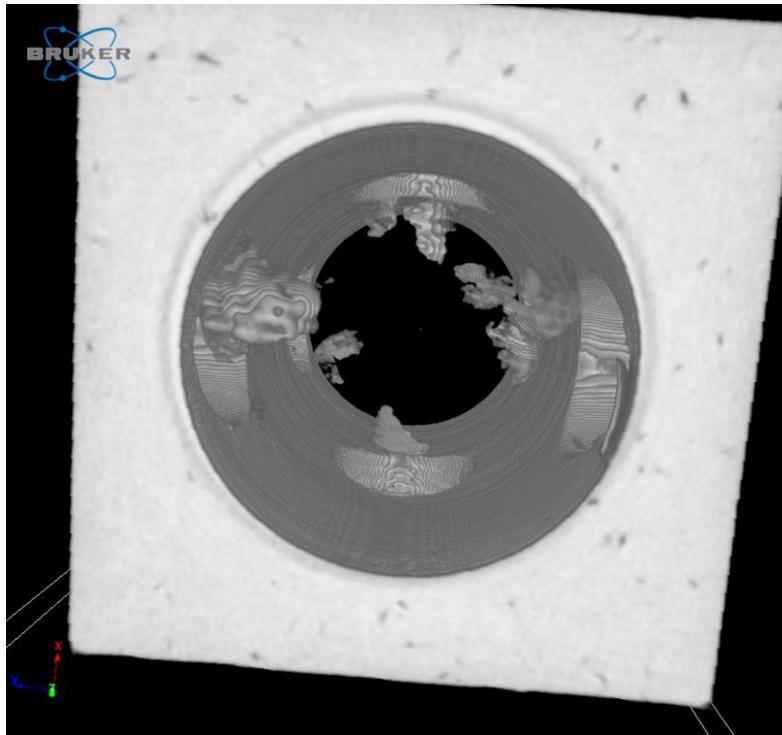


Abbildung 2-11: Ausgangszustand CT-Scan



Abbildung 2-12: Ausgangszustand Video-Endoskopie

2.1.6 Laborversuche zur Entgratung mit Ultraschall

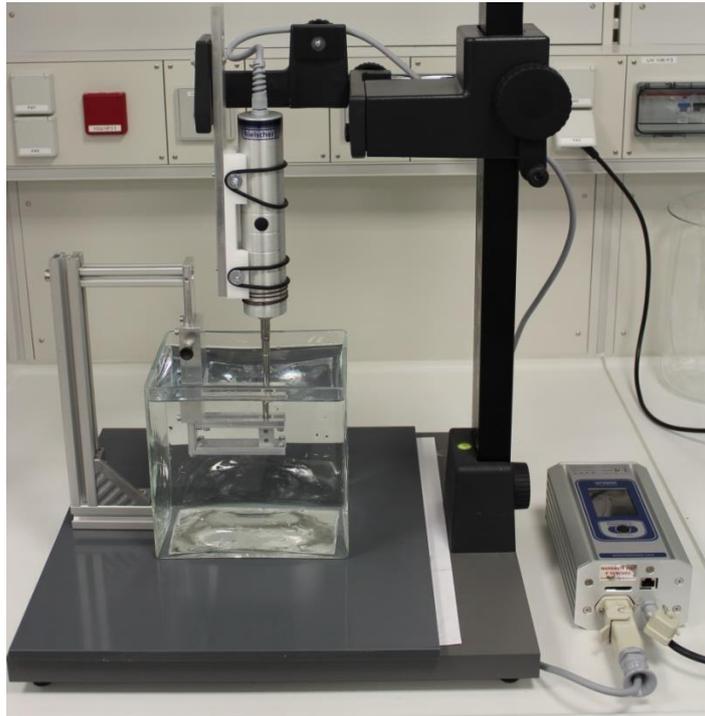


Abbildung 2-13: Laborversuchsstand

Die Entgratung wurde mittels des Ultraschallprozessors UP2000St durchgeführt (technische Daten bzw. Spezifikationen siehe Tabelle 2-3), der aus einem getrennten Generator und Schallwandler besteht. Der Schallwandler mit angeschraubter Sonotrode war an einem Stativ befestigt, welches höhenverstellbar ist. Zur Beaufschlagung der Grate der Zentralbohrung wurde die Sonotrode in die Zentralbohrung eingetaucht.

(siehe Abbildung 2-13).

Tabelle 2-3: UP200St

UP200St:	
Max. Leistung	200 Watt
Max. Frequenz	26 kHz
Aufbau	getrennter Generator (UP200St-G, IP51 Norm) und Schallwandler (UP200St-T, IP65 Norm)
Amplitudeneinstellung	von 20 % bis 100 % (digitale Steuerung)
Pulsmoduseinstellung	von 10 % bis 100 % (digitale Steuerung)
Sonotrodenflansch	Titanhorn Ø 10mm
Amplitude am Horn	70 µm
Temperatur	Anzeige (°C, °F (-50°C bis 200°C)) und Überwachung
Stromversorgung	24 VDC / 9 A
Netzteil	100 – 200 VAC

Der Generator besitzt eine maximale Leistung von 200 Watt und eine maximale Frequenz von 26 kHz. Jedoch ist die real anliegende Leistung von der Sonotrodenform bzw. Sonotrodenart und der Eintauchtiefe abhängig. Bei den Versuchen waren die Sonotroden ca. zur Hälfte in das Wasserbad eingetaucht, d.h. man kann von einer Leistung von 100 Watt mit einer maximalen Amplitude von 240 µm ausgehen (siehe Abbildung 2 15). Da die Sonderform aus einer S26d7-Sonotrode gedreht wurde, kann hier von einer ähnlichen Leistung und Amplitude ausgegangen werden.

Typ	Amplitude [µm] 100%	Leistung [W] in Wasser 15°C bei 50% / 100% eingestellter Amplitude			Leistung P/A [W/cm²] 100%
		Eintauchtiefe 5mm	halbe Sono- trode	ganze Sono- trode	
S26d2 Durchmesser 2mm	240	9 / 32	15 / 57	26 / 95	1019
S26d7 Durchmesser 7mm	190	32 / 90	39 / 100	50 / 130	234
S26d14 Durchmesser 14mm	90	70 / 160	95 / 170	100 / 200	104
S26d40 Durchmesser 40mm	9	30 / 70	55 / 120	Grenzleistung	5
S26d26G Durchmesser 26mm	20	40 / 100	45 / 110	50 / 130	24
Verneblersonotrode S26d18S	Verneblungsleistung: Wasser 114ml/min, 20°C				

Abbildung 2-14: Leistung im Wasser

Zuerst wurden die Probekörper in der Probekörperhalterung fixiert und anschließend in einen Aquarienkasten, welcher mit Wasser gefüllt war, eingetaucht. Zum Entgraten der Probekörper wurden drei verschiedene Positionen, jeweils oberhalb der kleinen Querbohrungen, angefahren und jeweils 5 s mit der maximalen Leistung sowie der maximalen Frequenz beaufschlagt, d.h. es ergibt sich eine komplette Bearbeitungszeit von 15 s. Die drei Bearbeitungsebenen sind in Abbildung 2 15 und Abbildung 2 16 detailliert dargestellt.

Der Endzustand der Probekörper wurde wie der Anfangszustand sowohl mit einem CT-Scan als auch mit Video-Endoskopie dokumentiert.

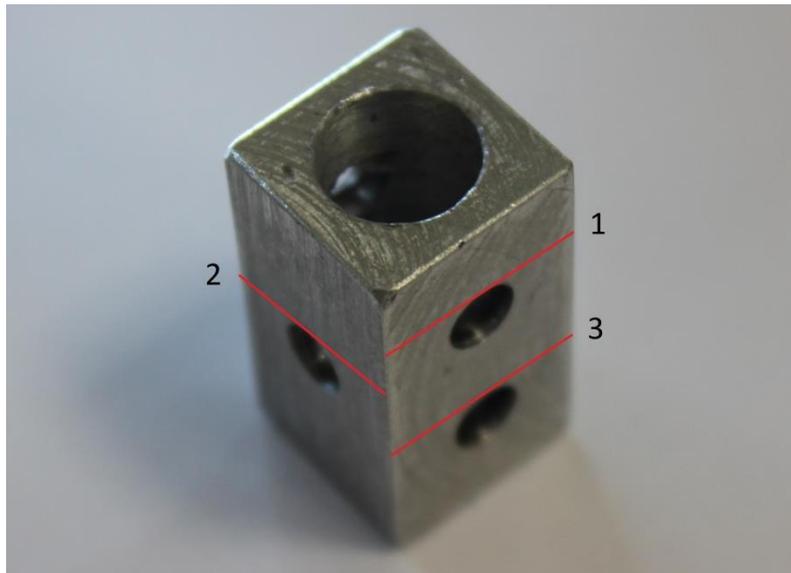


Abbildung 2-15: Bearbeitungsebenen (1)

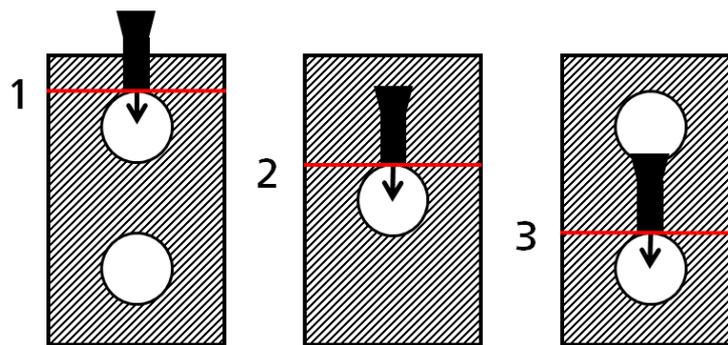


Abbildung 2-16: Bearbeitungsebenen (2)

2.1.7 Durch einen Fräser erzeugte Grate

Die für die zweite Versuchsreihe verwendeten Probekörper (Länge: 95 mm, Breite: 28 mm, Höhe: 12 mm) wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Hochschule Kaiserslautern durch Prof. Dr.-Ing. Torsten Hielscher aus einem Gussteil gefertigt. Es kam erneut die Legierungszusammensetzung AlSi7MgCu0,5 (Zylinderkopfwerkstoff BMW) zum Einsatz, aber auch ein Kunststoff (PVC) und ein Stahl (St37). Die Probekörper besitzen über die komplette Längsseite auf zwei Seiten jeweils offenliegende Grate und sind in Abbildung 2 18 und Abbildung 2 19 abgebildet (Links: AlSi7MgCu0,5 , Mitte: PVC, Rechts: St37). Die betrachteten Längskanten sind in Abbildung 2 18 rot eingefärbt.

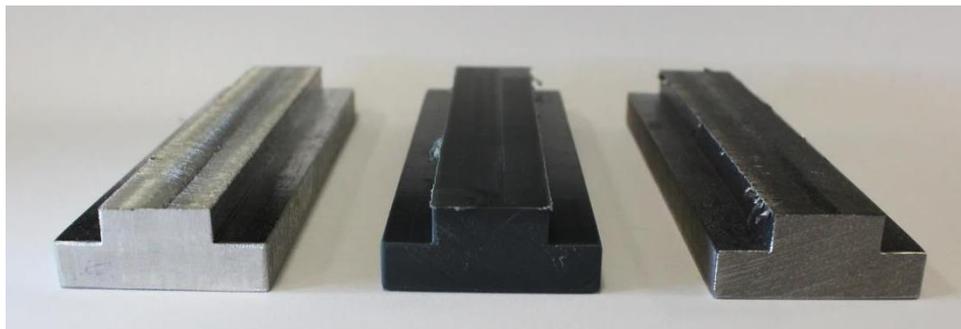
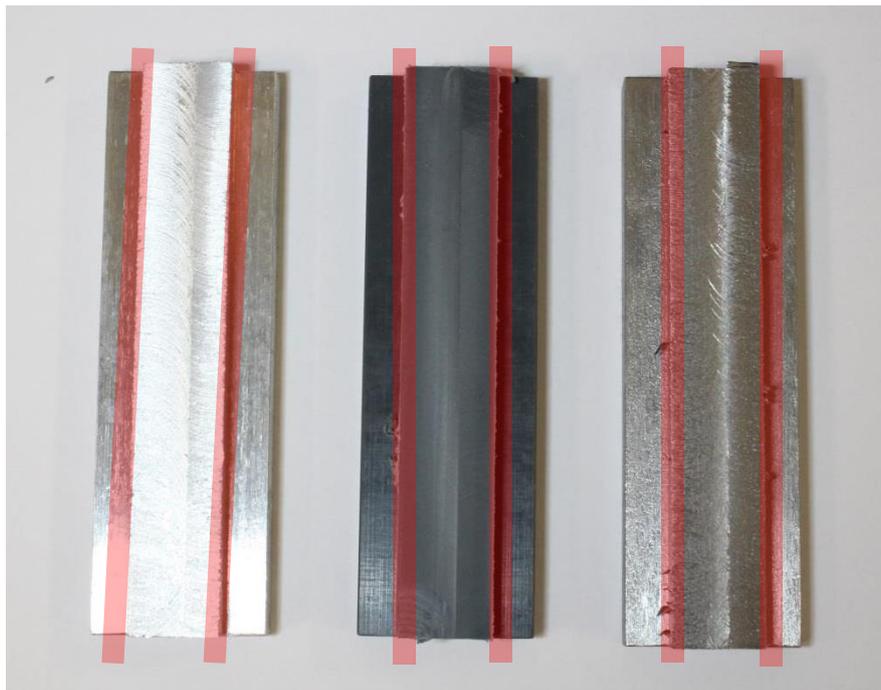


Abbildung 2-17: Probekörper Versuchsreihe Fräser

In der Versuchsreihe mit den Fäsergraten wurde nur noch die Sonotrode S26D7 eingesetzt, die bereits innerhalb der Bohrer-Versuchsreihe zum Einsatz kam, (siehe Abb. 2-8).

Um die Entfernung der Grate und die damit einhergehenden Effekte genauer betrachten zu können, wurden wie in der ersten Versuchsreihe, High-Speed-Kamera-Aufnahmen (HSKA) erstellt. Der Aufbau entspricht dabei dem aus der ersten Versuchsreihe mit dem Unterschied, dass andere Probekörper in einer anderen Einspannvorrichtung verwendet wurden. Um das Entfernen des Grates noch detaillierter betrachten zu können, wurde innerhalb der Versuchsreihe mit 2.000 Bildern pro Sekunde gearbeitet. Die technischen Daten bzw. Spezifikationen der High-Speed-Kamera sind Tabelle 2-1 zu entnehmen.

2.1.8 Gratbilder am Probekörper

Das Gratbild der Probekörper wurde mit der Spiegelreflex Kamera EOS 600D und dem Makroobjektiv Ultrasonic EFS 60 mm, jeweils von Canon, festgehalten. Die Abbildung 2 20 zeigt einen beispielhaften Ausgangszustand eines Probekörpers.

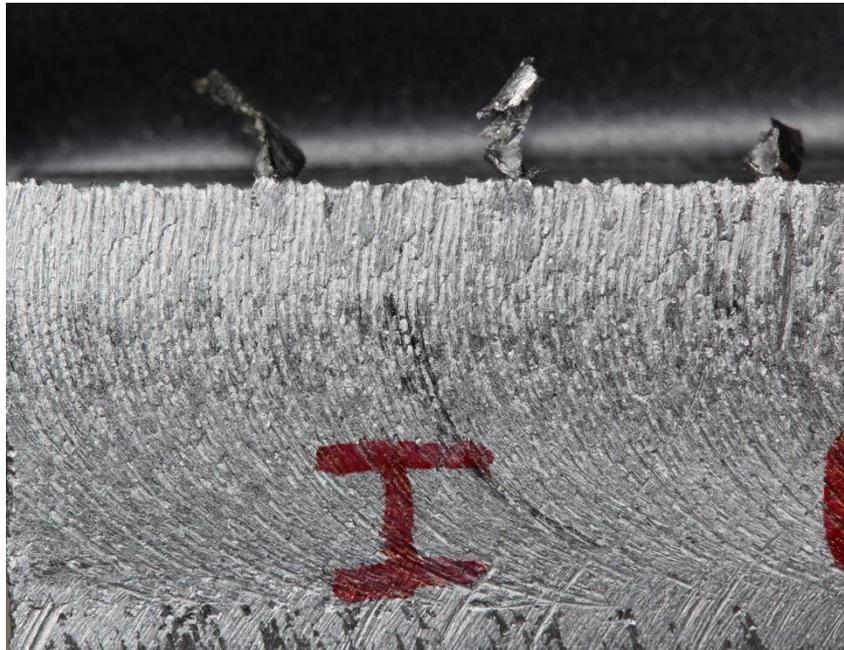


Abbildung 2-18: Ausgangszustand aufgenommen mit Canon EOS 600D/Ultrasonic EFS 60 mm

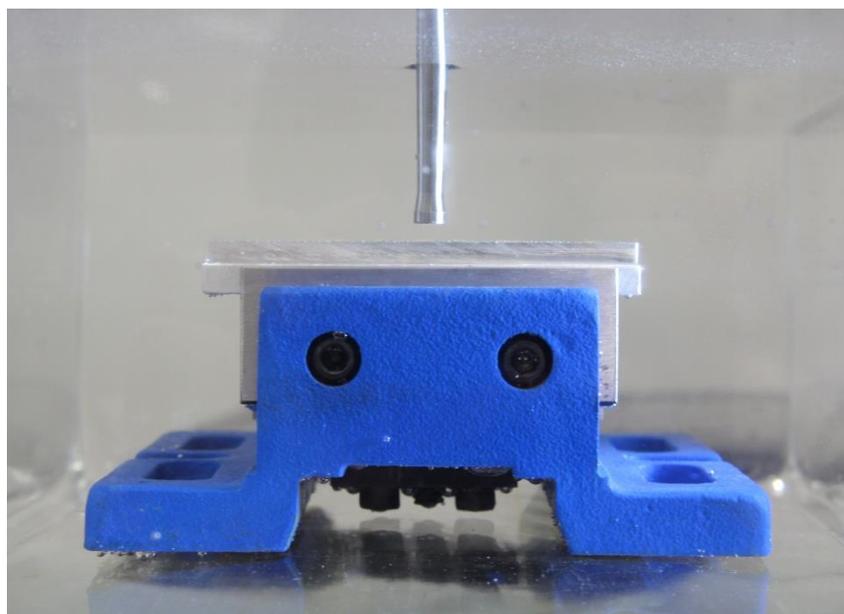


Abbildung 2-19: Laborversuchsstand während der Entgratung

Die Entgratung wurde – wie in Versuchsreihe I – mittels des Ultraschallprozessors UP2000St durchgeführt (technische Daten bzw. Spezifikationen siehe Tabelle 2 4). Zur Beaufschlagung der Grate an der Bauteilkante wurde die Sonotrode so positioniert, dass die Kante durch die Kreismitte der Sonotrode verlief (schematische Darstellung siehe Abbildung 2 22).

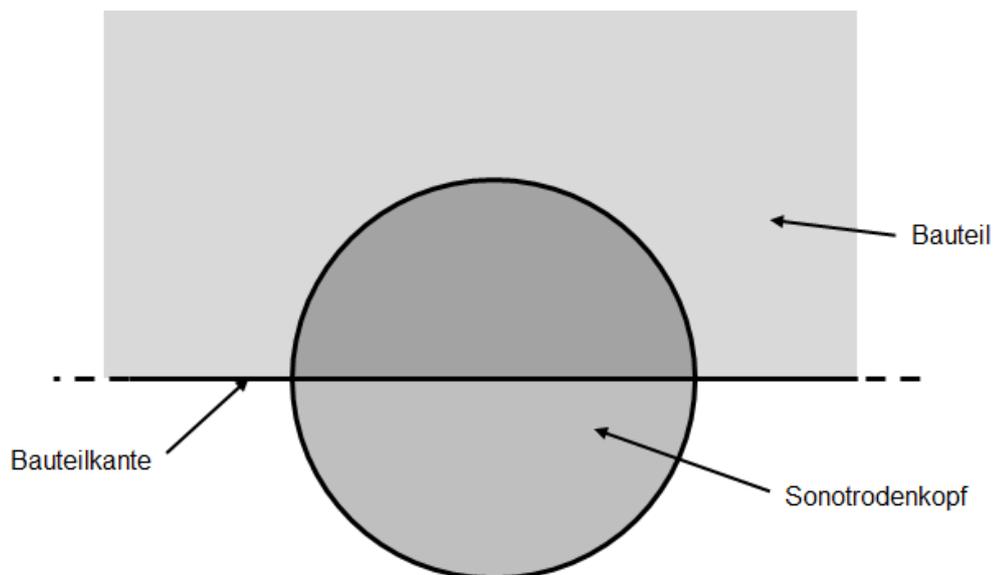


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung Entgratung

Bei den Versuchen war die Sonotrode ebenfalls bis zur Hälfte in das Wasserbad eingetaucht, d.h. es kann von einer Leistung von 100 Watt mit einer maximalen Amplitude von 240 μm ausgegangen werden (siehe Abbildung 2-15).

Die Probekörper wurden zuerst in einen Maschinenschraubstock eingespannt und anschließend in einen Aquarienkasten, welcher mit Wasser gefüllt war, eingetaucht. In Teil I (Bohrgrate) der Versuchsreihe wurden einzelne Bereiche punktuell in unterschiedlichen Abständen zwischen Bauteil und Sonotrode (zwischen 0,5 mm – 2,5 mm) mit Ultraschall beaufschlagt. In Teil II (Fräsergrate) wurde eines der beiden Bauteilkantenenden angefahren und dieses mit der Ultraschall-Sonotrode beaufschlagt. Bei laufendem Ultraschallgenerator wurde nun mithilfe des Statives die Sonotrode gleichmäßig bei konstantem Abstand über die Bauteilkante bis hin zum anderen Ende verschoben, um die komplette Bauteilkante zu entgraten. In Teil I und II der Versuchsreihe stand die Sonotrode im rechten Winkel (90°) zur oberen Bauteiloberfläche (siehe Abbildung 2-23). In Teil III der zweiten Versuchsreihe wurde die Entgratung wie in Teil II, jedoch im 45° Winkel zur Materialoberfläche durchgeführt. Abbildung 2-24 zeigt diese Anordnung.

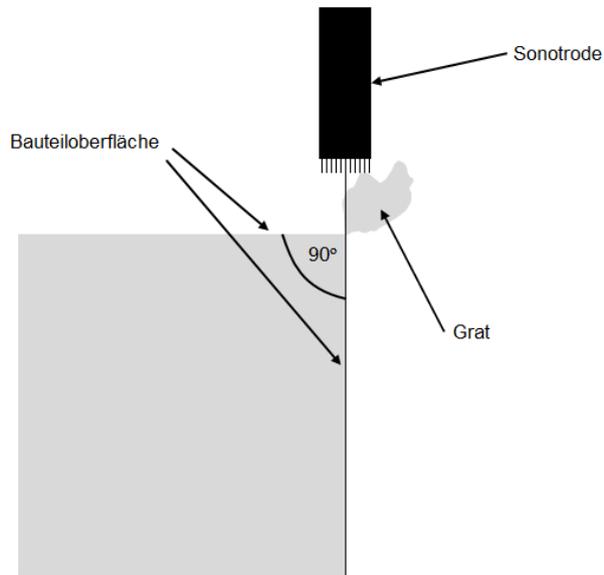


Abbildung 2-21: Entgratung im 90°-Winkel – Teil I + II (schematische Darstellung)

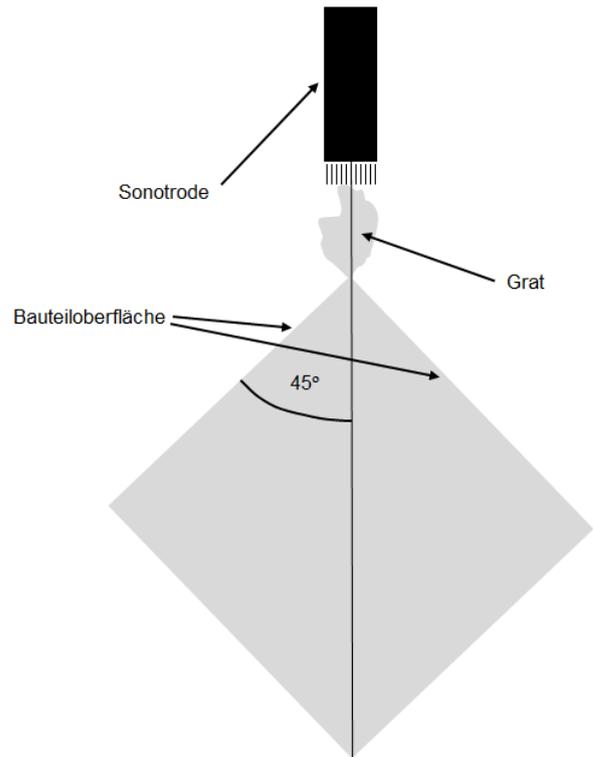


Abbildung 2-22: Entgratung im 45°-Winkel – Teil III (schematische Darstellung)

Das Entgratergebnis der Probekörper wurde zusätzlich wie der Ausgangszustand mit der Spiegelreflex Kamera EOS 600D (Canon) und dem Makroobjektiv Ultrasonic EFS 60 mm (Canon) festgehalten.

2.1.9 High-Speed-Kamera-Aufnahmen

Mit einer High-Speed-Kamera wurden kurze Videosequenzen mit 1000 Bildern pro Sekunde gedreht, welche im ersten Schritt das Verhalten der Sonotroden im Wasserbad und anschließend das Entgraten der Probekörper aufzeigen.

Abbildung 2 25 und Abbildung 2 26 zeigen, wie sich die Kavitationssäule bei der seriennormiert hergestellten S26D7-Sonotrode einstellt.



Abbildung 2-23: HSKA S26D7 (1)



Abbildung 2-24: HSKA S26D7 (2)

Abbildung 2 27 und Abbildung 2 28 zeigen das Verhalten der Sonotrode mit Sonderform, welche speziell für das Fraunhofer IPA angefertigt wurde.



Abbildung 2-25: HSKA Sonderform (1)



Abbildung 2-26: HSKA Sonderform (2)

Abbildung 2 29 und Abbildung 2 30 zeigen das Entfernen der Grate durch die Sonotrode S26D7. Die rot eingekreisten, reflektierenden Flächen sind Grate bzw. Späne, welche aus der Zentralbohrung des Probekörpers entfernt wurden.



Abbildung 2-27: Versuchsreihe I: HSKA S26D7 + Probekörper (1)



Abbildung 2-28: Versuchsreihe I: HSKA S26D7 + Probekörper (2)

Das Entgraten durch die Sonotrode mit Sonderform ist in Abbildung 2 31 und Abbildung 2 32 dargestellt. Die rot eingekreisten, reflektierenden Flächen sind ebenfalls Grate bzw. Späne, welche aus der Zentralbohrung des Probekörpers stammen und entfernt werden konnten.



Abbildung 2-29: Versuchsreihe I: HSKA Sonderform + Probekörper (1)

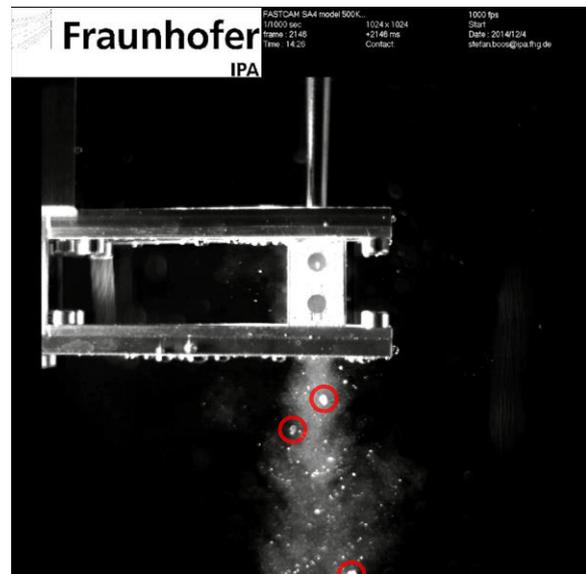
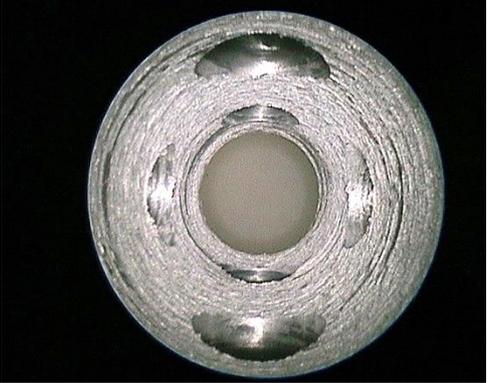
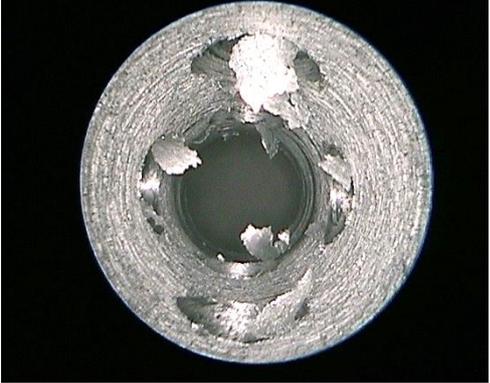
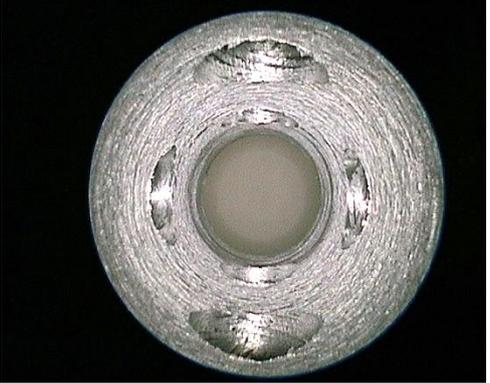


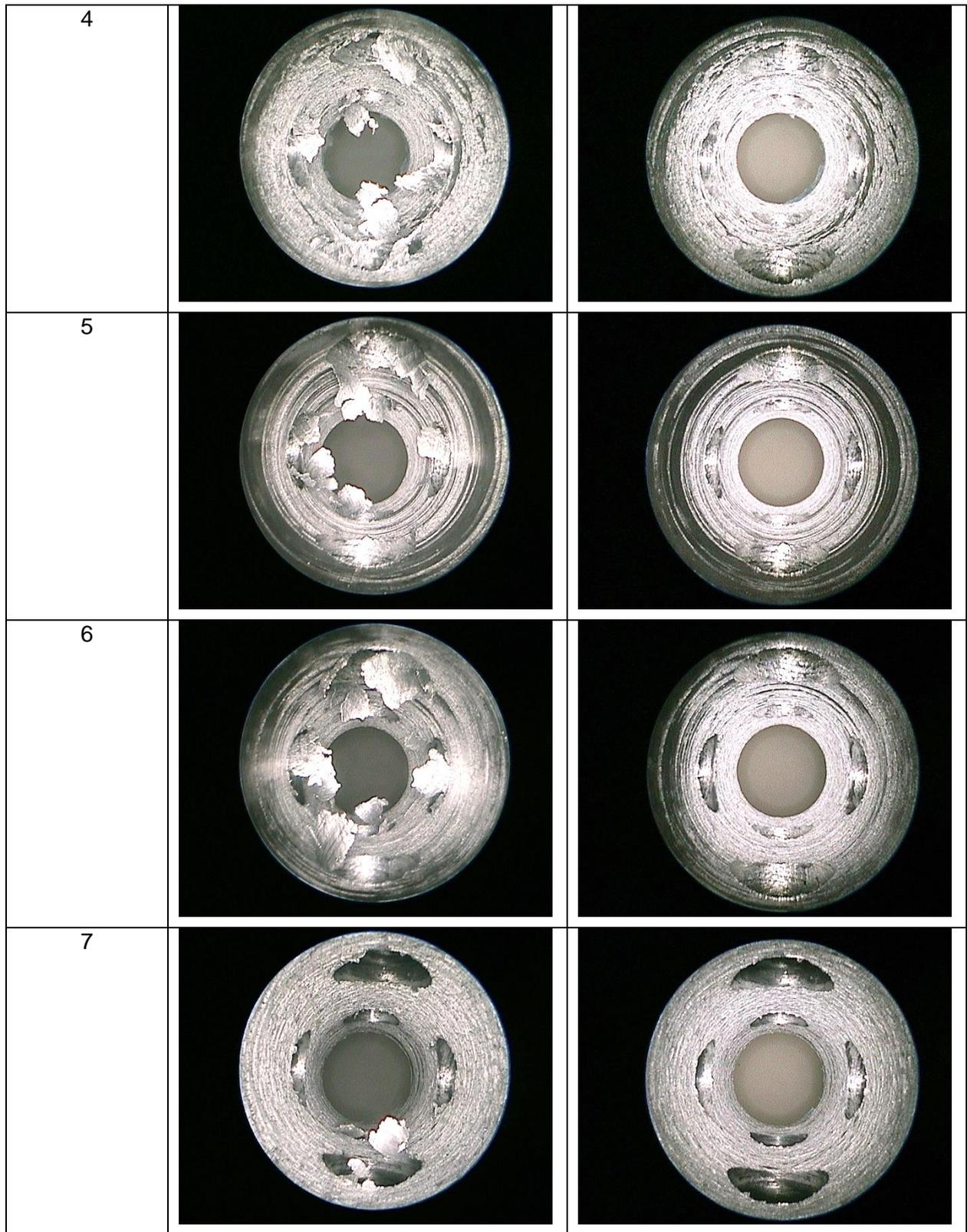
Abbildung 2-30: Versuchsreihe I: HSKA Sonderform + Probekörper (2)

2.1.10 Bewertung der Entgrat-Qualität mittels Video-Endoskopie

Die Video-Endoskopie zeigt eine Übersicht der zentralen Bohrung der Probekörper und lässt einen Ersteindruck zu, wie erfolgreich das Entgraten war und ob sich signifikante Unterschiede zwischen den Sonotrodenköpfen einstellen. Probennummer 1 – 10 wurden mit der flachen/ebenen Sonotrode (S26D7) und 11 – 20 mit der keilförmigen Sonotrode (Sonderform) entgratet.

Tabelle 2-4: Video-Endoskopie-Aufnahmen - Sonotrode: S26D7 (vorher/nachher)

Probekörper	Vorher	Nachher
Sonotrode S26D7		
1		
2		
3		



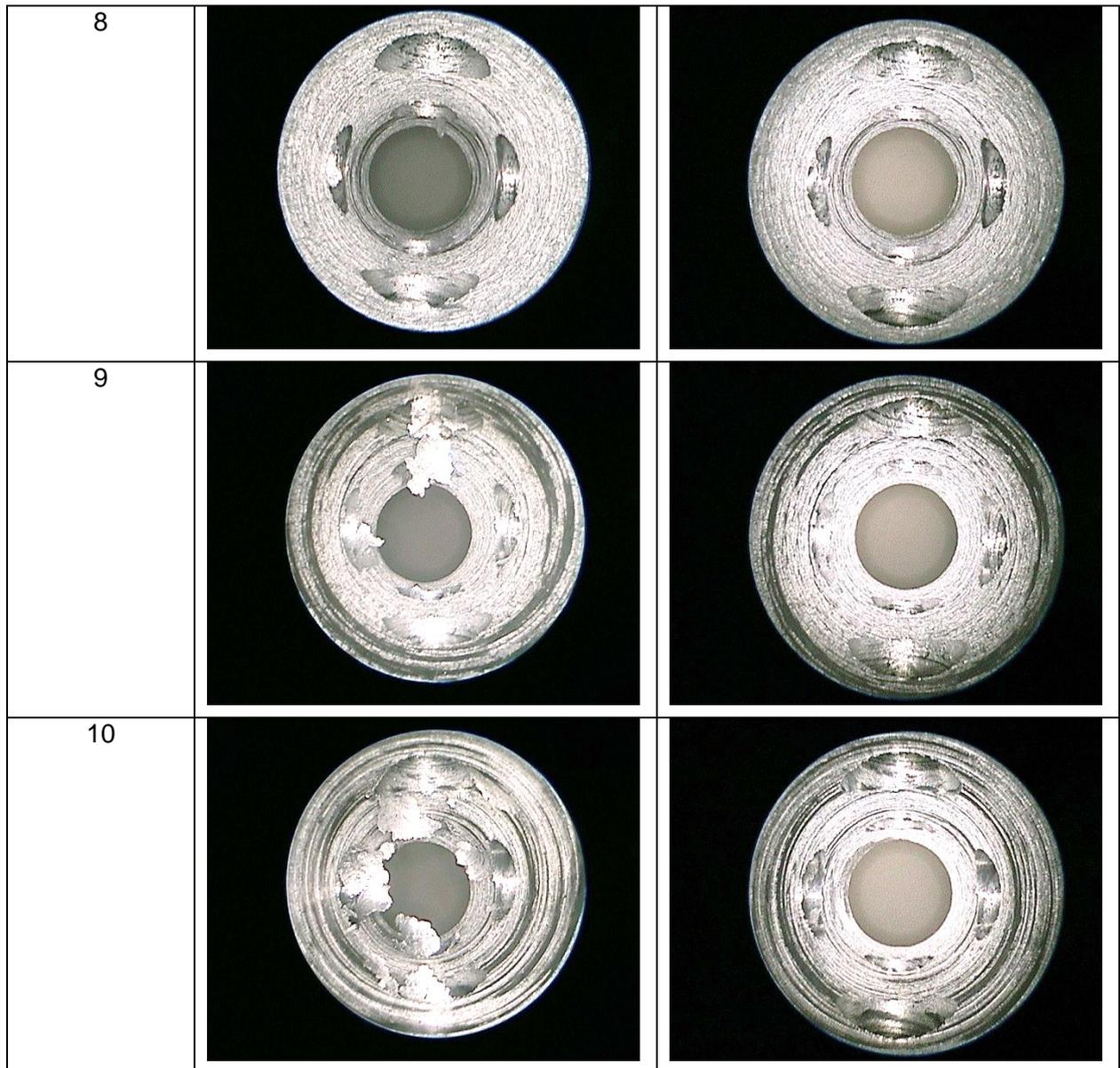
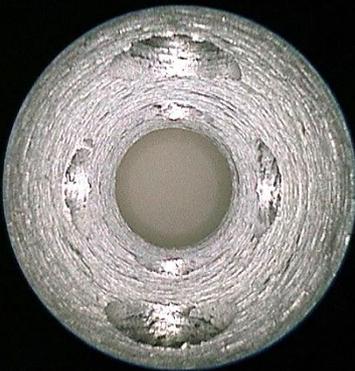
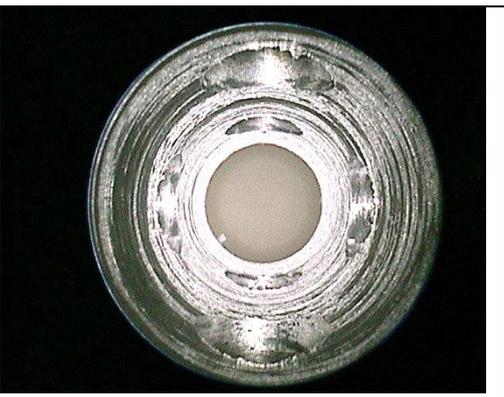
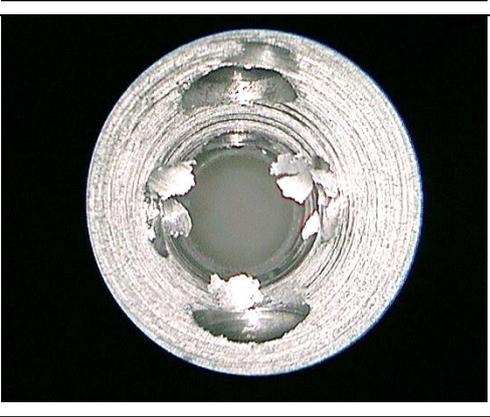
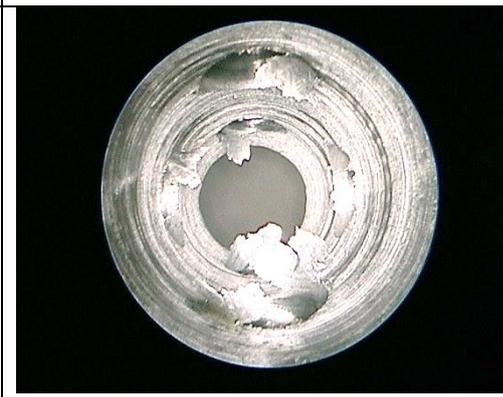
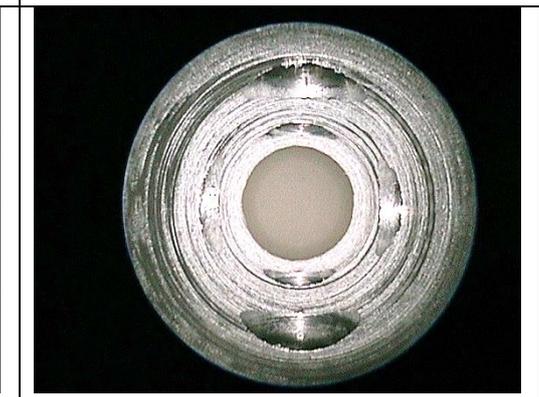
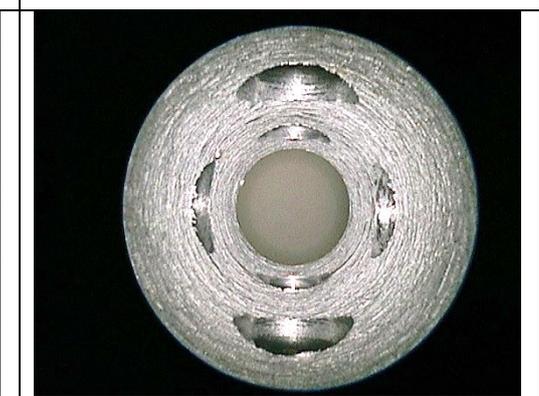
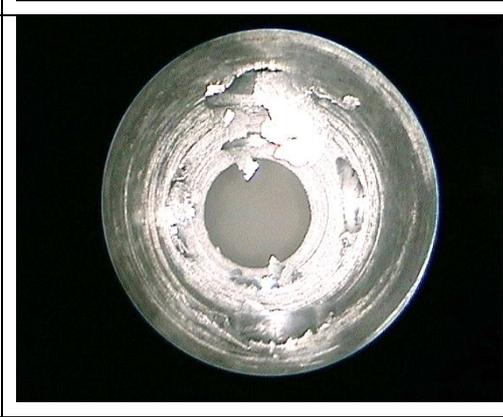
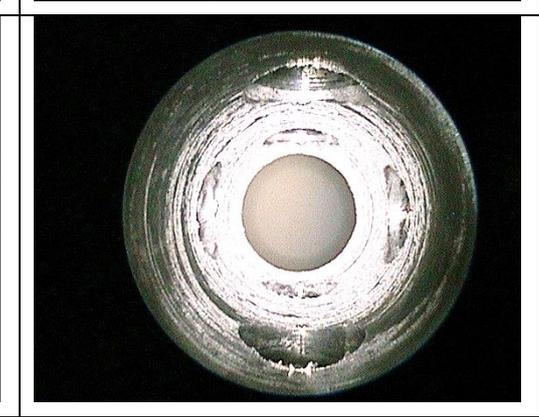
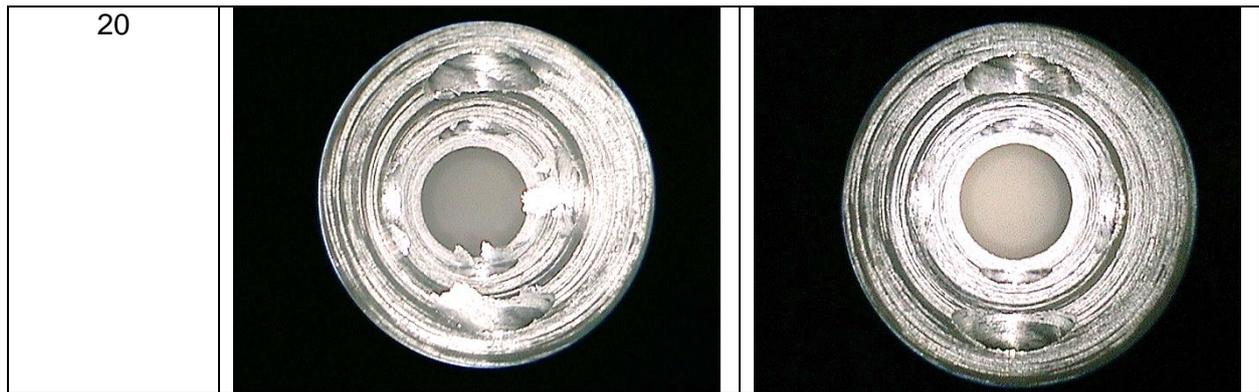


Tabelle 2-5: Video-Endoskopie-Aufnahmen - Sonotrode: Sonderform (vorher/nachher)

Probekörper	Vorher	Nachher
Sonotrode Sonderform		
11		

12		
13		
14		
15		

16		
17		
18		
19		



2.1.11 Bewertung mittels Computer-Tomographie (CT)

Die CT-Ergebnisse sind in zwei Teilbereiche untergliedert. Im ersten Teil werden die Messungen von 10 signifikanten Graten sowohl vor als auch nach der Entgratung ausgewertet. Anschließend werden Vorher-Nachher-Übersichtsbilder der zentralen Bohrung übereinandergelegt.

2.1.12 Gratvermessung

Für die beispielhafte Messung von 10 signifikanten Graten wurden solche gewählt, die im Urzustand eine möglichst große Gratfußbreite und Gratfußlänge, d.h. eine große Gratfußfläche, aber auch eine große Gratbreite aufweisen, da diese besonders stark am Probekörper haften und dementsprechend schwieriger zu entfernen sind. Die Grate 1 – 5 stellen Grate aus den Probekörpern dar, welche mit der ebenen/flachen Sonotrode (S26D7) bearbeitet wurden und die Grate 6 – 10 sind Grate, welche mit der keilförmigen Sonotrode (Sonderform) entgratet wurden.

Da die ausführliche Darstellung aller Messungen zu umfangreich wäre, wird nur ein Auszug dargestellt, beispielsweise die Messung der Grathöhe bei Grat#1 (siehe Abbildung 2-31 und Abbildung 2-32).

Die Vermessungen fanden unter Zuhilfenahme von Referenzgrößen, in diesem Fall der Zentral- und Querbohrungen, statt, da keine direkte Messung in die Software (CTvol) integriert ist.

Grat#1_Grathöhe (h_c)_Vorher:

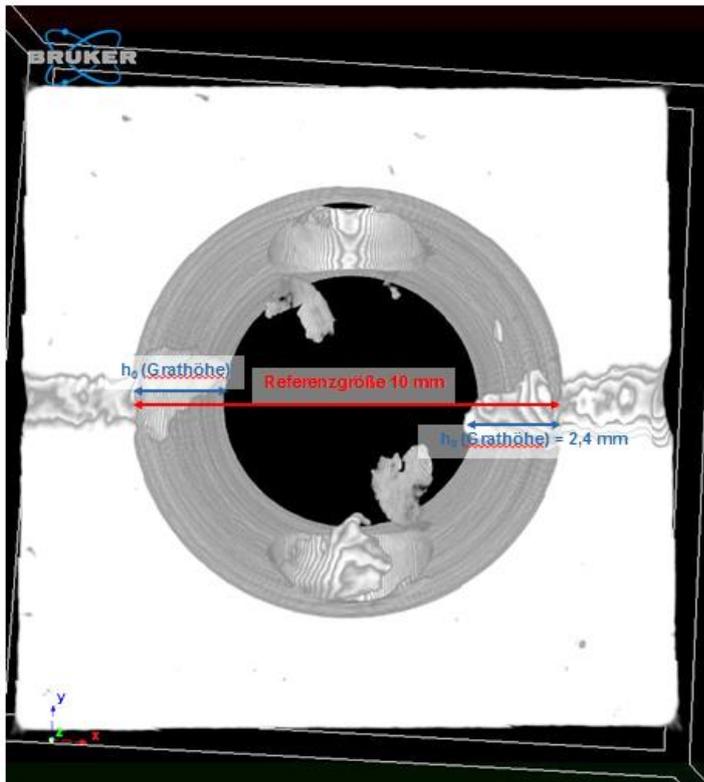


Abbildung 2-31: Messung Grat#1:
Gathöhe_Vorher

Grat#1_Grathöhe (h_c)_Nachher:

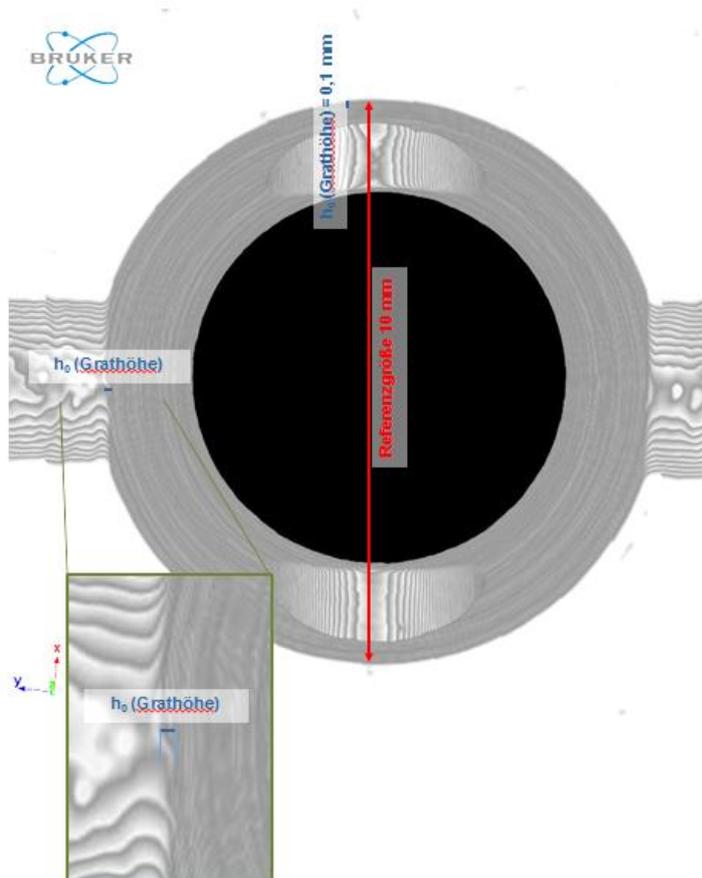


Abbildung 2-32: Messung Grat#1:
Grathöhe_Nachher

Betrachtet wurden jeweils die Grathöhe h_0 , die Gratdicke b_g , die Gratfußlänge b_{fl} und die Gratfußbreite b_{fb} . Die vereinfachte, schematische Darstellung dieser Größen ist Abbildung 2-35 zu entnehmen. Auf das Messen der weiteren Größen, wie dem Gratfußradius r_f vor dem Entgraten sowie der Kantenverrundung r_k und der Kantenfehlbreite b_k nach dem Entgraten, wie in Kapitel 1.1.1 beschrieben, musste aufgrund der fehlenden Detailgenauigkeit der Scans verzichtet werden. Diese fehlende Detailgenauigkeit ist durch die für den SkyScan relativ große Größe der Probekörper zu erklären, die dazu führt, dass Details im μm -Bereich nicht aufgenommen werden können.

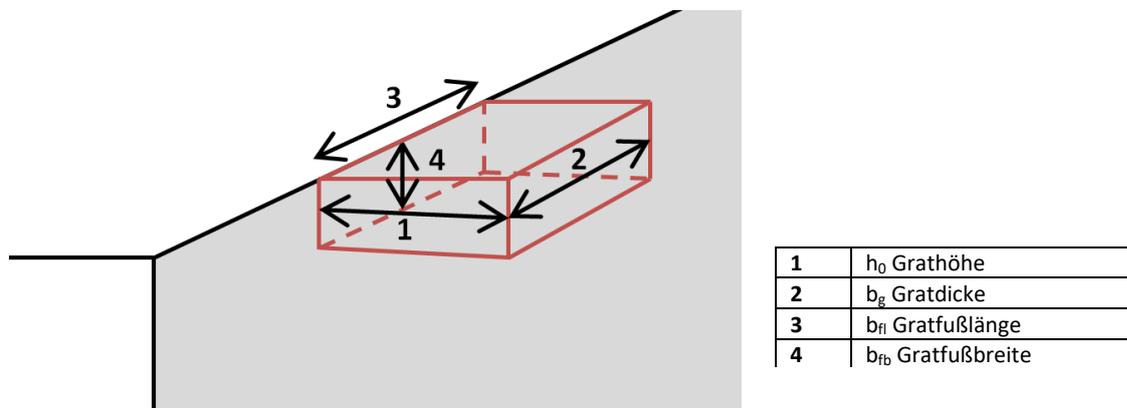


Abbildung 2-33: Gratgrößen (schematische Darstellung)

Tabelle 2-6: Messungen S26D7

Grat	Vorher (V)/ Nachher (N)	h_0 (Grathöhe)	b_g (Gratdicke)	b_{fl} (Gratfuß- länge)	b_{fb} (Gratfuß- breite)
1	V	2,4 mm	0,2 mm	0,6 mm	0,7 mm
	N	0,1 mm	0,1 mm	0,6 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-95,8 %	-50,0 %	0,0 %	-100,0 %
2	V	1,4 mm	0,3 mm	2,1 mm	0,2 mm
	N	0,3 mm	0,1 mm	0,3 mm	0,1 mm
Prozentuale Veränderung:		-78,6 %	-66,7 %	-85,7 %	-50,0 %
3	V	2,3 mm	0,2 mm	2,6 mm	0,1 mm
	N	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %
4	V	1,6 mm	1,5 mm	0,2 mm	0,2 mm
	N	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %
5	V	2,6 mm	0,2 mm	1,4 mm	0,2 mm
	N	0,1 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-96,2 %	-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %
Durschnitt: prozentuale Veränderung:		-94,1 %	-83,3 %	-77,1 %	-90,0 %

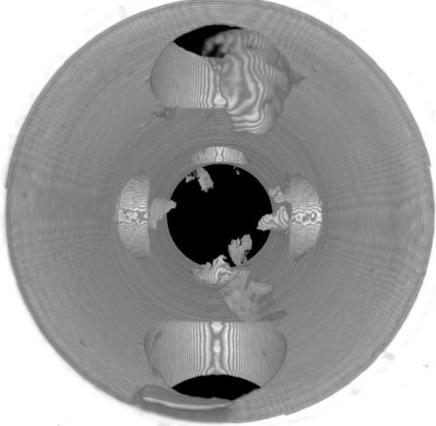
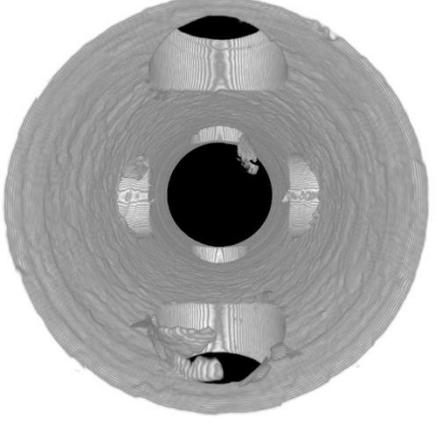
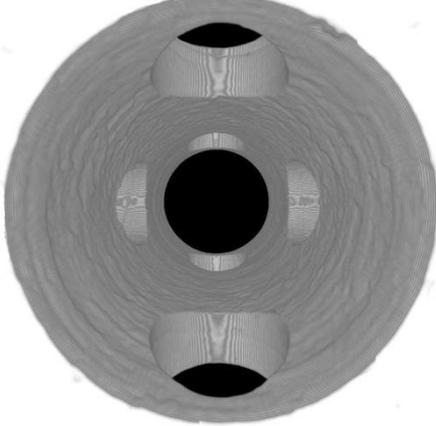
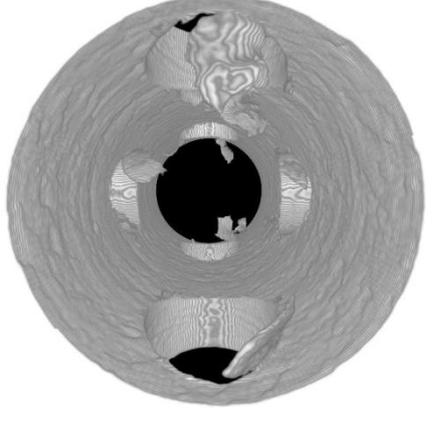
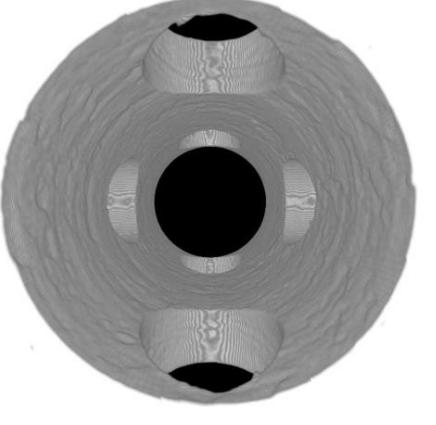
Tabelle 2-7: Messungen Sonderform

Grat	Vorher (V)/ Nachher (N)	h_0 (Grathöhe)	b_g (Gratdicke)	b_{fl} (Gratfuß- länge)	b_{fb} (Gratfuß- breite)
6	V	2,5 mm	0,2 mm	1,8 mm	0,3 mm
	N	0,5 mm	0,1 mm	1,7 mm	0,2 mm
Prozentuale Veränderung:		-80,0 %	-50,0 %	-5,6 %	-33,3 %
7	V	2,4 mm	0,2 mm	2,4 mm	0,3 mm
	N	0,4 mm	0,1 mm	1,5 mm	0,1 mm
Prozentuale Veränderung:		-83,3 %	-50,0 %	-37,5 %	-66,7 %
8	V	2,4 mm	0,1 mm	1,5 mm	0,1 mm
	N	0,1 mm	0,1 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-95,8 %	± 0 %	-100,0 %	-100,0 %
9	V	3,1 mm	0,2 mm	1,0 mm	0,2 mm
	N	0,1 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-96,8 %	-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %
10	V	2,3 mm	0,2 mm	1,2 mm	0,2 mm
	N	0,1 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Prozentuale Veränderung:		-95,7 %	-100,0 %	-100,0 %	-100,0 %
Durschnitt: prozentuale Veränderung:		-90,3 %	-60,0 %	-68,6 %	-80,0 %

2.1.13 CT-Scan der Zentralbohrung

Die CT-Scans zeigen eine Übersicht der zentralen Bohrung der Probekörper und lassen, wie die Ergebnisse der Video-Endoskopie, einen ersten Eindruck zu, wie erfolgreich das Entgraten war und ob sich signifikante Unterschiede zwischen den Sonotrodenköpfen einstellen. Aufgrund des großen Software- und Hardwareaufwandes wurden hier, wie bei den Gratvermessungen, nur die Probekörper 1–5, welche mit der flachen/ebenen Sonotrode (S26D7) entgratet wurden und die Probekörper 11–15, welche mit der keilförmigen Sonotrode (Sonderform) bearbeitet wurden, betrachtet.

Tabelle 2-8: CT-Scan-Aufnahmen - Sonotrode: S26D7 (vorher/nachher)

Probekörper	Vorher	Nachher
<p data-bbox="228 297 379 360">Sonotrode S26D7</p>		
<p data-bbox="296 398 312 421">1</p>		
<p data-bbox="296 844 312 866">2</p>		
<p data-bbox="296 1290 312 1312">3</p>		

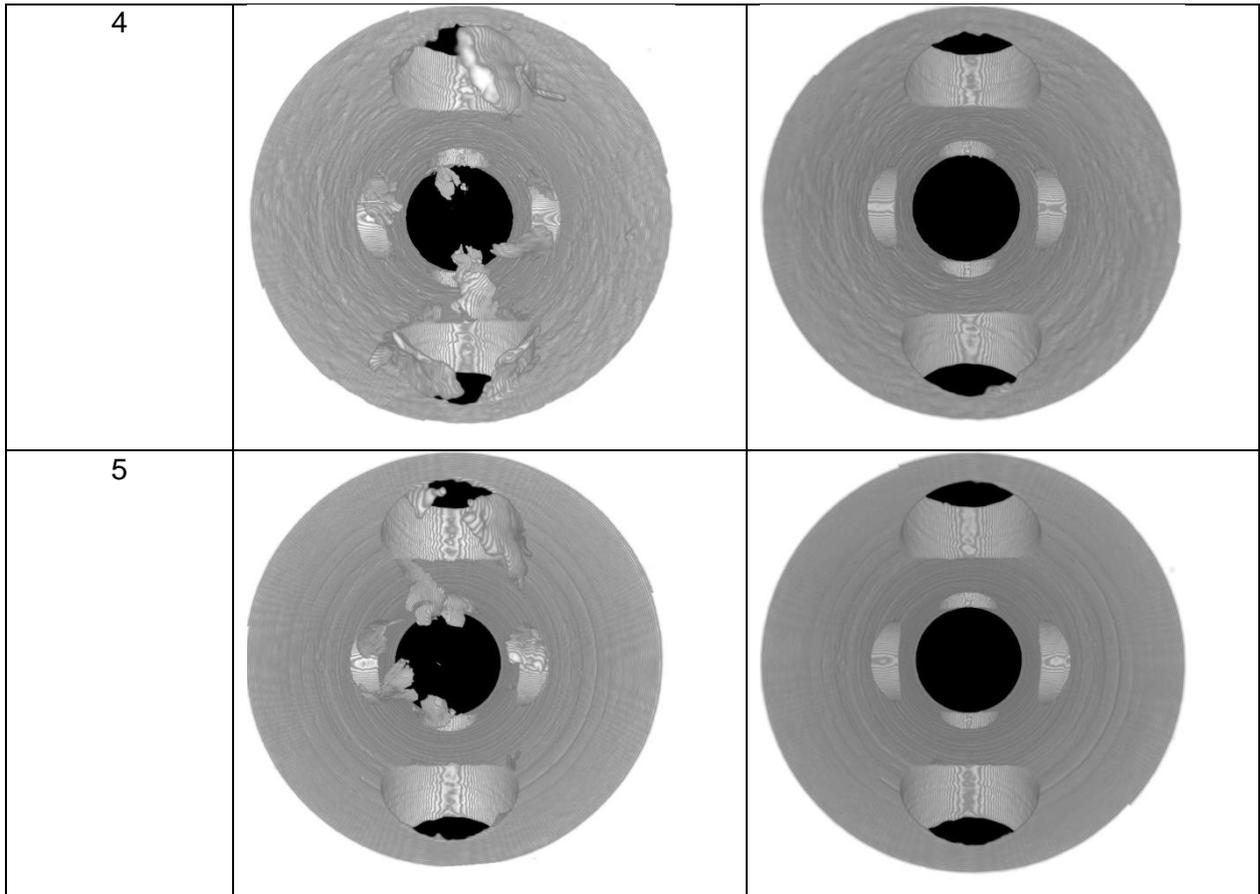
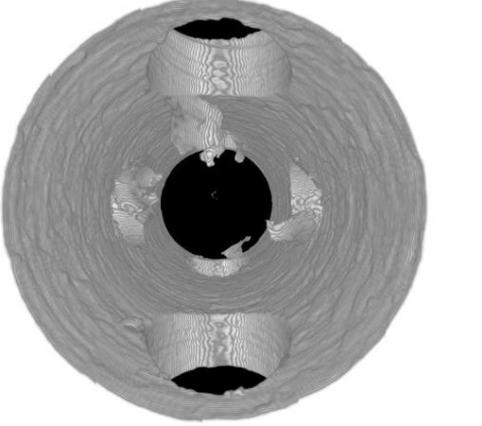
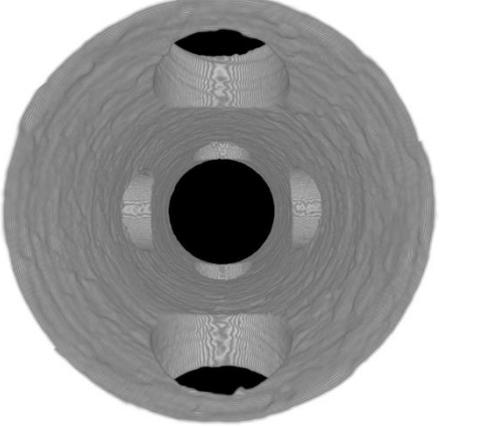
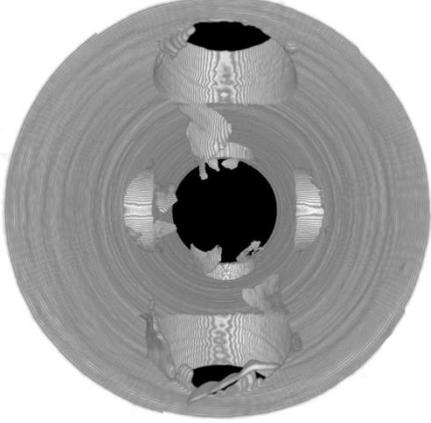
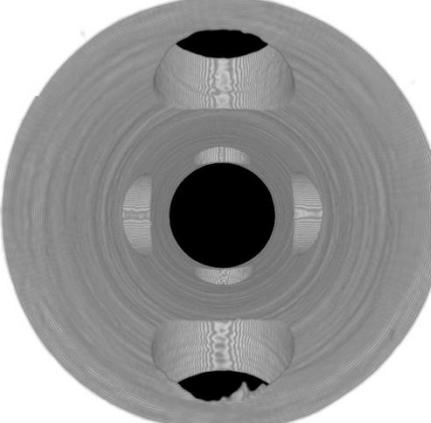
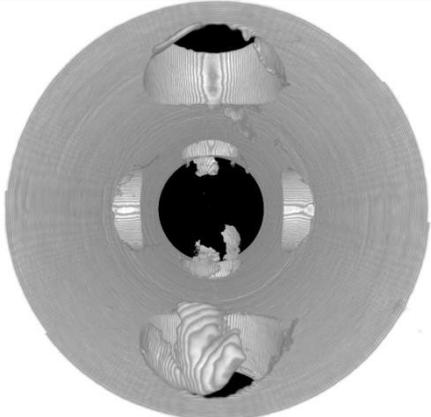
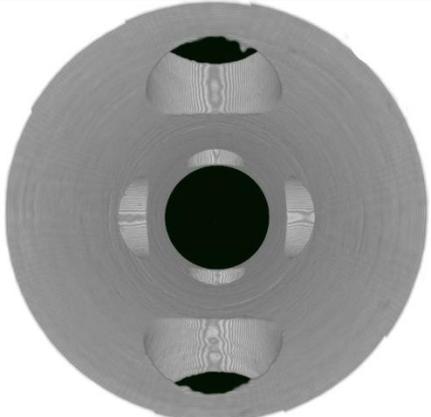
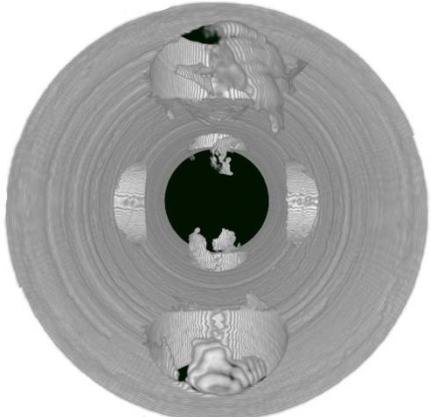
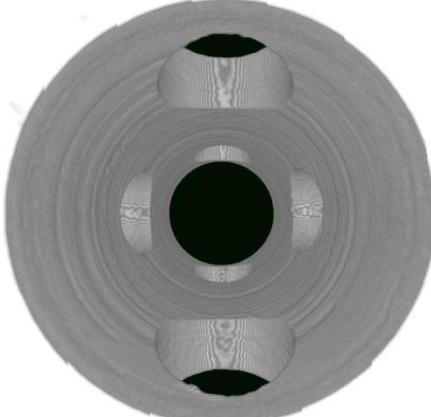
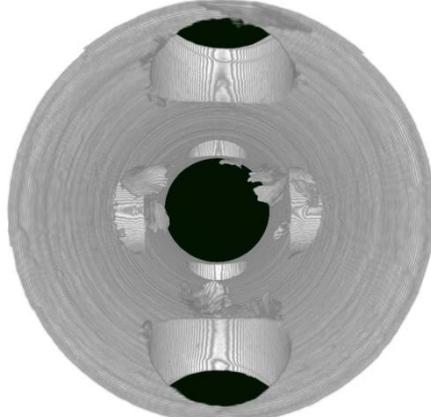


Tabelle 2-9: CT-Scan-Aufnahmen - Sonotrode: Sonderform (vorher/nachher)

Probekörper	Vorher	Nachher
Sonotrode Sonderform		
11		

12		
13		
14		
15		

2.1.14 Weitere High-Speed-Kamera-Aufnahmen

Um den Entgratvorgang im Detail verstehen zu können, wurden weitere High-Speed-Aufnahmen an offenliegenden Graten erstellt. Es wurden kurze Videosequenzen mit 2000 Bildern pro Sekunde gedreht, welche das Entgraten der Probekörper aufzeigen sollten. Jedoch wurden nicht die gleichen Kanten wie in der Versuchsdurchführung der Versuchsreihe I entgratet, sondern es wurden Kanten gewählt, die bei den gegebenen High-Speed-Kamera- und Objektivbedingungen am besten einzufangen waren.

Abbildung 2-36 zeigt einen stark vergrößerten Auszug der Entgratung durch die Sonotrode S26D7. Der Grat (rot) fängt nach kürzester Zeit an zu schwingen und sich in Strahlrichtung nach oben und unten zu bewegen.

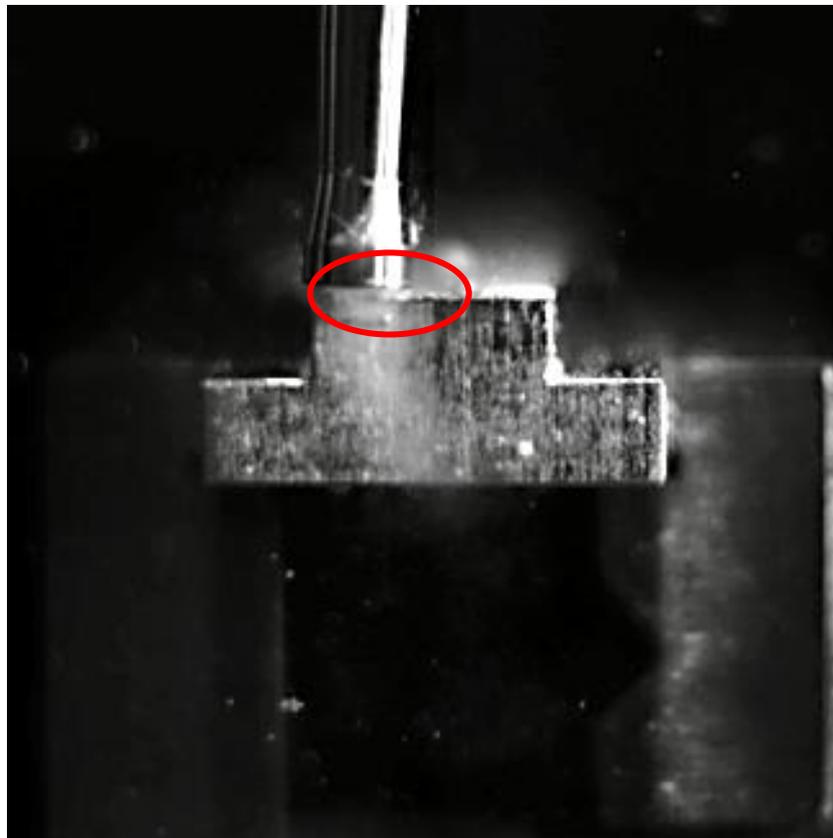


Abbildung 2-34: Versuchsreihe II: HSKA S26D7 + Probekörper (1)

Nach 0,25 s kommt es zum Abreisen des Grates. (siehe Abbildung 2-37)

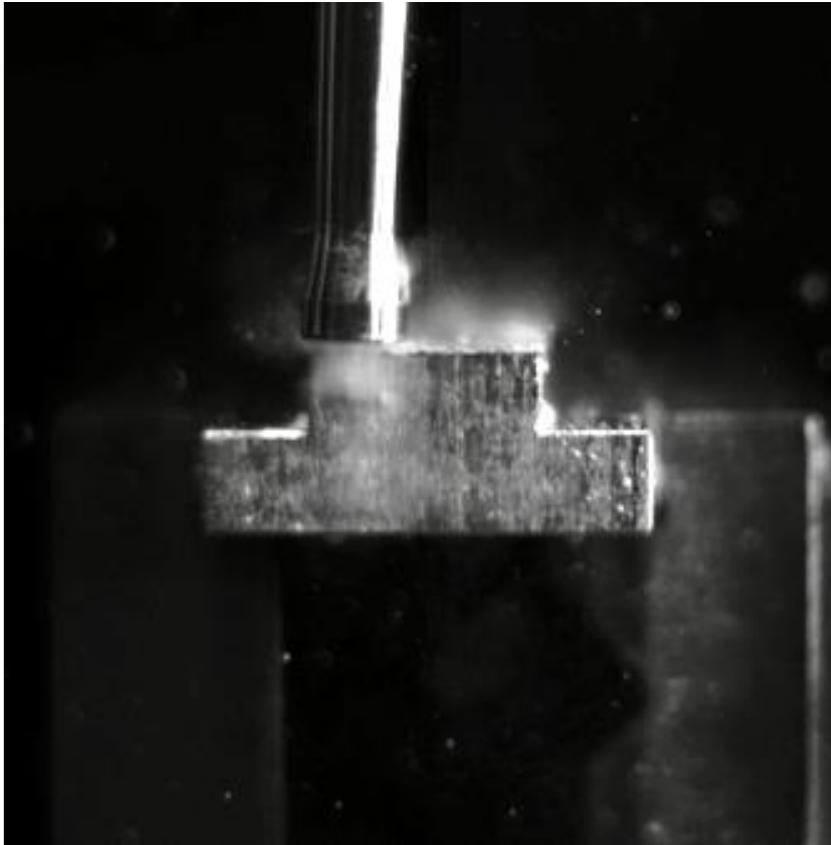


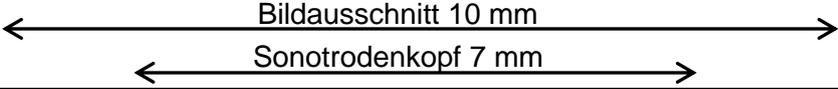
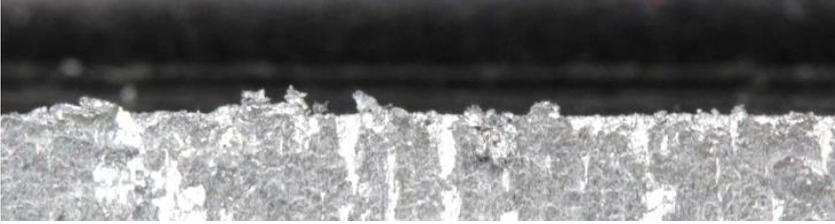
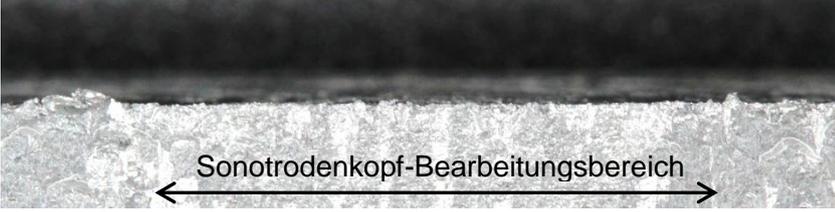
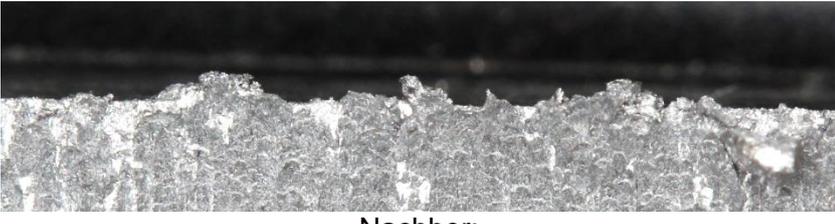
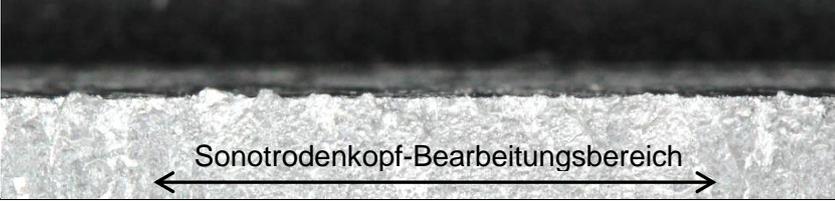
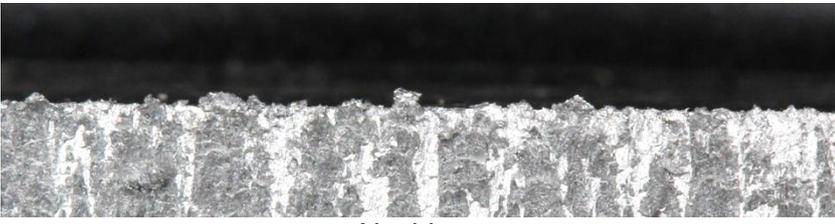
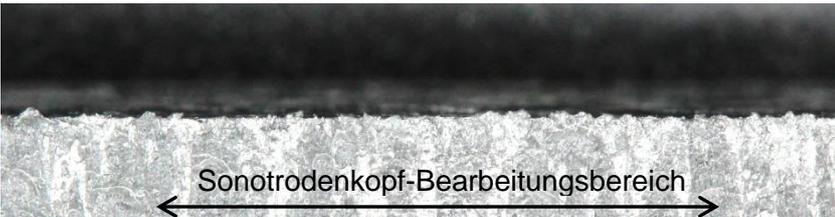
Abbildung 2-35: Versuchsreihe II: HSKA S26D7 + Probekörper (2)

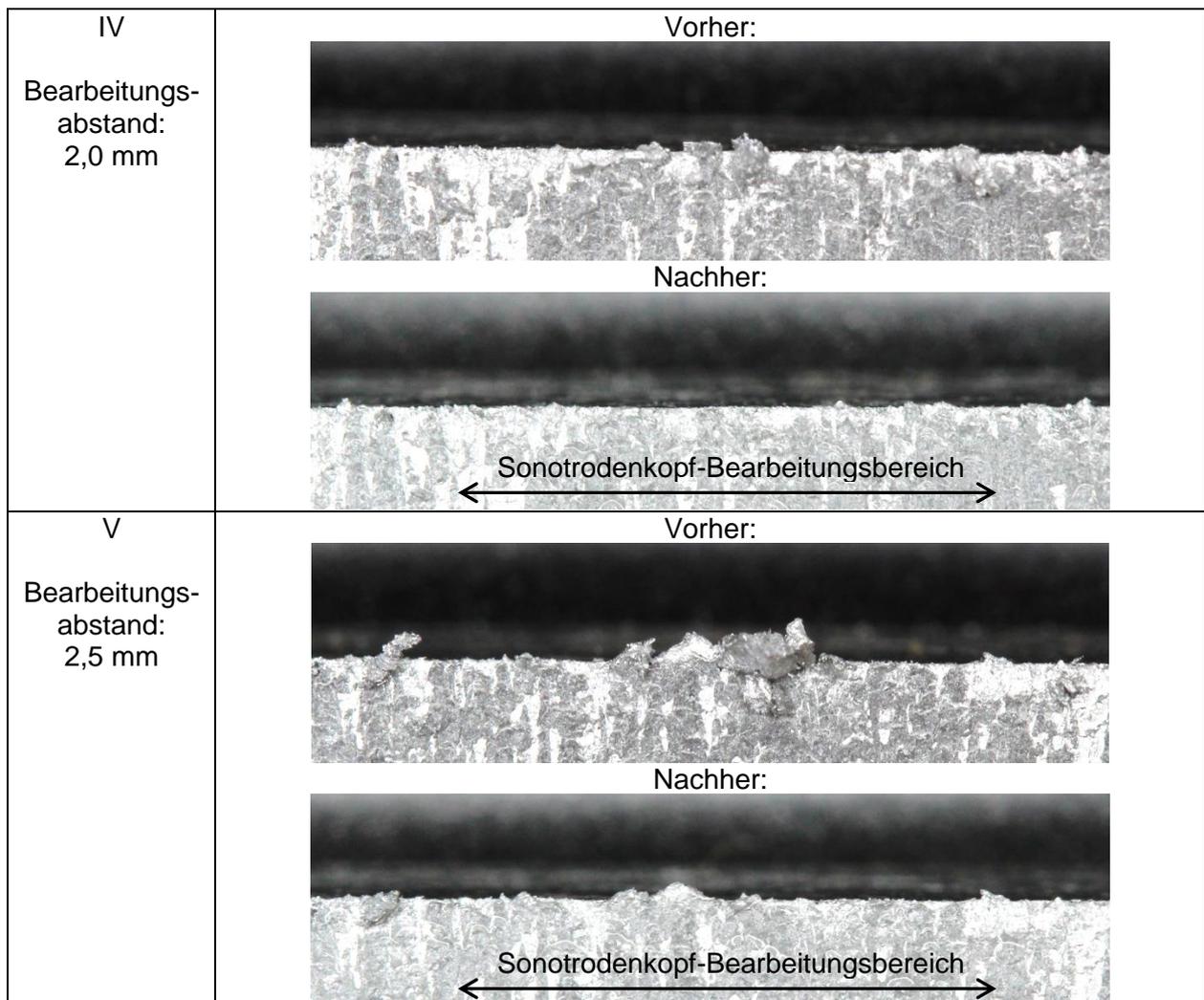
2.1.15 Punktuelle Entgratung mit unterschiedlichen Abständen – Bewertung mittels Fotodokumentation

Die Abschnittsbilder der Fotodokumentation zeigen den Erfolg der Entgratung entlang der Bauteilkanten. Jede Bauteilbetrachtung besteht dabei aus 5 Abschnitten (I – V) mit unterschiedlichen Bearbeitungsabständen.

Tabelle 2 11 zeigt die Ergebnisse der punktuellen Entgratung an der Aluminiumlegierung. Bei den Abschnitten ist jeweils der Bearbeitungsabstand zwischen Sonotrode und Bauteil vermerkt.

Tabelle 2-10: SRA: Punktuelle Entgratung

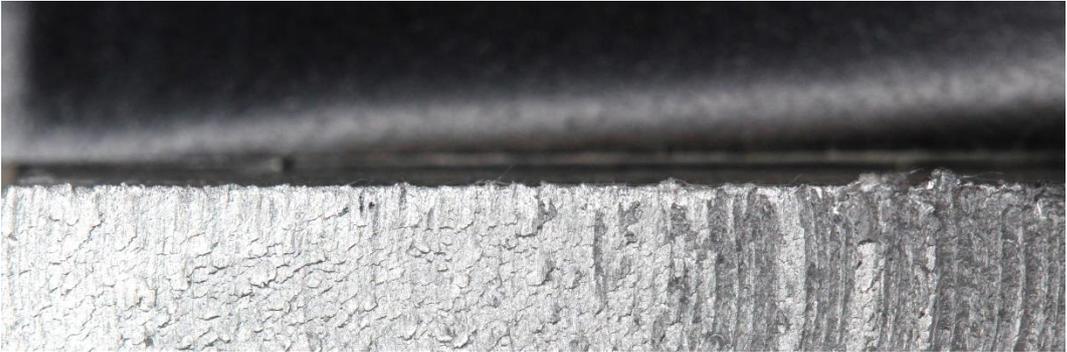
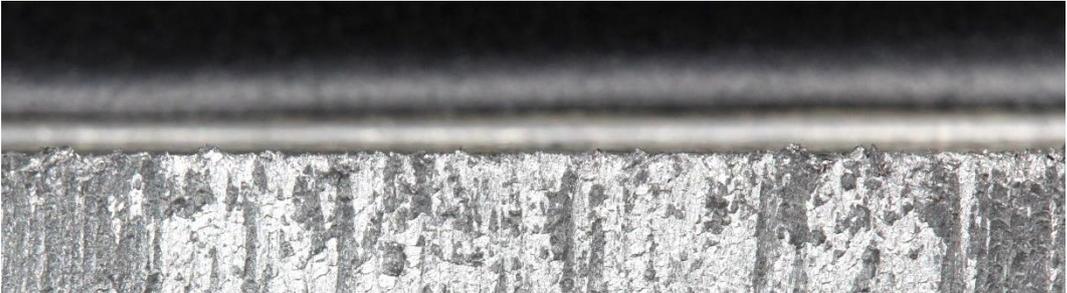
Abschnitt	Vorher/Nachher
Sonotrode S26D7	
Maßstab	
I Bearbeitungs- abstand: 0,5 mm	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 
II Bearbeitungs- abstand: 1,0 mm	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 
III Bearbeitungs- abstand: 1,5 mm	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 

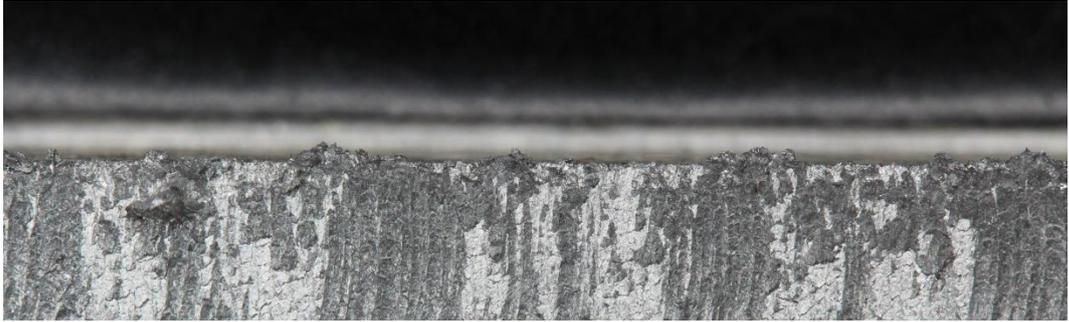


2.1.16 Kontinuierliche Entgratung

Die Abschnittsbilder der Fotodokumentation zeigen den Erfolg der Entgratung entlang der Bauteilkante. Jede Bauteilbetrachtung besteht dabei aus 5 Abschnitten (I – V). Tabelle 2 12, Tabelle 2 13 und Tabelle 2 14 zeigen die Ergebnisse der kontinuierlichen Entgratung entlang der Bauteilkante bei den drei Probekörpern aus AlSi7MgCu0,5, PVC und St37. Der Bearbeitungsabstand wurde hier konstant gehalten und so gering wie möglich gewählt, d.h. 0,5 mm zwischen Sonotrode und Bauteil.

Tabelle 2-11: SRA: Kontinuierliche Entgratung Aluminiumlegierung (AlSi7MgCu0,5)

Abschnitt	Vorher/Nachher
Sonotrode S26D7	
Aluminiumlegierung (AlSi7MgCu0,5)	
I	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 
II	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 

<p>III</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>IV</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

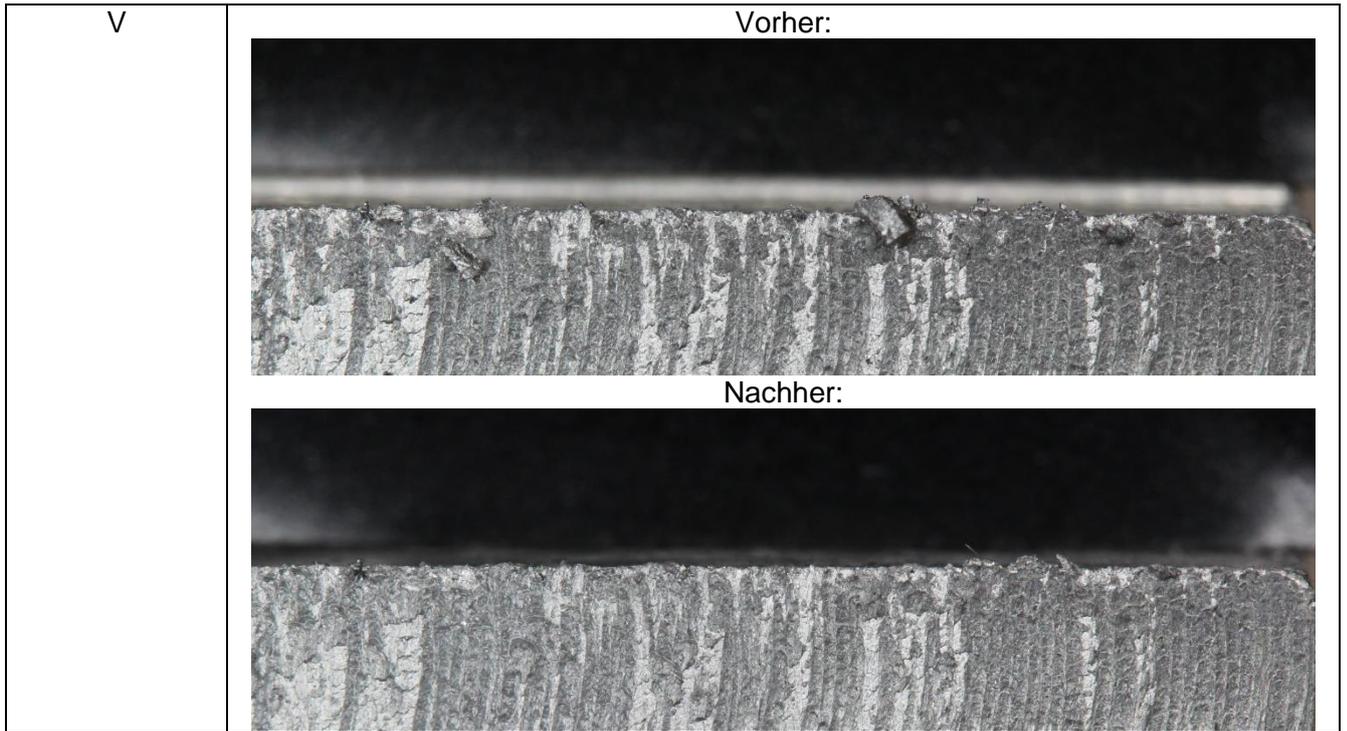
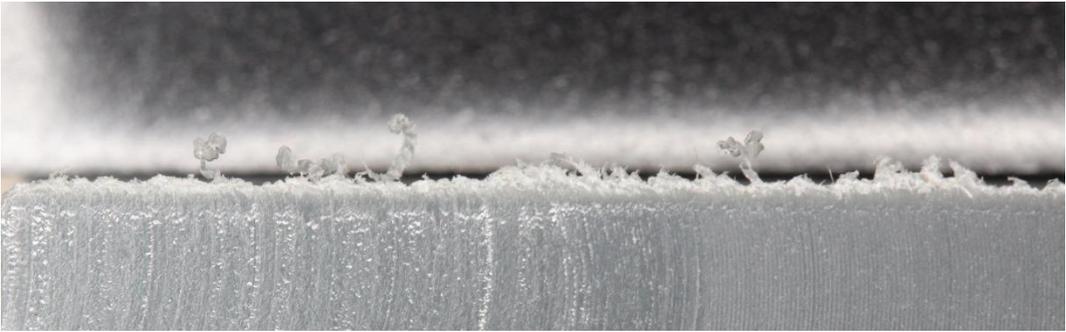
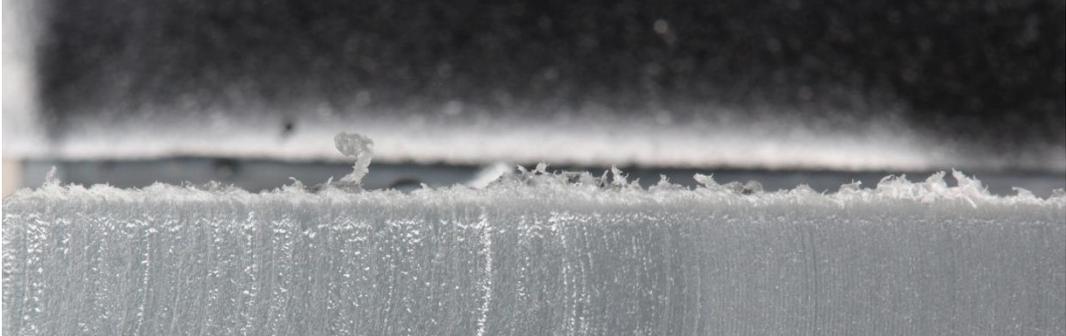


Tabelle 2-12: SRA: Kontinuierliche Entgratung Kunststoff (PVC)

Abschnitt	Vorher/Nachher
Sonot- rode S26D7	
Kunststoff (PVC)	
I	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

<p>II</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>III</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

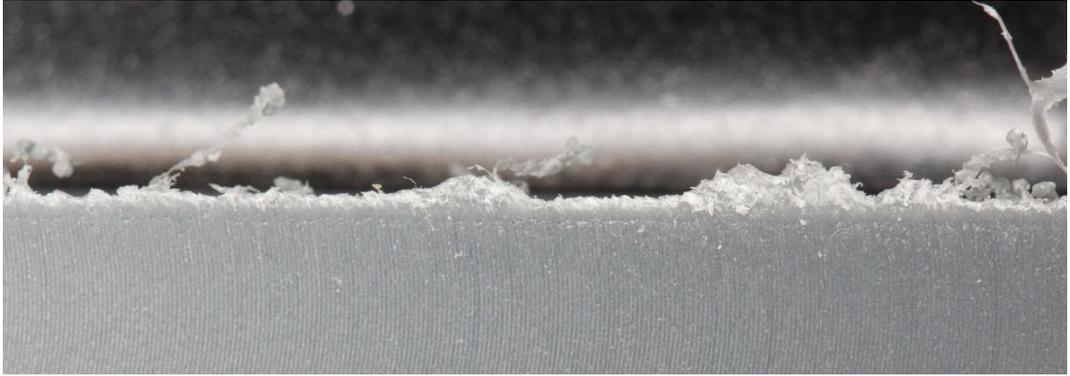
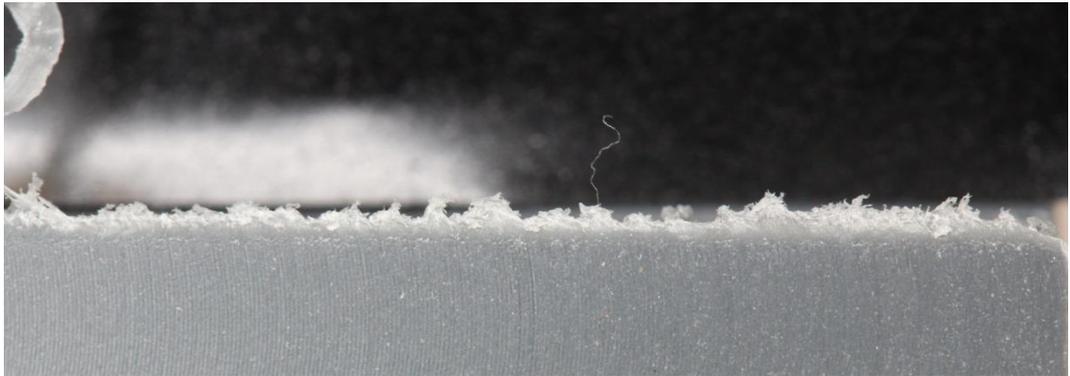
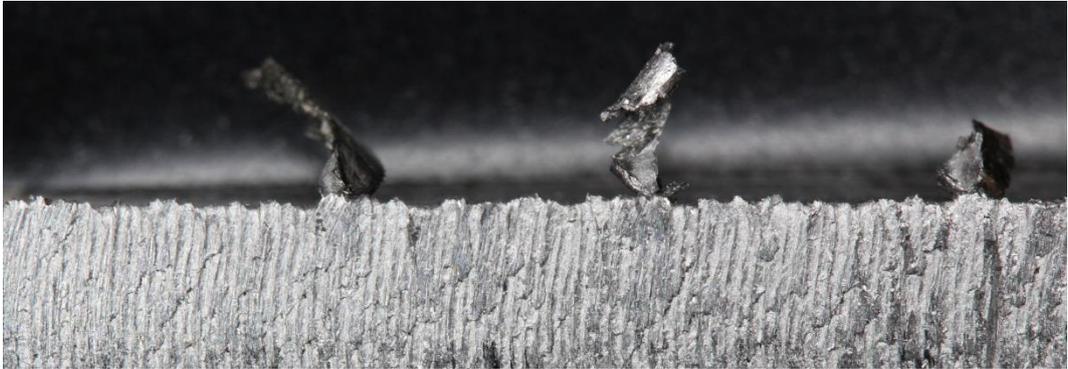
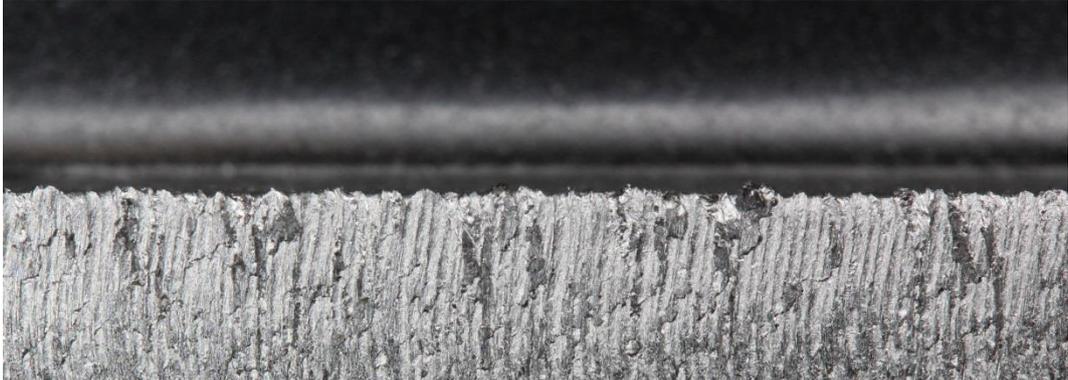
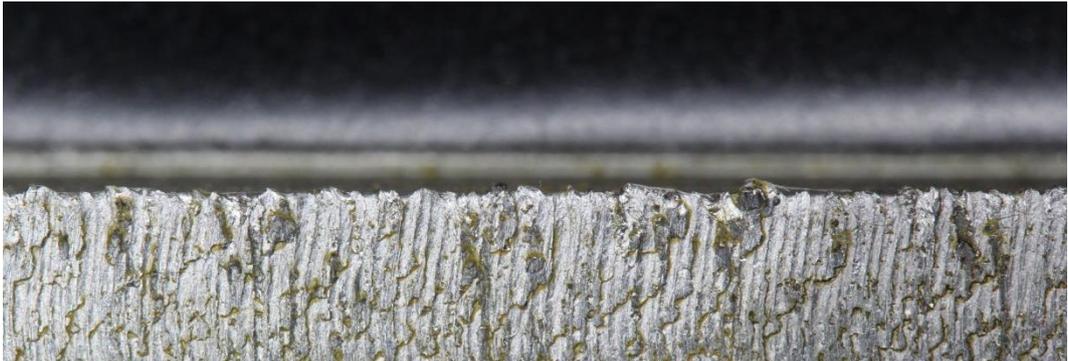
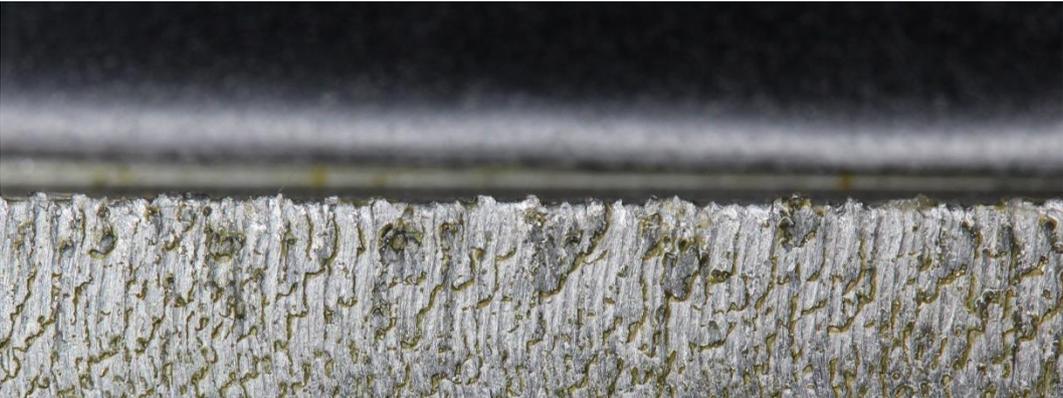
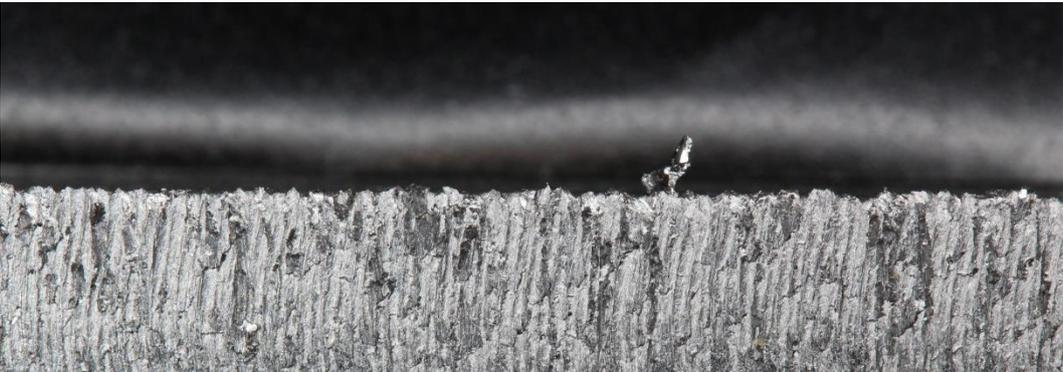
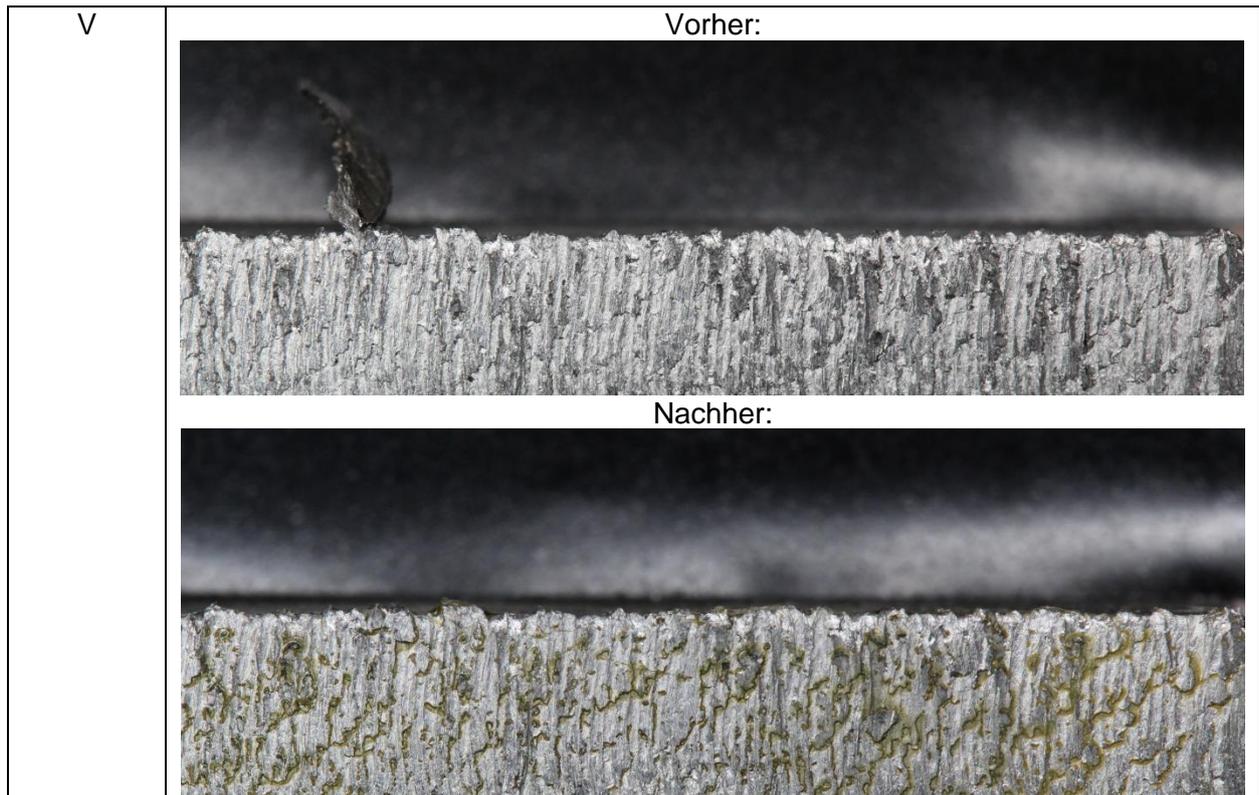
IV	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 
V	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 

Tabelle 2-13: SRA: Kontinuierliche Entgratung Stahl (St37)

Abschnitt	Vorher/Nachher
Sonot- rode S26D7	
Stahl (St37)	
I	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 
II	<p style="text-align: center;">Vorher:</p>  <p style="text-align: center;">Nachher:</p> 

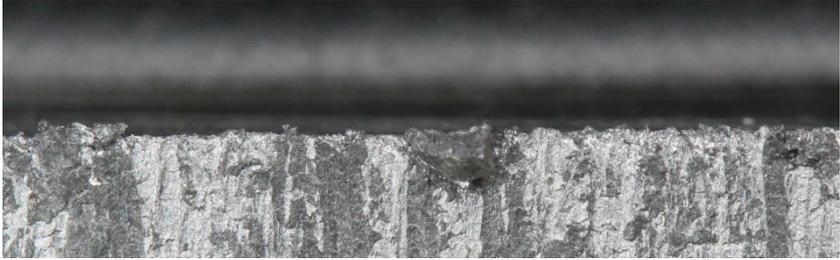
<p>III</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>IV</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

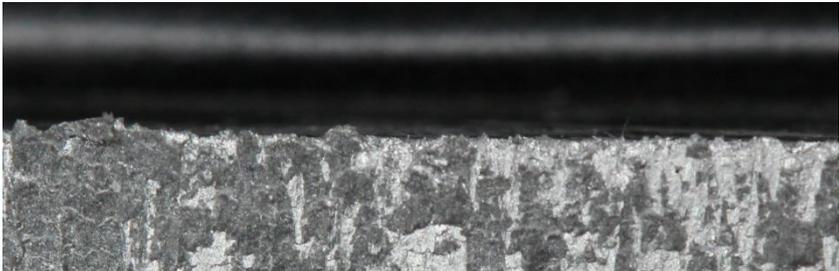
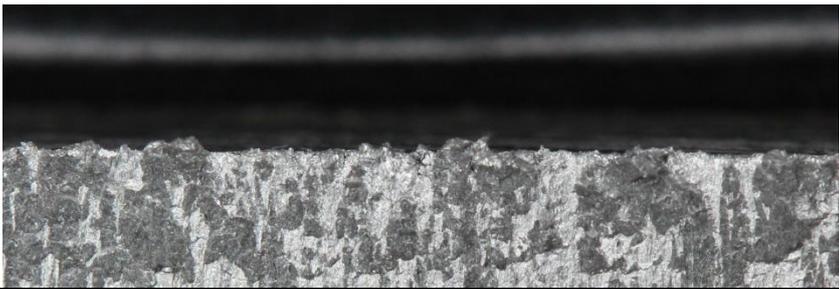


2.1.17 Kontinuierliche Entgratung im 45°-Winkel

Die Abschnittsbilder der Fotodokumentation zeigen die Ergebnisse der Entgratung entlang der Bauteilkante im 45°-Winkel. Die Bauteilbetrachtung besteht aus 5 Abschnitten (I – V). Tabelle 2 15 zeigt das Ergebnis der Entgratung im 45°-Winkel. Der Bearbeitungsabstand wurde hier ebenfalls konstant gehalten und so gering wie möglich gewählt, d.h. 0,5 mm zwischen Sonotrode und Bauteil.

Tabelle 2-14: SRA: Kontinuierliche Entgratung im 45°-Winkel

Abschnitt	Vorher/Nachher
<p>Sonotrode S26D7</p>	
<p>I</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>II</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

<p>III</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>IV</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 
<p>V</p>	<p>Vorher:</p>  <p>Nachher:</p> 

2.2 Messen und Beurteilen

2.2.1 Beurteilung und Interpretation: High-Speed-Kamera-Aufnahmen

Bei den High-Speed-Aufnahmen der Sonotrode S26D7 ist zu beobachten, dass kurz nach dem Einschalten des Ultraschallgenerators die Kavitationsbläschen von links nach rechts pendeln (Abbildung 2 25) bis sie nach ca. 0,75 s in der Mitte eine stabile und konstante Säule nach unten hin ausbilden (Abbildung 2 26).

Im Vergleich dazu lässt sich bei der Sonotrode mit Sonderform nach dem Einschalten über einen deutlich längeren Zeitraum beobachten, dass die Kavitationsbläschen von links nach rechts pendeln. Eine stabile und konstante Säule kommt hier nie wirklich zustande. Da die Kavitationssäule bei der Sonderform der Sonotrode nicht konstant wird, resultieren Nachteile in Bezug auf die Fokussierung der Energie und lassen auf geringere Effizienzen in der Bearbeitung von Graten schließen.

Die Abbildung 2 29 bis Abbildung 2 32 zeigen das Entgraten der Probekörper. Bereits kurz nach dem Anschalten des Ultraschallerzeugers werden erste Grate bzw. Späne aus der Zentralbohrung herausbefördert. Mit zunehmender Bearbeitungsdauer – die High-Speed-Kamera-Aufnahmen gingen jeweils ca. 5 s – ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Grate bzw. Späne, die zu sehen sind, stark rückläufig ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Bearbeitungszeiten pro Bohrung bzw. pro Kante nur sehr kurz sein müssen, da die volle Leistung in kürzester Zeit anliegt und nach wenigen Sekunden die mit der anliegenden Leistung und Amplitude zu entfernenden Grate gelöst sind.

2.2.2 Beurteilung und Interpretation: Video-Endoskopie-Aufnahmen

Die Video-Endoskopie-Bilder zeigen auf den ersten Blick ein akzeptables Ergebnis bezüglich der Entgratung mittels Ultraschallsonotroden.

Alle großen, sichtbaren Grate, welche weit in die Zentralbohrung hineinragten, konnten durch die Kraft der implodierenden Kavitationsbläschen, die durch die Ultraschallsonotrode entstehen, entfernt werden.

Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass bei nahezu allen Probekörpern an den Bohrungsverschneidungen noch kleine Grate bzw. Gratrückstände zurückbleiben. Inwieweit diese Grate von Relevanz sind, lässt sich aus den Ergebnissen der Video-Endoskopie nicht endgültig abschätzen. Grundsätzlich ist die Relevanz solcher kleinen Restgrate vom Einsatzgebiet des Bauteils abhängig. Bei geringen Strömungen in Bauteilen wirken während des Benutzungsprozesses des Bauteils geringere Kräfte auf die

Grate als bei schnell und mit großen Volumina durchströmten Bauteilen. Dabei spielt die Art des Mediums ebenfalls eine zentrale Rolle.

Vergleicht man das Ergebnis der mit Ultraschall-Sonotroden entgrateten Probekörper mit dem Resultat des mit Hochdruckwasserstrahls im Großserienprozess entgrateten Ölkanals eines Zylinderkopfes der Fa. BMW, so sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen und es zeigt sich, dass auch beim bisher angewendeten Verfahren zur Entfernung innenliegender Grate durchaus Grate zurückbleiben (Abbildung 2 38 und Abbildung 2 39). Dies verdeutlicht, dass die Ergebnisse der Entgratung mittels Ultraschall-Sonotroden durchaus positiv zu sehen sind.

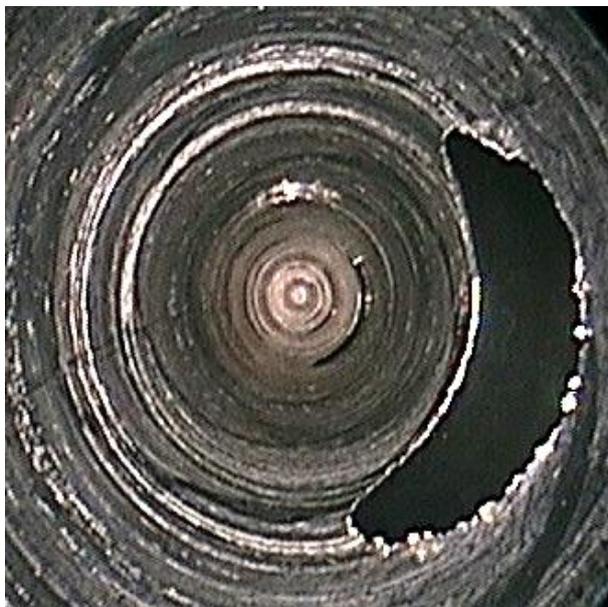


Abbildung 2-36: Ölkanal eines Zylinderkopfgehäuses (mit Hochdruckwasserstrahl entgratet)



Abbildung 2-37: Ölkanal eines Zylinderkopfgehäuses (mit Ultraschall-Sonotroden entgratet)

2.2.3 Beurteilung und Interpretation: CT-Scan der Zentralbohrung

Die Gegenüberstellung der Zustände der Zentralbohrung vor und nach dem Entgraten festigt das Ergebnis der Gratvermessung und zeigt, dass das Entgraten mittels Ultraschall-Sonotroden möglich ist. Jedoch zeigt die Gegenüberstellung der Vorher-/Nachher-Bilder auch, dass besonders kleine Grate oft an der Wand der Zentralbohrung zurückbleiben. Alle großen Grate, welche auf den ersten Blick auch ohne Vergrößerung graphischer- oder optischer Art erkennbar sind, können komplett entfernt werden.

Dieser Eindruck wird auch durch das Übereinanderlegen der Aufnahmen der Zustände bestätigt. In Abbildung 2 40 sind die Grate vor der Entgratung transparent dargestellt und gelb umrandet. Auf dem darunterliegenden Bild des Endzustandes nach der Bearbeitung

sind die großen und auf den ersten Blick sichtbaren Grate nicht mehr vorhanden. Der Einsatz des Ultraschalls gepaart mit den Sonotroden zeigt bei großflächigen Graten sehr gute Entfernungseigenschaften.

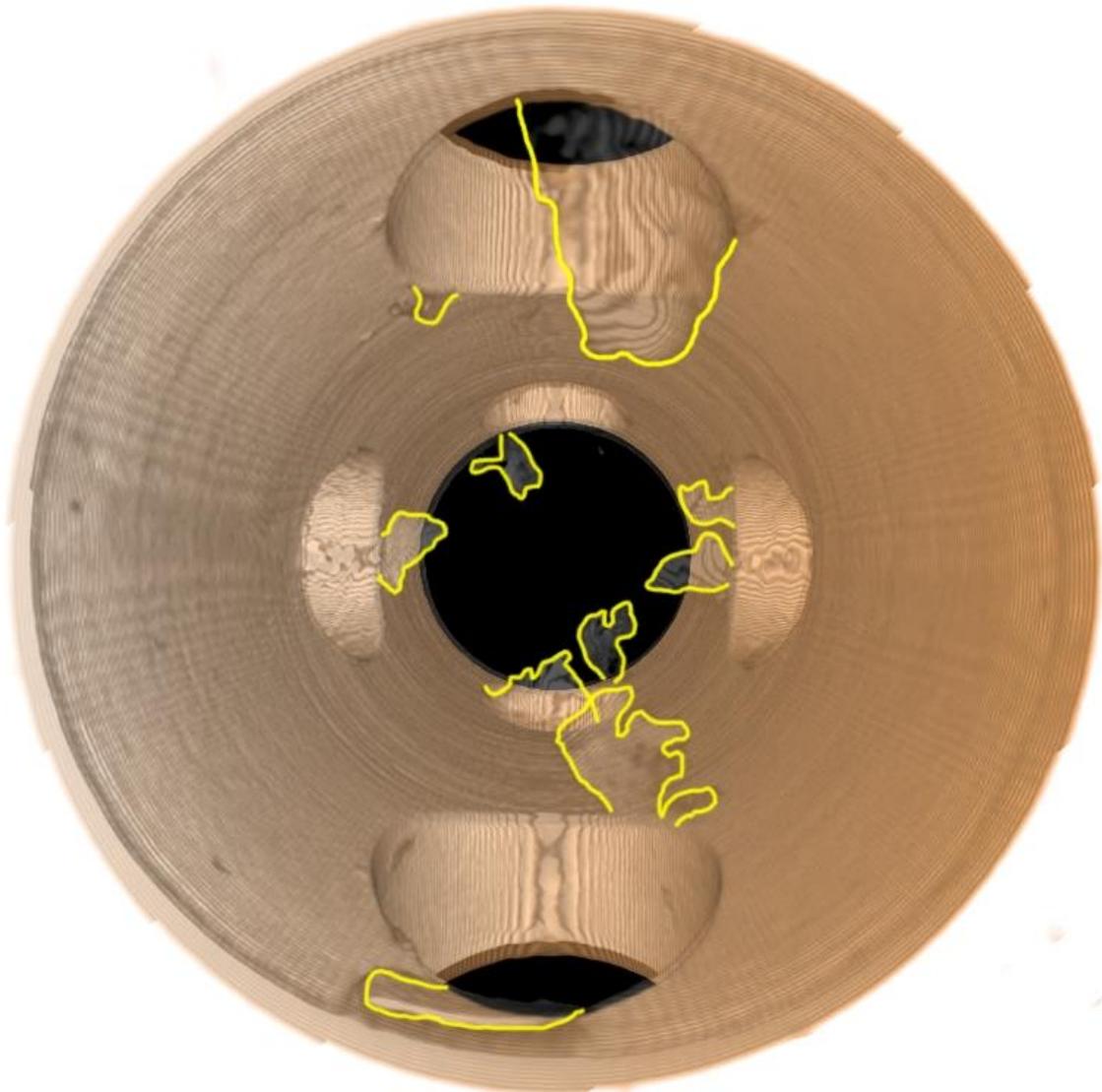


Abbildung 2-38: Bildüberlagerung CT-Scan-Zentralbohrung

2.2.4 Beurteilung und Interpretation: Messungen

Grundsätzlich gilt zuerst einmal festzuhalten, dass die Ergebnisse der Messungen gewisse Fehler bzw. Toleranzen aufgrund von optischen Fehleinschätzungen der messenden Person und durch die begrenzte Darstellungsfähigkeit bzw. maximale Pixelanzahl der Software und Hardware aufweisen. Diese können zwar bis in den μm -Bereich Formen bzw. Objekte darstellen, jedoch müssen aufgrund der relativ großen Größe der

Probekörper (für den SkyScan) Verluste bei der Detailgenauigkeit in Kauf genommen werden. Besonders bei den anschließenden Messungen nach der Entgratung konnten einige Größen an den Bohrungsverschneidungen nicht mehr bestimmt werden, da diese in der Darstellung des Programms nicht mehr messbar waren. In diesem Fall wurde der Wert 0 mm, d.h. eine komplette Entfernung des Grates angenommen. Wenn beim gleichen Grat allerdings andere Parameter noch messbar waren, d.h. diese nicht als 0 mm angenommen wurden, ist davon auszugehen, dass ein Teil des Grates auch noch vorhanden war, aber eben nicht alle Werte des Grates bestimmbar waren.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen trotz dieser Fehler bzw. Toleranzen deutlich den großen Erfolg (prozentuale Veränderung Messungen Sonotrode S26D7 -86,1% und Messungen Sonotrode Sonderform -74,7%) bei der Entgratung der als signifikant betrachteten Grate und bestätigt das Ergebnis.

Als signifikant galten die Grate mit großen Gratfußflächen, d.h. mit großen Gratfußbreiten, Gratfußlängen und Gratfußdicken, da diese von vorneherein größere Anhaftungskräfte gegenüber der Innenwand der Probekörper aufwiesen.

Jedoch stellte sich bei der genaueren Betrachtung der Grate heraus, dass im Bereich um die großen Grate die kleinen Grate weniger erfolgreich entfernt werden konnten. Zu erklären ist dieses Phänomen durch die größere Krafteinwirkung mit wachsender Oberfläche der Grate, d.h. steigende Krafteinwirkung bei steigender Gratfläche als Produkt aus der Grathöhe und der Gratfußlänge.

Der Vergleich der Entgratergebnisse der beiden Sonotrodenköpfe aus Tabelle 2 7 und Tabelle 2 8 Tabelle 2 8: Messungen Sonderform zeigt, dass das Entgraten mit der Sonderform im Vergleich zur serienmäßig erhältlichen S26D7 keine besseren Entgratergebnisse, sondern sogar schlechtere Ergebnisse liefert. Das Ergebnis der Messungen ist allerdings nicht repräsentativ aufgrund der geringen Anzahl an betrachteten Graten und der rein optischen Auswahl der zu vermessenden Grate.

2.2.5 Beurteilung und Interpretation: High-Speed-Kamera-Aufnahmen

Die Abbildung 2 36 und Abbildung 2 37 zeigen das Entgraten des Probekörpers. Bereits nach wenigen Millisekunden beginnt der Grat durch die Ultraschall-Beaufschlagung der Sonotrode zu schwingen. Während dieser Auf-und Abbewegung beginnt sich der Grat langsam von der Bauteilkante zu lösen. Aufgrund der großen Krafteinwirkung durch den Jet der implodierenden Kavitationsbläschen kommt es zum Ermüden der Verbindung. Nach ca. 0,2 s löst sich dann der Grat abrupt vom Bauteil.

Die Entgratung erfolgte auch bei weiteren Beobachtungen auf ähnliche Weise, d.h. die Beaufschlagung durch den Ultraschall bewirkt eine Bewegung im Grat, bis es zum Ermüdungsbruch kommt.

Die kurzen Zeitspannen, in denen diese Entgratungen ablaufen, festigen die Vermutung aus Versuchsreihe I, dass dieses Verfahren zur Entfernung von Graten nur sehr kurze Bearbeitungszeiten benötigt.

2.2.6 Beurteilung und Interpretation: Fotodokumentation

Die Ergebnisse der punktuellen Entgratung (siehe Tabelle 2 12) sind positiv zu bewerten. Wie bei den Probekörpern in Versuchsreihe I können – im Bearbeitungsabstandsbereich von 0,5 mm – 2,5 mm – die großen Grate nahezu vollständig entfernt werden. Eine Bearbeitung mit einem größeren Arbeitsabstand als 2,5 mm zwischen Bauteil und Sonotrode wurde hier nicht detaillierter betrachtet. Es ist aber davon auszugehen, dass bei Abständen größer 5 mm zwischen Bauteil und Sonotrode die Wirkung deutlich zurückgeht und damit eine Anwendung nicht mehr sinnvoll ist. Auch in der Versuchsreihe II bleiben bei allen Bearbeitungsabständen – wie bei den Probekörpern aus Versuchsreihe I – kleine Grate zurück, ob diese relevant sind, ist aber vom Einsatzgebiet der Bauteile abhängig.

Bei der kontinuierlichen Entgratung entlang der Bauteilkante können bei den metallischen Werkstoffen (Stahl- und Aluminiumlegierung) sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Das Entfernen von Graten an Kunststoff (PVC) ist allerdings mit den Ultraschall-Sonotroden nicht ausreichend möglich. Zwar werden kleine Teile der Grate abgetrennt, doch die Mehrzahl der großen und signifikanten Grate bleibt zurück. Die unzureichende Entgratwirkung ist hier durch den flexiblen Werkstoff zu erklären. Beim Beaufschlagen der Grate durch den Ultraschall werden diese auf Grund ihrer Flexibilität nur gebogen und brechen nicht wie die festen und nicht biegsamen Metallgrate ab. Nach der Ultraschallbeaufschlagung kehren die Grate in ihren Ursprungszustand zurück. Inwieweit diese Grate durch höhere Ultraschallintensitäten bzw. andere Sonotrodenformen entfernt werden können, kann an diesem Punkt der Erprobung noch nicht abgeschätzt werden.

Die Entgratwirkung bei der kontinuierlichen Entgratung im 45°-Winkel ist vergleichbar mit der Wirkung im 90°-Winkel zum Grat. Deutliche Unterschiede bezüglich des Entgratergebnisses sind nicht zu erkennen.

Die guten Entgratergebnisse, sowohl bei den unterschiedlichen Bearbeitungsabständen (0,5 mm – 2,5 mm) als auch bei den beiden Bearbeitungswinkeln (45°- und 90°-Winkel), eröffnen im Praxisfall Freiheiten, zum Beispiel bei komplexen Bauteilen mit schlecht

zugänglichen Graten bezüglich der Bearbeitung bzw. Entgratung dieser Bauteile. Gleichzeitig spielen bei vollautomatisierten Entgratungen mit Robotern die Positionierungsungenauigkeiten ($<0,5$ mm) zwischen Sonotrode und Bauteil durch die Robotersteuerung keine Rolle, wenn die Ergebnisse der Entgratung im Bereich gewisser Winkel (45° - 90° -Winkel) und Abstände ($0,5$ mm – $2,5$ mm) ähnlich ausfallen. Zusätzlich dienen größere Abstände als Puffer, damit es auf keinen Fall zu einem beschädigenden Kontakt zwischen Bauteil und Sonotrode kommt.

In den bisherigen Arbeiten lag der Schwerpunkt auf dem Nachweis der prinzipiellen Wirksamkeit des neuen Entgratverfahrens. Da in Deutschland die Automobil- und Zulieferindustrie den größten produzierenden Industriezweig darstellt und hier in der graterzeugenden Zerspanungstechnik zu einem Großteil Aluminiumwerkstoffe eingesetzt werden, liegt in diesem Anwendungsfeld das größte Energie-Einsparungspotenzial. Aus diesem Grund wurden die Versuche des Fraunhofer IPA in dieser ersten Projektphase auf die Entgratung von Aluminiumwerkstoffen konzentriert.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde zunächst aus den Erkenntnissen der Versuche des Fraunhofer Institutes eine Anlage entwickelt, die für einen automatisierten, industriellen Einsatz die Grundlage darstellt. Gleichzeitig wurde ein Handentgratmodul entwickelt, das die Versuche einer flexiblen Entgratmöglichkeit bedient. Der Aufbau und die Wirkungsweise dieser Einheiten sind in später folgenden Kapitel genauer beschrieben.

Nachdem durch die Ergebnisse der Versuche des Fraunhofer-IPA die Machbarkeit der Entgratung mittels Ultraschall an Probekörpern nachgewiesen wurde, entwickelten die Firmen Weber Ultrasonics AG und LPW Reinigungssysteme GmbH Anlagen, die für die industrielle Verwendung geeignet sind. Diese sind in den folgenden Kapiteln beschrieben

2.3 Handentgrat-Apparatur

Zunächst musste für diese Versuche ein Hand-Entgratmodul entwickelt werden, das den ergonomischen Anforderungen einer Bedienperson gerecht wird. In Zusammenarbeit mit einem Produktdesigner entstand ein Teil, das ähnlich eines Stabs gestaltet ist und sowohl gerade als auch um 90 °gewinkelt verwendet werden kann. Dadurch ist es möglich, jede Entgratposition eines Bauteils optimal zu erreichen. Da das Gewicht dieser Einheit recht hoch ist, wird über einen Gewichtsausgleich eine Entlastung für die Bedienperson geschaffen. Der weitere Aufbau der Anlage sieht so aus, dass in einem Gestell ein Wasserbecken eingebracht ist, in dem die Teile in Vorrichtungen im Wasser positioniert werden und somit mit der Handentgratung bearbeitet werden können. Der Generator ist an der Rückwand des Gestells befestigt. Im unteren Bereich des Gestells ist das Kühlgerät für die Wasserkühlung eingebaut.



Abbildung 2-39: Handschweissmodul mit Generator

2.3.1 Arbeitsweise der Anlage

Zunächst schaltet man die Anlage ein. Dadurch beginnen Kühlaggregat incl. Pumpe zu laufen und der Ultraschallschweißgenerator schaltet sich ein. Sobald das Wasser die optimale Temperatur von 10° erreicht hat, ist die Anlage einsatzbereit. Nun kann das Teil, das vorab auf einer Vorrichtung positioniert wurde bearbeitet werden. Nach drücken des EIN Knopfs an der Handbedieneinheit schaltet sich der Ultraschall ein. Entweder kann dieser über eine, am Generator voreingestellte Zeit abgeschaltet werden oder durch Verlassen des gedrückten EIN – Knopfs.

2.3.2 Übersicht der Kundenteile mit Anforderung an die Entgratungsgüte

Da die meisten Kundenteile einer Geheimhaltung unterliegen, kann an dieser Stelle nur auf wenige Versuche eingegangen werden. Die folgende Auflistung zeigt aber, dass wir eine Vielfalt an Teilen aus der Industrie getestet haben und somit ausreichend

Informationen sammeln konnten um die Funktionstüchtigkeit des Verfahrens nachzuweisen. Im Laufe dieser Versuche wurden wir auch von einem Kunden kontaktiert, der aufgrund der sehr guten Ergebnisse beim Entgraten von Knochennägeln aus einer Titanlegierung, weitere Schritte im Rahmen eines „Jugend Forscht“ Programms unternommen hat. Die Aufgabenstellung zu diesem Wettbewerb war, Parameter zu finden, unter denen sich noch mehr Materialien bearbeiten lassen, als die, die wir schon getestet hatten. Speziell auch Edelstähle.

Generell werden die Versuche immer nach dem gleichen Schema durchgeführt. Das Bauteil, das wir bekommen, wird zunächst mit Ultraschall gereinigt, um evtl. ölige Verschmutzungen zu beseitigen, da diese Verschmutzungen das Entgrat Ergebnis stark beeinflussen können. Danach werden Aufnahmen der zu entgratenden Stelle mit einem Mikroskop gemacht. Nach Beschallung durch Ultraschall wird diese Stelle erneut unter dem Mikroskop angeschaut um somit das Ergebnis zu beurteilen. Die Parameter der Bearbeitung werden den Aufnahmen zugeordnet um dann das optimale Ergebnis zu erhalten.

2.3.3 Beispiel Kundenteil: Knochennagel

Aufgabenstellung:

Die Löcher auf den Seiten sind so gratfrei zu bekommen, damit sich kein Span mehr löst beim Einschrauben in einen Knochen. Material Titanlegierung.

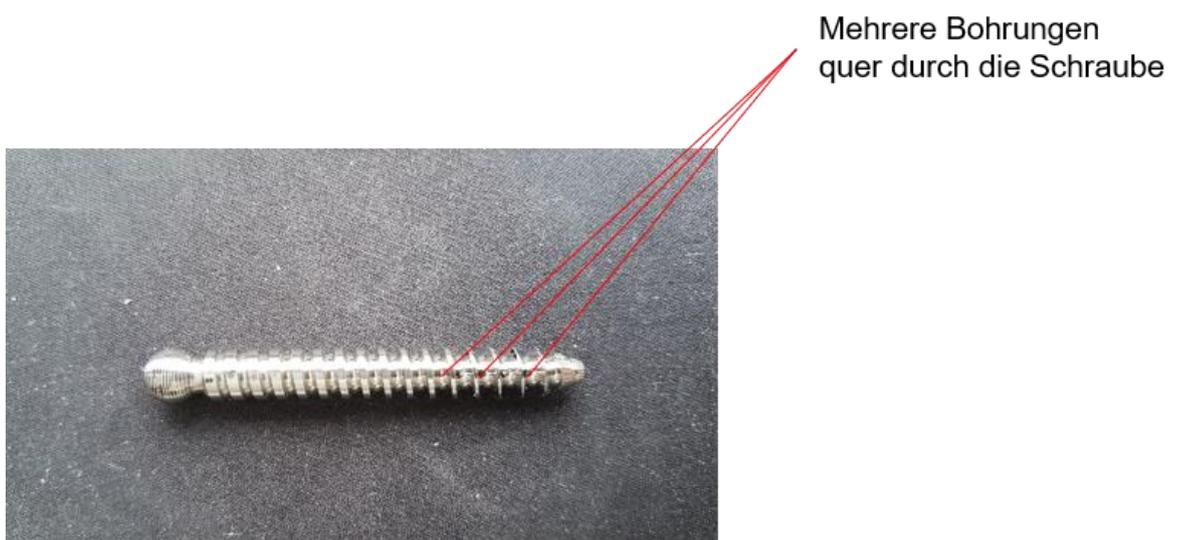


Abbildung 2-40: Knochennagel

Durchführung:

Der Nagel wurde in eine Vorrichtung eingespannt und mit einer Rundsonotrode 5 mm, 105 µm Amplitude, 12 Sekunden bestrahlt. Der Winkel war undefiniert, da es sich um das Handmodul handelt. Der Abstand lag bei ca. 2 mm

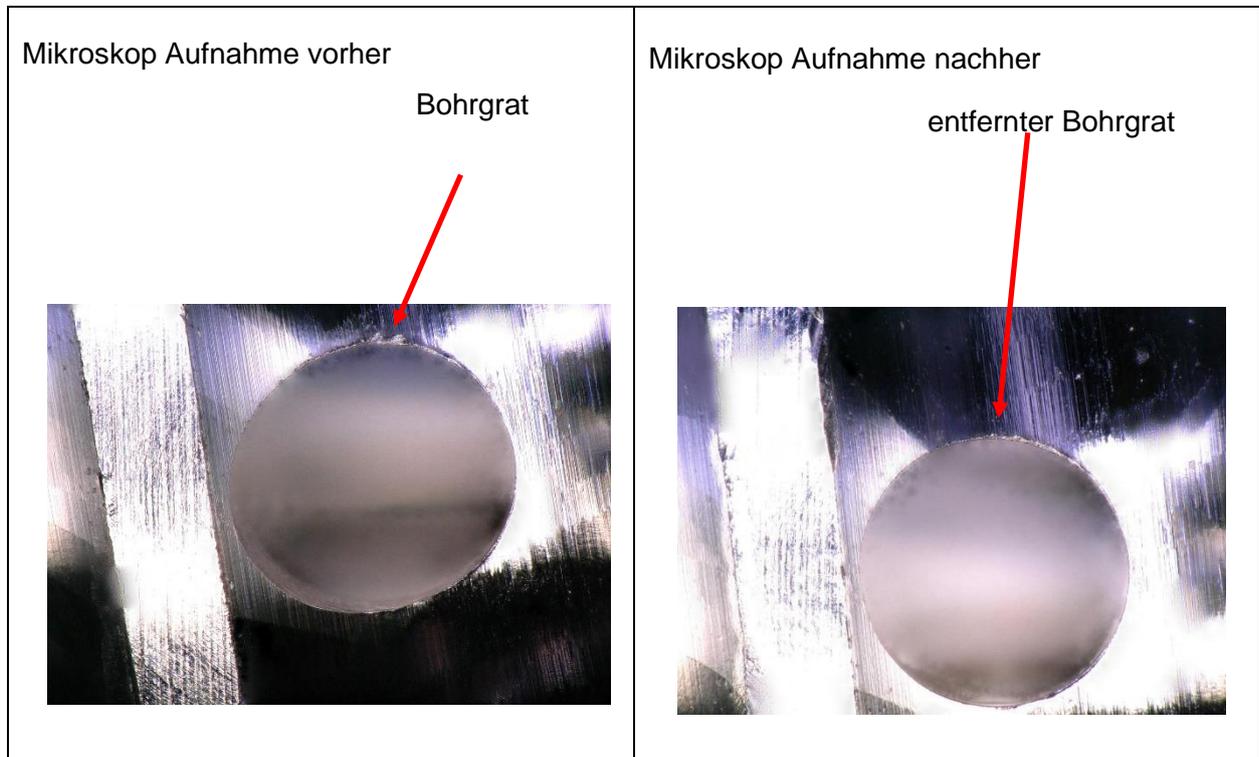


Abbildung 2-41: **Mikroskopische Aufnahme des Bohrlochs im Knochennagel**

Wie man auf den Aufnahmen sehen kann, wurde der Grat vollständig beseitigt.

Das Beispiel wurde auch gewählt, weil aus dieser Zusammenarbeit mit dem Kunden das Thema für den „Jugend Forscht Wettbewerb“ entstand. Das Resultat dieser forschenden Arbeit war sehr wichtig auch für dieses Forschungsprojekt. Durch verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Wasserqualitäten und Zusammensetzungen wurde nachgewiesen, dass, entgegen unserer ersten Annahme dieses Element doch einen großen Einfluss auf die Entgratqualität hat. Wie haben herausgefunden, dass Reinstwasser mit einer Anzahl von Carbiden und eine Verwendung bei 10 °C das optimale Medium, um die größtmögliche Kavitation ist. Dazu wurde ermittelt, dass verschiedene Materialien mit verschiedenen Winkeln bestrahlt werden müssen um optimale Ergebnisse zu erzielen. Man spricht hierbei vom Effekt der Rayleigh-Welle.

2.4 Drei-Achs Entgrat-Anlage

2.4.1 Aufbau der Anlage

Im Folgenden wurden unterschiedliche Entgrataufgaben von verschiedenen Bauteilen an uns herangetragen. Aus diesen Anforderungen entstand eine Anlage, die Bauteile mit einer Größe von ca.: 320 x 250 x 120 mm bearbeiten konnte. In der Anlage wurde das Bauteil in einem Wasserbad positioniert und die Sonotroden in den X-Y-Z-Achsen verfahren. Angetrieben wurden diese Achsen mittels programmierbarer Schrittmotoren. Das benötigte Wasser wird durch eine Umwälzpumpe umgewälzt und gefiltert. Das Wasser wurde auf einer konstanten Temperatur von ca. 12 °C temperiert.

Die folgenden Daten spezifizieren die erste Ultraschall-Entgratanlage:

Modul 1 (Entgrateinheit)

Stabsonotrode	1 x 2 kW
Balkensonotrode	2 x 2 kW
Transport-/Hubeinheiten	4 kW max.
Achseinheiten Sonotrode	3 kW max.
Kreislauffiltration	4 kW max.
ggf. Heizung	5 kW (optional)
Reserve Steuerstrom	6 kW max.

Modul 2 (Spül-/ Trocknungseinheit)

Spül-/ Trocknungseinheit	46 kW (optional)
--------------------------	------------------

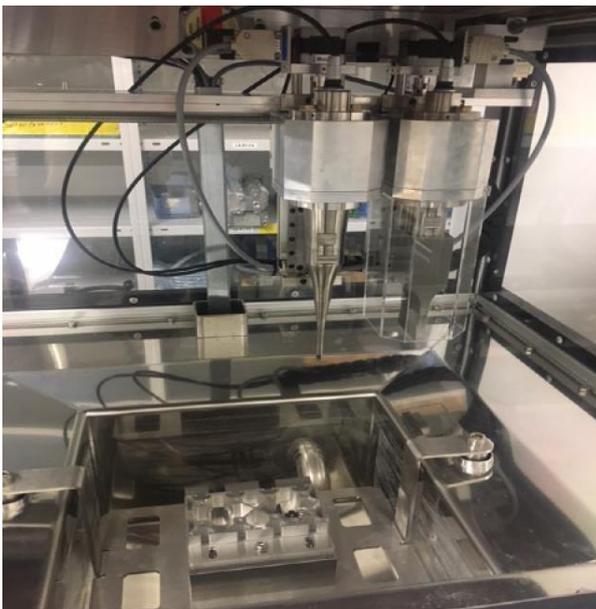


Abbildung 2-42: Erste Automatisierungsanlage.

2.4.2 Arbeitsweise der Anlage

Die Arbeitsweise ist so, dass nach der Positionierung des Bauteils im Wasserbad über einen „Teach-In Modus“ der Achsen die Bahn, die zum Entgraten abgefahren werden muss, eingelesen wird. Diese Bahn wird in der Steuerung gespeichert und im Automatikbetrieb „abgefahren“. Die Steuerung ist auch in Punkto Verfahren Geschwindigkeit frei programmierbar und somit der Aufgabenstellung anpassbar. Der Ultraschall kann so gesteuert werden, dass er nur an den Stellen des Bauteils aktiv ist, an dem auch entgratet werden muss. In den Bereichen in denen nicht entgratet wird, kann die Verfahren Geschwindigkeit deutlich erhöht werden, um die Produktivität der Anlage zu steigern.

2.4.3 Übersicht der Kundenteile mit Anforderung an die Entgratungsgüte

Da die meisten Kundenteile einer Geheimhaltung unterliegen, kann an dieser Stelle nur auf wenige Versuche eingegangen werden.

Ein Großteil der vorab aufgeführten Teile wurde nach den Vorversuchen mittels Handentgraten auch auf der 3 Achs Anlage bearbeitet. Hierbei konnten noch exaktere Werte ermittelt werden.

2.4.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse zum Entgraten industrieller Produkte

Auch an dieser Stelle sollte ein Praxisbeispiel zeigen, zu welchen Erfolgen die Entgratung auf der automatisch arbeitenden 3-Achs-Anlage führte.

Aufgabenstellung:

Eine Dosiertrommel aus Edelstahl, mittels der Granulat für Windeln dosiert wird, musste im Bereich der Löcher so fein entgratet werden, dass kein Partikel nachweislich im Granulat landete. Dabei war es sehr wichtig, dass der Bohrungsdurchmesser von 3,005 mm nicht verändert wurde.

Lösung:

Die Bearbeitungslösung bestand darin, die Trommel auf einen angetriebenen Dorn zu stecken und dann diese unter einer Messersonotrode mit einer geringen Drehzahl drehen zu lassen und dabei die Y - Achse über das Teil zu bewegen.

Die Sonotrode war rechteckig mit den Maßen 60 x 10 mm. Die Amplitude hierbei lag bei ca. 80 µm.

Auch hier wurde zunächst die Trommel im Ultraschallbecken gereinigt und dann erst zum Entgraten beschallt.

Versuchsanordnung:

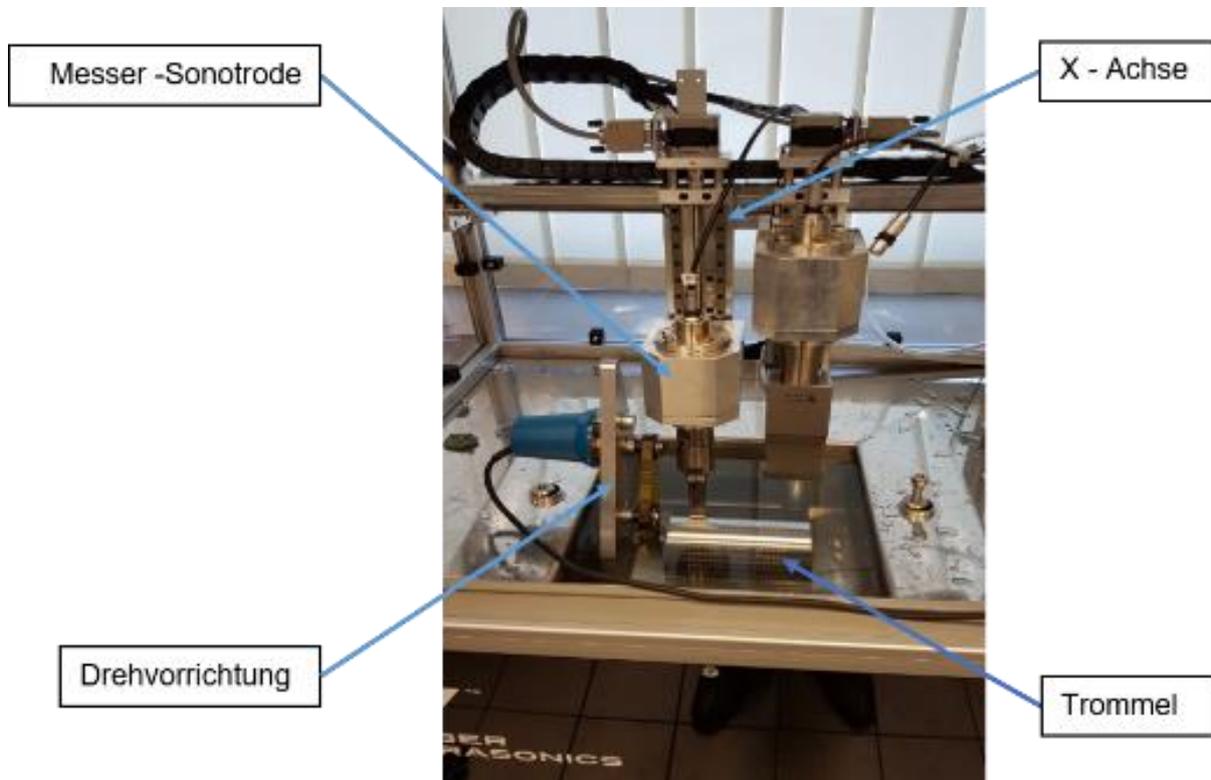


Abbildung 2-43: Erste Automatisierungsanlage.

Hierbei stellte sich heraus, dass ein Reinigen nach dem Entgraten ein wesentlicher Schritt ist, um ein Anhaften des Grates zu vermeiden.

Nach diesen Versuchen und den folgenden Überlegungen entstand die Planung einer ersten Robotergestützten Ultraschall-Entgrat-Anlage mit Reinigungseinheiten. Dieser Weg führt dann konsequent zu der Möglichkeit, den Energieverbrauch dieser Technologie mit dem Energieverbrauch der Hochdruckwasser-Entgratung zu vergleichen.

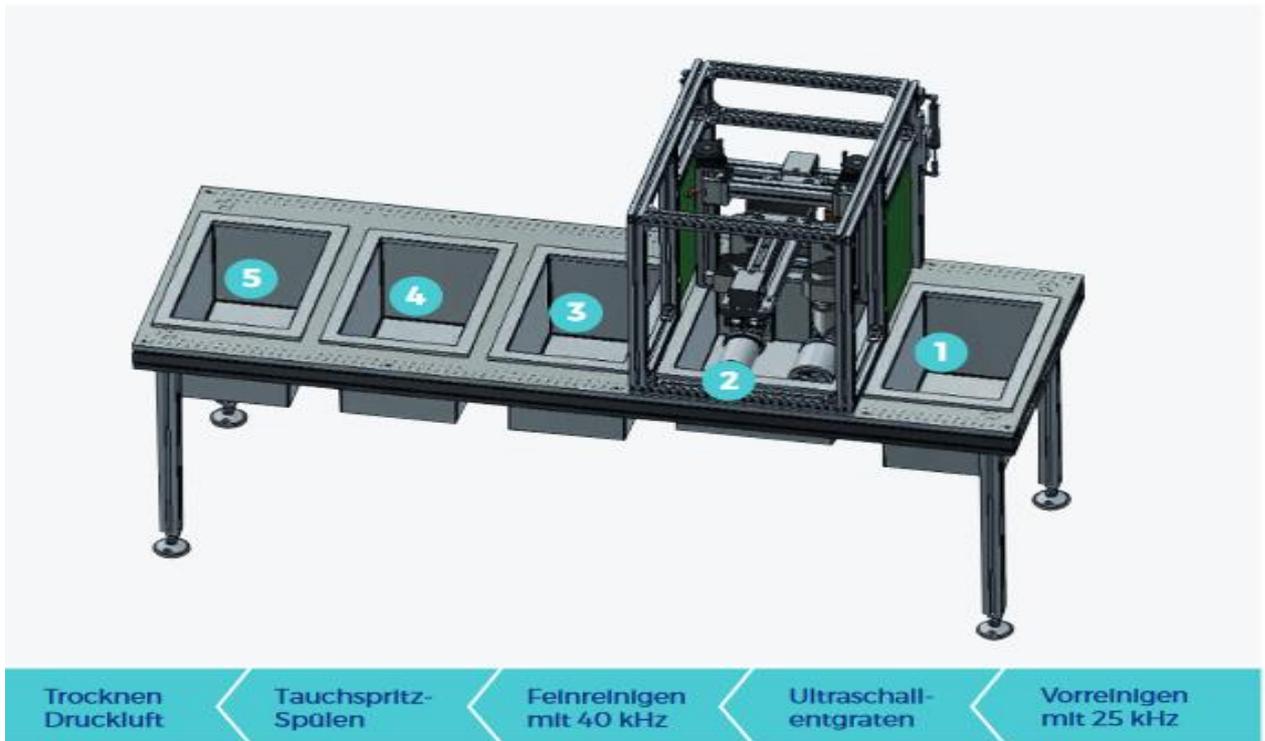


Abbildung 2-44: **Prinzipaufbau einer Entgrat- und Reinigungsstation**

2.5 Robotergestütztes Ultraschall-Entgratsystem

Ein Kennzeichen herkömmlicher Entgratverfahren wie beispielsweise Hochdruckwasserstrahlen, Gleitschleifen, chemisches und elektrochemisches Entgraten, Bürsten oder manuelles Entgraten ist, dass sie häufig hohe Energie- oder Werkzeugkosten verursachen. Im Rahmen des Förderprojekts haben die Projektpartner hier einen serienreifen Prototyp entwickelt und getestet, der eine wirksame, materialschonende, und energieeffiziente Alternative zu den oben beschriebenen Entgratverfahren bietet.

Ermöglicht wird diese Entgrat-Technologie durch die Kombination der Techniken Ultraschall-Reinigen und Ultraschall-Schweißen. Wie beim Ultraschallreinigen wird der physikalische Effekt der Kavitation genutzt. Eine Sonotrode schwingt in einem Flüssigkeitsbad mit hoher Amplitude wie beim Ultraschall-Schweißen und erzeugt an der Spitze eine Zone intensiver Kavitation.

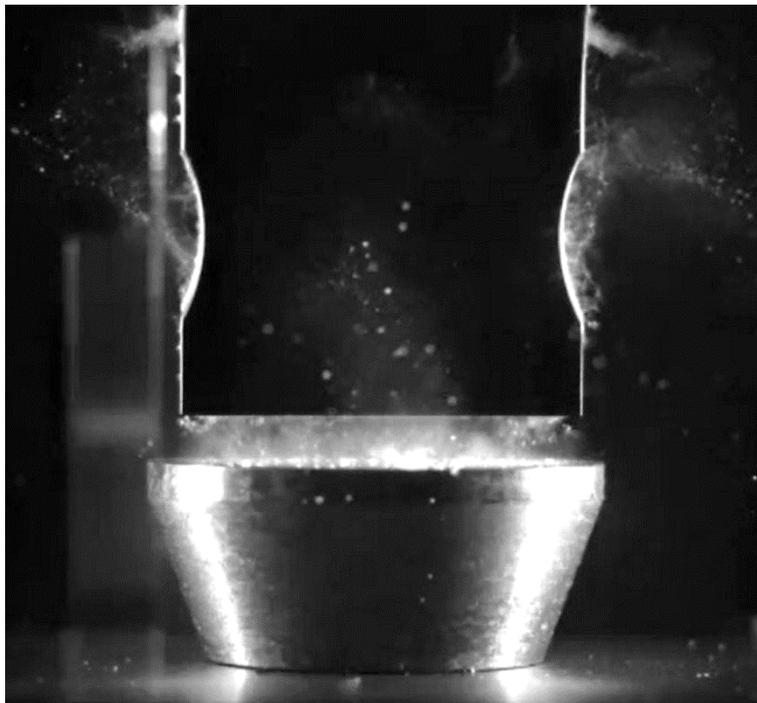


Abbildung 2-45: Messersonotrode der Weber Ultrasonics AG

Mit einer gerichteten Sonotrode, wie im Bild 2-45 einer Messersonotrode, wird durch das Implodieren der Kavitationsbläschen neben der sehr starken akustischen Strömung eine für die Entgratoperationen kurzfristig sehr hohe mechanische Kraft erzeugt. Befindet sich das Werkstück in dieser Zone, so wird der Grat kurzzeitig dieser sehr intensiven Kraft ausgesetzt und bricht ab.

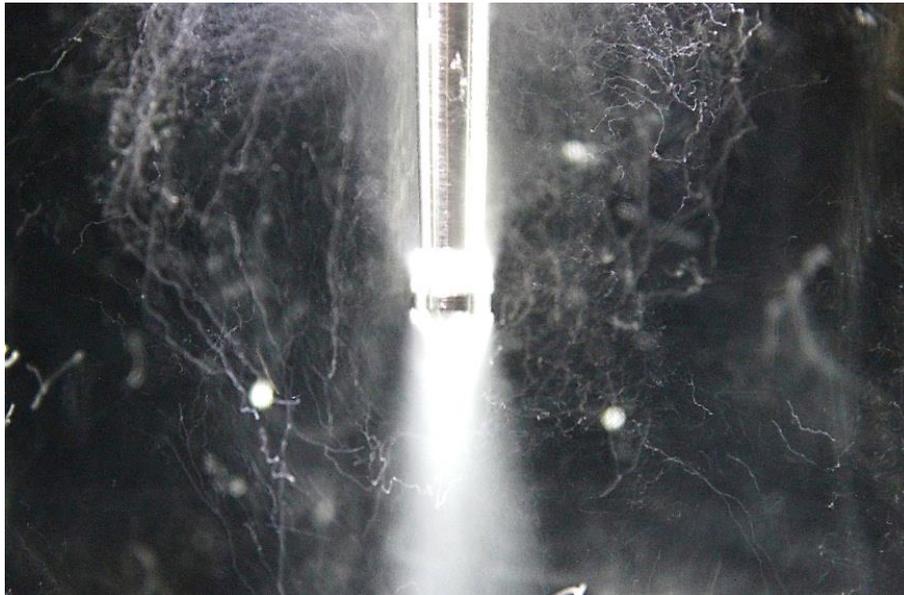


Abbildung 2-46: **Strömung im Sonotrodenumfeld**

Nach zahlreichen Tests und Versuchsreihen der Entwickler im Labor, entstand schließlich eine Stab- und eine Messersonotrode, die eine zuverlässige Gratentfernung sowohl punktuell wie auch flächig gewährleistet. Der vergleichsweise geringe Anschlusswert von nur 2 Kilowatt sorgt für eine ausgesprochen effiziente Energiebilanz. Im nächsten Schritt erfolgte mit Unterstützung der HEMO GmbH die Integration in eine Dreiachs-Versuchsanlage, um die weiteren Versuche, welche sich vor allem auf die Sonotrodenform und verschiedene Sonotrodenmaterialien bezogen, mit größerer Präzision durchführen zu können.

Als besonders geeignet zeigte sich das Verfahren bei der Entfernung von Flittergraten bei Stanz-, Aluminium- und Zinkdruckgussteilen sowie Bauteilen aus Kunststoffspritzguss.

Im Folgenden fertigte die LPW Reinigungssysteme GmbH den Prototypen einer ersten robotergestützten Ultraschall-Entgratanlage. (siehe Bild 2-47):

Mittels Roboterarm wird die jeweilige Entgratsonotrode in einem definierten Winkel an die zu entgratenden Bereiche des im Flüssigkeitsbad platzierten Werkstücks zielgerichtet herangeführt. Ein Sonotroden-Wechselsystem erlaubt die Kombination verschiedener Entgrat-Sonotroden. Gemessen wird bei jedem Wechsel zur Erzielung einer langen Sonotroden-Lebensdauer der verfahrensbedingte Verschleiß an der Sonotroden Spitze, wobei die Anfahrposition durch das Programm vollautomatisch ausgeglichen wird.

Das System ist so aufgebaut, dass es einerseits als reine Stand-Alone-Entgrateinheit zum Einsatz kommen kann, und andererseits als integrierter Bestandteil einer Ultraschall-Reihentauchanlage aufgebaut werden kann.



Abbildung 2-47: **Prototyp der Robotergestützten Ultraschall-Entgratanlage**

Der Warenträger mit einem oder mehreren Werkstücken wird an der Beladestation durch einen Roboter abgeholt und in das flüssigkeitsgefüllte Becken eingetaucht.

Mittels der Sonotrode beginnt dann der Entgrat-Vorgang unterhalb des Wasserspiegels.

Dieser Entgrat-Automat wurde im Rahmen der Deburring Expo 2019 in Karlsruhe dem Publikum vorgestellt.

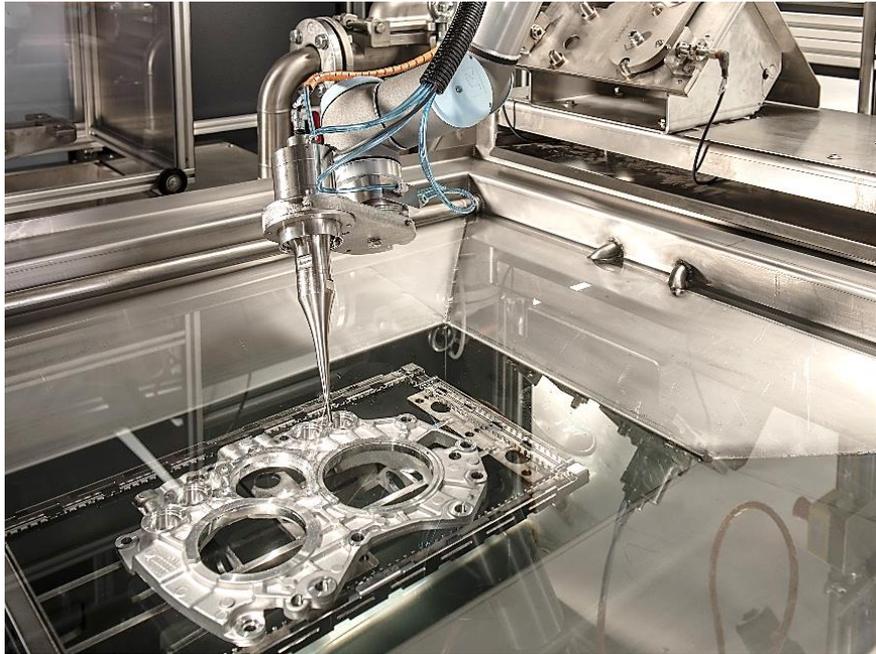


Abbildung 2-48: **Robotergeführte Stabsonotrode**

Im Bild ermöglicht eine Stabsonotrode das gezielte Entgraten von zum Beispiel einzelnen Bereichen des Werkstücks oder einzelner Bohrungen.

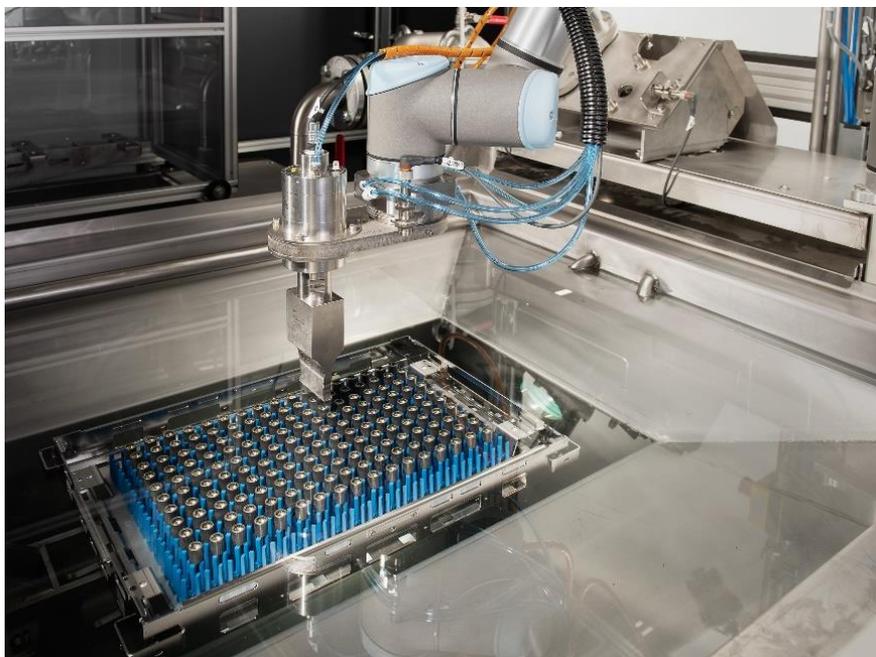


Abbildung 2-49: **Robotergeführte Messersonotrode**

Flächiges Entgraten von gefrästen Werkstücken oder von Setzware (wie im Bild 2-49) in einer Palette mittels Messersonotrode.

Die Anpassung der Eintauchtiefe erfolgt durch ein Hubsystem und erlaubt die Bearbeitung von Bauteilen bis zu einer Chargengröße von ca. 300 x 400 x 300 mm. Während der Entgratung wird die Flüssigkeit kontinuierlich (am Beckenboden oder über den Überlauf abgenommen und) im Kreislauf filtriert.

Nach der abgeschlossenen Entgratoperation kommen der Warenträger im Falle der Stand-Alone-Lösung auf eine Absetzposition und der nächste Warenträger ins Becken. Erst dann erfolgt die Umsetzung der fertigen Ware auf die Be-/Entladeposition. Bei der Integration in eine Ultraschall-Reihentauchanlage wird die Ware in die Folgeoperation überführt und gereinigt.

Dieser Prototyp steht im neuen Test- und Dienstleistungszentrum der LPW Reinigungssysteme GmbH in Riederich Interessenten und Kunden für Versuche oder auch für die Entgratung von Kleinserien zur Verfügung.

Equipment für die Versuche



Abbildung 2-50: **Unterschiedliche Sonotrode**



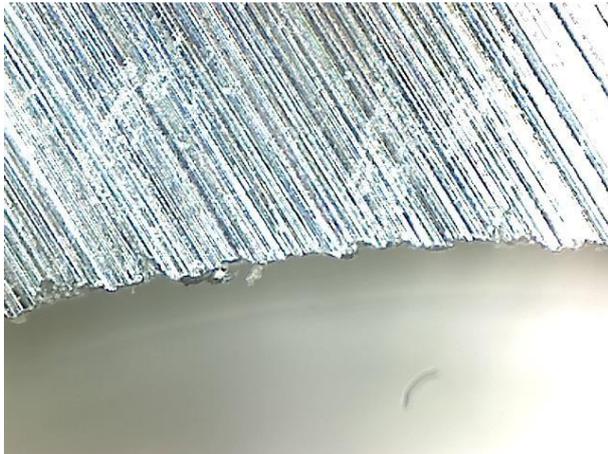
Verschiedene Sonotroden



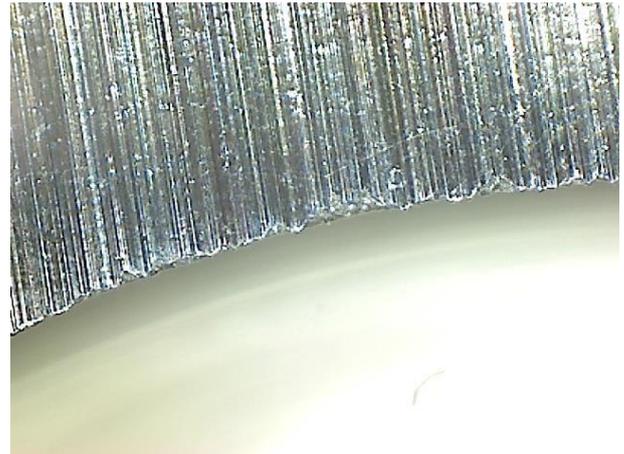
Generator: 1000 Watt / 18 kHz / 20 kHz

Die **Entgrat-Qualität** unter dem Aspekt der **Partikelvermeidung** ist vergleichbar mit den bisher in der Industrie genutzten Verfahren.

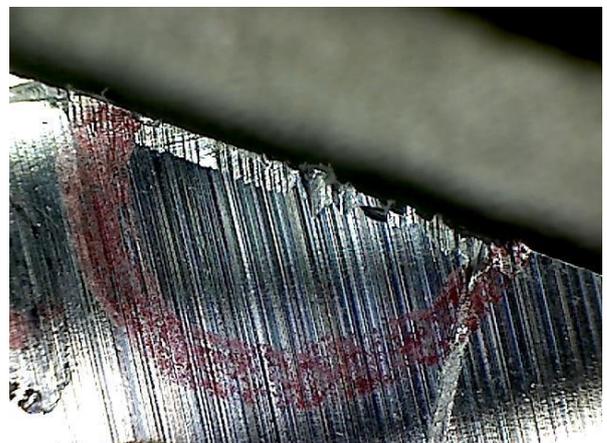
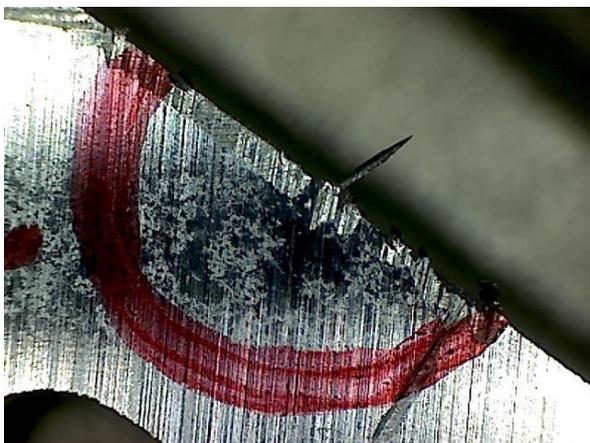
Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 20 kHz Messersonotrode
Einwirkdauer: ca. 4 sec / cm² (Werkstück wurde abgefahren)



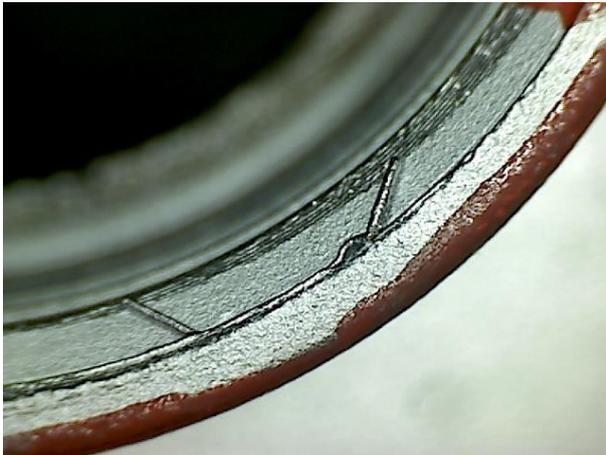
Aluminium: vorher



nachher



Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 20 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: ca. 8 sec

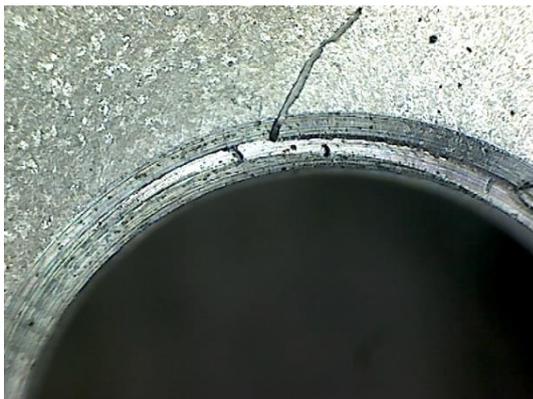


Zink-Druckguss (verchromt): vorher

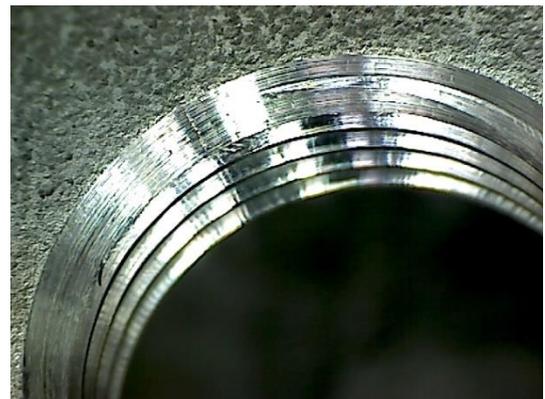


nachher

Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 20 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: ca. 3 sec



Zink - Druckguss: vorher



nachher

Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 20 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: > 5 sec



Edelstahl: vorher



nachher

Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 20 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: 15 sec / 60° C **Reinigungseffekt**



Stahlguss: **vorher**

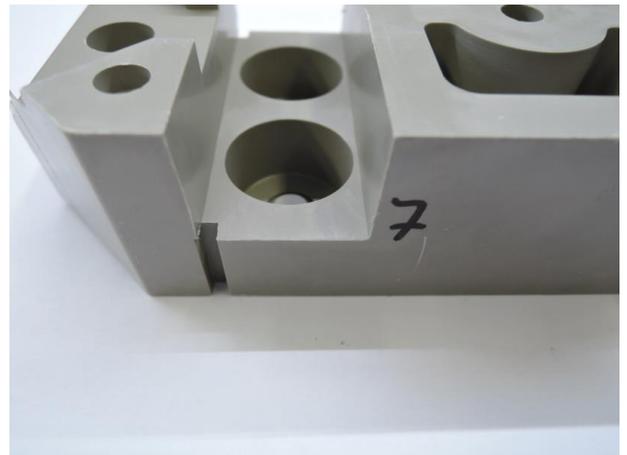


nachher

Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 18 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: 2 - 4 sec



PP Spritzguss: **vorher**



nachher

Medium: Wasser **Abstand:** 2-5 mm **Equipment:** 18 kHz Rundsonotrode
Einwirkdauer: 2 - 4 sec



PP Spritzguss: **vorher**



nachher

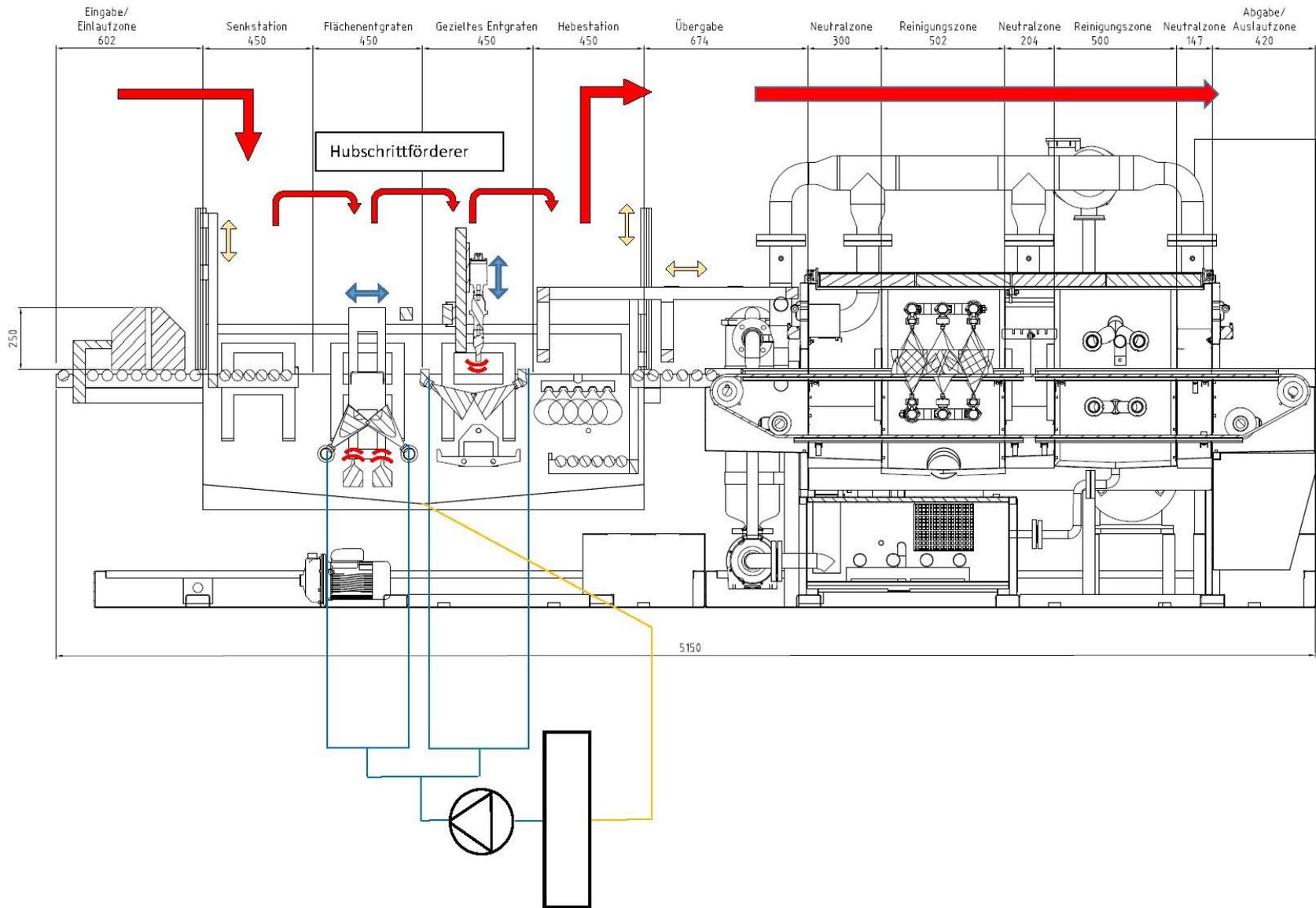


Abbildung 2-51: **Konstruktionszeichnung der Robotergestützten Ultraschall-Entgratanlage**

3. Ergebnisse der Ultraschall-Entgrat-Versuche

Während des Projektes wurden neben den beispielhaft beschriebenen Fällen eine Vielzahl von Entgratungsversuchen mit Ultraschallgeräten durchgeführt, die Ergebnisse analysiert und dokumentiert.

Zusammenfassend haben wir Aussagen über unterschiedliche Materialien, die entgratet wurden, über besondere Werkstück-Geometrien und über die vorhandenen Sonotroden im Folgenden dargestellt.

3.1 Ergebnisse für unterschiedliche Materialien

Aus einer Vielzahl von Entgratungsversuchen mit Ultraschall-Technik bei unterschiedlichen Materialien kann zusammenfassend geschrieben werden:

- a. Bei **Aluminiumteilen**, speziell Aluminiumdruckguss, können alle Bearbeitungs- und Spritzgussgrate mittels der US-Entgratung entfernen werden.
- b. Diese Aussage trifft auch zu für alle Teile aus **Aluminiumlegierungen** zu.
- c. Gleiches gilt uneingeschränkt auch für **alle Messingteile**.
- d. Die Versuche an **thermoplastischem PVC** zeigten allerdings, dass nur kleine Teile der Grate abgetrennt werden, doch die Mehrzahl der großen und signifikanten Grate zurückbleibt. Die unzureichende Entgratwirkung ist hier durch den flexiblen Werkstoff zu erklären. Beim Beaufschlagen der Grate durch den Ultraschall werden diese auf Grund ihrer Flexibilität nur gebogen und brechen nicht wie die festen und nicht biegsamen Metallgrate ab. Nach der Ultraschallbeaufschlagung kehren die Grate in ihren Ursprungszustand zurück.
- e. Es besteht allerdings nach jetzigem Kenntnisstand die Aussicht, dass die meist wesentlich spröderen **duroplastischen Kunststoffe** oder auch **faserverstärkten Kunststoffe** mittels Ultraschalltechnik wesentlich besser entgratet werden können.
- f. **Spröde Metalle** und **Kunststoffe** lassen sich uneingeschränkt mit Ultraschall entgraten.
- g. **Zähe Metalle** (wie Stähle/ Edelmetalle/ verchromte Bauteile/ etc.) erlauben maximal eine Flittergratbeseitigung.

3.2 Ergebnisse zu besonderen Werkstück-Geometrien

Folgende Erkenntnisse bezüglich einer Einteilung möglicher Anforderungen an die Werkstücke, die mit Ultraschall-Technik entgratet werden, resultieren aus den bisherigen Versuchen:

- a. Durch **2D-Fräsbearbeitung** verursachte Grate können durch die bisher verwendeten Sonotroden (Stab- und Balkensonotroden) uneingeschränkt erreicht und entgratet werden.
- b. Durch **3D-Fräsbearbeitung** verursachte Grate können durch die heute vorhandenen Stabsonotroden nur eingeschränkt erreicht und entgratet werden. Hier sind die Prozesse aktuell noch durch die Sonotrodenbaugröße und -bauform limitiert.
- c. Alle **Bohrungen** sind im Bereich der Ein-/ Austrittsöffnungen ohne Einschränkung mit Balken- und Stabsonotroden zu entgraten.
- d. **Innengrate** oder **Grate im Bereich von Verschneidungen** unterliegen der Bearbeitungsrichtung. Die Reihenfolge der Entgratung muss der Reihenfolge der Bohrungen entsprechen.
- e. Schwierig wird es bei Bauteilen, die eine sehr tiefe Bohrung haben (Motorblöcke), da hierzu sehr lange Sonotroden erforderlich sind. Dabei kann es zu längerer Einwirkdauer kommen und es kann möglich sein, dass ein Restgrat nach der Bearbeitung noch vorhanden ist, der zwar im Bereich der Gratwurzel liegt und sich nicht mehr löst, aber dennoch vorhanden ist.

3.3 Einschränkungen bezüglich der Sonotroden

Die **Entwicklung** der **Sonotroden** selbst für das Ultraschall-Entgraten, also die Herstellung von Sonotroden, die für die Entgratung verwendet werden können mit guter Standzeit steht unerwartet noch in den Anfängen und es bleibt als bestehende Herausforderung, die Widerstandsfähigkeit gegen Kavitationsschäden an den Sonotroden selbst zu erhöhen.

Hier stehen Versuche mit speziell **beschichteten Sonotroden** an. Alternativ dazu werden Sonotroden entwickelt, die einen **austauschbaren Wechselkopf** inklusive einer Verschleißerkennung aufweisen um damit die Wirtschaftlichkeit des Ultraschall-Entgratens weiter zu verbessern.

Ein weiteres Entwicklungsziel betrifft Länge und Durchmesser der zu verwendenden **Sonotroden**. Um von einer möglichen Vorgabe der Bearbeitungsreihenfolge für die Hersteller von z.B. Zylinderköpfen unabhängig zu werden, werden zurzeit bei der Weber Ultrasonics AG Stabsonotroden mit Längen von > 400 mm und Durchmessern < 6 bis 8 mm entwickelt. Außerdem ist geplant, speziell für diese „**Bohrungsverschneidung**“ eine Sonotrode zu entwickeln, die eine Querschwingung anregt, sodass die oben erwähnte Notwendigkeit der Vorgabe einer Bearbeitungsrichtung nicht mehr gegeben sein wird.

Mit Hilfe des oben beschriebenen Autofrettage-Verfahrens gegen Kavitationserosion werden höchst widerstandsfähige Sonotroden entwickelt werden, die dazu allerdings axial durchbohrt werden müssen.

Für den wirtschaftliche Einsatz der Ultraschall-Entgratung werden unterschiedliche, spezifische Sonotroden noch zu entwickeln sein. Diesen Entwicklungsprozess hat die Weber Ultrasonics AG mit großem Engagement begonnen und wird schon bald Entgratungs-Sonotroden anbieten und damit weiterführende Versuche durchführen.

So stellt sich die Situation der Ultraschall-Entgrat-Technologie zurzeit dar.

4. Resultate der Projektarbeit

4.1 Entgrat-Qualität

Mit Unterstützung der Firma Benseler Entgratungen GmbH & Co. KG² in Marbach am Neckar, einem Entgratungs-Dienstleister, konnten an spezifizierten Bauteilen vergleichende Versuche durchgeführt werden.

Dies war wichtig, weil für die Bewertung der Entgratqualität und insbesondere für die Messung der Prozessenergie natürlich nicht ein Bauteil erfasst werden konnte, sondern es wurden Serien-Entgratungen durchgeführt mit einer Palette gleicher Bauteile und über eine Anzahl von ca. 100 Prozesstakten die Daten gemessen und dann gemittelt.

Bei dem Bauteil handelte es sich um Getriebedeckel aus Aluminium-Druckguss, die an der Dichtfläche mechanisch bearbeitet waren; bei dem zu entfernenden Grat handelt es sich also um einen klassischen Gratrückstand aus der zerspanenden Oberflächenbearbeitung.

Bauteilbeschreibung:

Material: Aluminium-Druckguss

Abmessungen: ca. 58 mm x 47 mm x 17 mm

Entgrat-Aufgabe: Entgratung/ Beseitigung lösbarer Bearbeitungsrückstände bis auf die Gratwurzel

Die Beurteilung der **Entgrat-Qualität** mit den Verfahren Hochdruckwasserstrahl-Entgraten und mit dem Ultraschall-Entgraten erfolgt visuell mittels eines **Keyence Hochleistungsmikroskops**.

4.2 Prozessenergie

Für die Aussagen zum Energievergleich zwischen der Hochdruckwasserstrahl (HDWS) - Entgratung und der Ultraschall (US) - Entgratung werden wir etwas weiter ausholen.

Bei den Vergleichsversuchen gibt es immer ein bestimmtes Versuchsdesign. Für die Qualitätsaussage arbeiten wir mit einem Leichtmetall (Alu), welches sehr spröde ist und stellen den Vergleich mit Flittergraten nach einem Fräsprozess auf. Diese Grate sind sehr dünn

² Das Unternehmen betreibt Beschichtung und Entgratung seit 1961 mit 1.050 Mitarbeitern an 12 Standorten in Europa und Mexiko.

und weisen in aller Regel keine ausgeprägte Gratwurzel auf. Beim Hochdruck-Entgraten kann mit geringen Drücken gearbeitet werden, was wir in der Energiebilanz berücksichtigt haben.

Im Ergebnis zeigen diese Versuche, dass wir in der **gleichen Prozesszeit qualitativ gleiche Ergebnisse** erzielen. Diese Aussagen gelten für alle industriellen Bauteile aus Aluminiumguss und deren Legierungen sowie für Werkstücke aus Messing, Bronze oder Zinkdruckguss.

Methoden	Hochdruckwasserstrahl-Entgraten	Ultraschall-Entgraten
Zeit sec / Grat	5	5
Energieeinsatz	55 kWh Wasserpumpe 8 kWh Vordruckpumpe 25 kWh Kühlwasserpumpe	0,7 kWh Generator
Relation	100%	0,8%

Einsparung von 99,2 % der erforderlichen Betriebsenergie

Bei den energetischen Vergleichsbetrachtungen wurden alleine die dem jeweiligen Entgrat-Verfahren unmittelbar zugehörigen Verbräuche in der Messung berücksichtigt. Handlings- oder Filtrationsprozesse finden keine Beachtung, da diese je nach Anwendungsfall variieren können.

Beim **Hochdruckwasserstrahl-Entgraten** ist es somit die spezifische Leistung der Hochdruckpumpe sowie die direkt zugehörige systembedingte Kühlleistung für die Temperierung der eingesetzten Medien, die den Energieverbrauch bestimmen.

Bei der **Ultraschall-Entgratung** ist es nur die Leistung der eingesetzten Generator-Sonotroden-Kombination.

Die Systeme für das Handling / Warenbewegung (Roboter, Greifer, Anfahrinheiten, Transportbänder, etc.) sowie alle Nebenaggregate blieben dabei unberücksichtigt.

4.3 Wirtschaftlichkeit

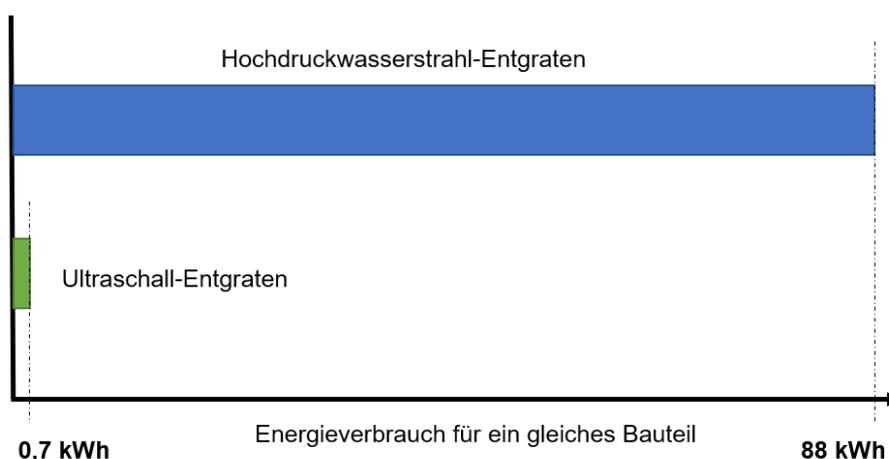
Bei Gewinden, Gewindebohrungen oder vergleichbaren Versuchen mit spröden Leichtmetallen kann die Hochdruckwasserstrahl-Entgratung bei der gezielten Entgratung mit dem Druck bis auf ca. 400 - 600 bar regeln, was sich zwar auf den Energieverbrauch und die Investitionskosten negativ auswirkt, aber die Entgratzeit deutlich senkt.

US-Entgraten kann hier nicht nachsteuern und benötigt dadurch eine entsprechend längere Zeit. Das kann im Einzelfall das 5 bis 10-fache des Zeitbedarfs für die US-Entgrat-Technologie bedeuten bei reinem Wasser und den heute vorhandenen Sonotroden.

Beim Flächenentgraten ist das Versuchsdesign ähnlich. Während die HDW-Entgratung mit rotierenden Wasserfräsern große Flächen gleichzeitig entgraten kann, muss man bei der US-Entgratung mit der Balkensonotrode die Fläche langsam abfahren, was wiederum sehr viel Zeit kosten kann.

Klare Grenzen haben wir aktuell bei zähen Materialien wie z.B. bei Stählen und bestimmten Kunststoffen. Hier kommt die HDW-Entgratung durch die Möglichkeit den Druck nach oben skalieren zu können ebenfalls zu einem klaren Vorteil. Bei Erhöhung der Leistung der Sonotrode haben wir einen deutlich höheren Verschleiß. Durch den Einsatz von Flüssigkeiten mit niedrigerer Temperatur und der Anpassung der Dichte der Flüssigkeiten kann man da zwar nachsteuern und helfen, hat jedoch auf die Betriebskosten entsprechende Auswirkungen.

Ein vergleichbares Entgrat-Ergebnis wird erzielt bei gleichen industriellen Bauteilen mit **0,7 kWh für die Ultraschall-Entgratung** und mit **88 kWh für das Hochdruck-Wasserstrahl-Entgratung**.



Vergleich der Investitionskosten

Bei einem direkten Vergleich der Hochdruckwasserstrahl-Entgratung HDW und der US-Entgratung ist in erster Linie die eigentliche Entgrateinheit zu vergleichen und nicht die komplette Anlage.

Für die **US-Entgrateinheit**, bestehend aus Generator, Verbindungskabel und Sonotrode, ist ein Invest erforderlich von **6 – 10 T€**

Die HDW Einheit besteht aus mehreren direkt zugehörigen Komponenten:

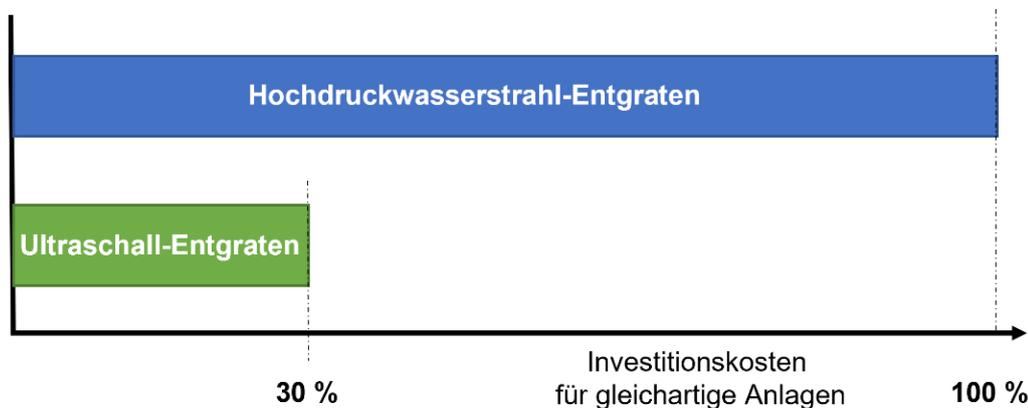
Hochdruckpumpe (je nach Ausführung)	30 - 45 T€
Verfahrenstechnik (z.B. Vorpumpe, Filter, Ventile)	8 - 12 T€
Kühlung für Kreislaufmedium (max 50°C)	5 - 10 T€

Hinzu kommen die Mehrpreise bei einer HDW-Anwendung für die **spritzwassergeschützte Einhausung**, **elektrische Ausführung** und **Absicherung** (Schaltschrank) durch die höheren Anschlusswerte **3 - 5 T€** sowie die erforderliche **Wasser-Schwadenabsaugung** **5 - 10 T€**.

Wird das Entgratwerkzeug roboterunterstützt geführt, kommen Kosten für spritzwassergeschützten Roboter hinzu. Dieser Roboter muss für hohe Drücke ausgelegt sein **30 - 45 T€**.

Invest für eine vergleichbare **Hochdruckwasserstrahl-Entgrateinheit** **85 – 136 T€**

Daraus ergibt sich eine **Investitionskosteneinsparungen** in Höhe von **70 %**



Zu berücksichtigen ist die anlagentechnisch harmonische Anbindung von **Reinigungseinheiten** im unmittelbaren Anschluss an die Entgratungsstationen in einem kontinuierlichen Prozess. Auch das spart viel Energie und reduziert den Anlagenbestand und -aufwand.

Für die Gesamtwirtschaftlichkeit gilt:

Für alle bearbeiteten Industrie-Bauteile aus Aluminium, Alu-Legierungen, Messing, Bronze oder Zink stellt das automatisierte Ultraschall-Entgratverfahren eine sehr wirtschaftliche und ökologische Alternative zum Hochdruckwasserstrahl-Entgratverfahren dar, was im vorliegenden Projekt zu untersuchen war.

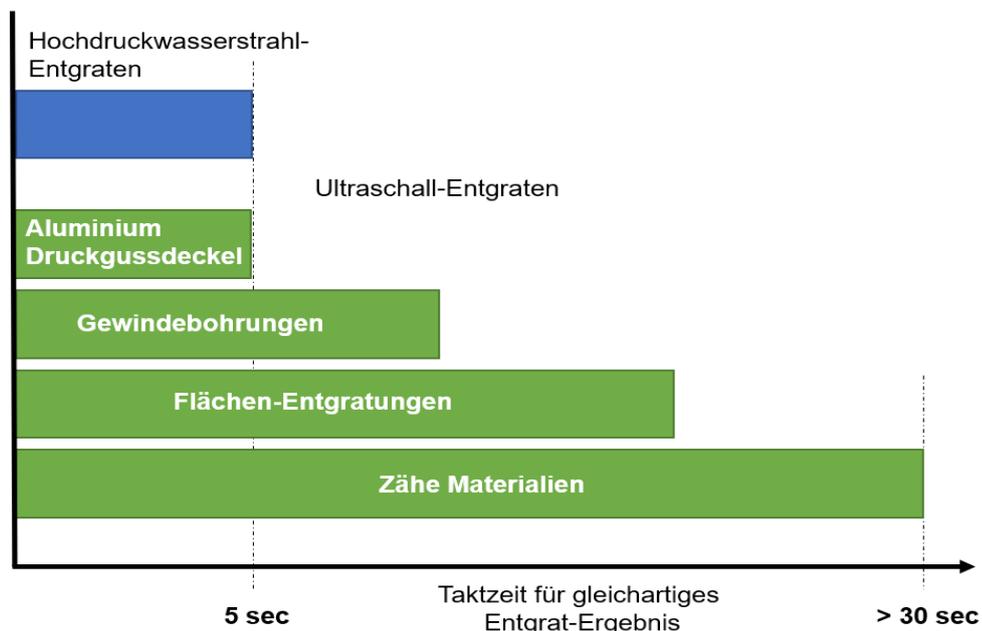
70 % Einsparung bei der Beschaffung der Anlage

99,2 % Einsparung der Betriebsenergie

Gleiche Bearbeitungszeit pro Werkstück

und gleiche Entgratqualität

Leider benötigt die Ultraschall-Entgrat-Technologie bei einigen Materialien heute noch mit den aktuellen Sonotroden **mehr Zeit für das gleiche Entgrat-Ergebnis**. Bei den unterschiedlichen Entgrat-Fällen ergibt sich das folgende Bild:



4.4 Fazit

Das automatisierte Entgraten von Serienwerkstücken mittels Ultraschall ist mit einer industriellen Anlage möglich. Dabei kann bis zu 99,2 % der Prozessenergie mit einer Anlage eingespart werden, wenn die neu entwickelte und erprobte, automatisierte Ultraschall-Entgratungsanlage der LPW Reinigungssysteme GmbH eine Hochdruckwasserstrahl-Entgratungsanlage ersetzt. Zusätzlich werden dabei 70 % der Investitionskosten einer HDWS-Anlage eingespart.

Viele andere industrielle Entgrat-Aufgaben werden ebenfalls mit Ultraschall bearbeitet werden können, wenn die Weber Ultrasonics AG weitere entgratspezifische Sonotroden entwickeln und anbieten wird. Denn Sonotroden für die Entgratung benötigen eine spezielle Beschichtung für höher Standzeiten und austauschbare Wechselköpfe inklusive Verschleißerkennung.

Ein weiteres Entwicklungsziel betrifft Länge und Durchmesser der zu verwendenden **Sonotroden**. Derzeit werden bei der Weber Ultrasonics AG Stabsonotroden mit Längen von > 400 mm und Durchmessern < 6 bis 8 mm entwickelt. Außerdem ist geplant, speziell für diese „**Bohrungsverschneidung**“ Sonotroden zu entwickeln, die eine Querschwingung anregt, um besondere Grate zu erreichen.

Mit Hilfe des Autofrettage-Verfahrens gegen Kavitationserosion werden aktuell höchst widerstandsfähige Sonotroden erforscht und entwickelt, die dazu allerdings axial durchbohrt werden müssen.

Eine weiterführende Entwicklung sieht vor, durch diese axiale Bohrung in der Sonotrode Wasser zu pumpen. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass dieses Wasser durch den Ultraschall eine noch höhere Geschwindigkeit erfährt und somit die Kraft, die auf den Grat wirkt, erhöht werden könnte.

Die Labor- und Demoanlage einer Roboterzelle für die Entgratung größerer Bauteile durch das Unternehmen LPW Reinigungssysteme GmbH wird den Einsatz und die Entwicklung der Ultraschall-Entgratung permanent beschleunigen.

5. Öko-Bilanz und Empfehlung

Für einen Großteil der Entgrat-Aufgaben in der Industrie sieht die Öko-Bilanz schon nach diesen ersten Versuchen mit einer ersten, automatisierten Ultraschall-Entgratanlage sehr positiv aus.

Alle Arten von Gussbauteilen, die z. B. in der Automobilindustrie noch lange bearbeitet werden, können entgratet werden mit deutlich **weniger Prozessenergie (um 99,2 %)**.

So können schon heute alle Firmen, die Lohn-Entgratung anbieten, Anlagen wie die von LPW Reinigungssysteme GmbH im Rahmen des vorliegenden F&E-Projektes entwickelte automatisierte US-Entgratanlage für einen Teil der Bauteile einsetzen und dadurch zur dringend notwendigen Energiereduzierung beitragen. Sie haben dabei auch noch den Zusatznutzen, dass sie weniger Mittel einsetzen müssen, um solche Anlagen anzuschaffen.

In dem Maße, wie die Weber Ultrasonics AG weitere spezifische Sonotroden für den Einsatz in Entgratanlagen entwickelt, werden mehr und mehr Industrieteile mit diesem energiesparenden Verfahren entgratet werden können.

Damit ist die Öko-Bilanz des Ultraschall-Entgratverfahrens deutlich positiv, denn das neue Verfahren spart 99,2 % Energie gegenüber den heute üblichen Verfahren.

Eine systematische Analyse der Umweltwirkung und der Energiebilanz über den gesamten Lebenszyklus (LCA) kann hier nicht durchgeführt werden, weil die Herstellung der beiden Aggregate für das HDWS-Entgraten und das US-Entgraten nicht untersucht wurden, sondern nur die Energiebilanz während des Einsatzes verglichen wurden.

Empfehlung:

Das Projektteam empfiehlt allen Betreibern von Entgratungsanlagen den Einsatz energiesparender Ultraschall-Entgratungsanlagen zu prüfen.

Unterschriften der Projektbeteiligten:

Zuwendungsempfänger

Karlsbad, den _____

COO Nathalie Etienne, Weber Ultrasonics AG

Karlsbad, den _____

CIO Markus Weber, Weber Ultrasonics AG

Kooperationspartner

Riederich, den _____

Dipl.-Ing. Gerhard Koblenzer
LPW Reinigungssysteme GmbH

Ötisheim, den _____

Dipl.-Ing. Volker Hösel, HEMO GmbH

Stuttgart, den _____

Dr.-Ing. Markus Rochowicz
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung

Literaturverzeichnis

Donner 2007

Susanne Donner (2007): Was moderner Ultraschall über das Ungeborene verrät. Hg. v. Bild der Wissenschaft. Online verfügbar unter <http://www.wissenschaft.de>, zuletzt aktualisiert am 11.12.2007, zuletzt geprüft am 21.10.2014.

Fuchs 2015

Fuchs, Johann (2015): Gleitschleifen. Online verfügbar unter <https://www.fuchs-maschinenbau.de> zuletzt geprüft am 17.02.2014.

Gross 1985

Gross, A. (1985): Untersuchung des Schwingverhaltens von Sonotroden für die Ultraschallbearbeitung. Ermittlung der Bearbeitbarkeit von infiltriertem Siliciumcarbid. Diplomarbeit. Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Reutlingen, Reutlingen. Maschinenbau.

Hannig u.a. 2012

Sophia Hannig, Christian Brecher, Christian Wenzel (2012): Schnelle Auslegungsmethode für ultraschallunterstützte Zerspanung. In: Maschinenmarkt, das Industriemagazin 2012 (38), S. 24–28, zuletzt geprüft am 27.10.2014.

Hilge 2007

Hilge, Thomas (2007): Gründlich reinigen mit Ultraschall. Ein Reinigungsgerät für viele Zwecke.

Jung 2013

Jung, Christian (2013): Ultraschall-unterstützte wässrige Reinigung von oberflächenveredelten medizinischen Implantaten. Nasschemische Reinigung - Optimal beherrschen! Dresden, 24.01.2013.

Kaiser 2014

Kaiser, René (2014): Trockeneisreinigung/Trockeneisstrahlen. Unter Mitarbeit von René Kaiser. Leipzig. Online verfügbar unter <http://www.sandstrahlen-leipzig.com/trockeneisreinigung-trockeneisstrahlen.htm>, zuletzt aktualisiert am 11.06.2014, zuletzt geprüft am 21.10.2014.

Lehfeldt 1973

Lehfeldt, W. (1973): Ultraschall. Kurz und bündig: physikalische Grundlagen und Anwendungen. Würzburg: Vogel-Verlag.

Mücklich/Trinh 2010

Prof. Dr. F. Mücklich, Dipl.-Ing. K. Trinh (2010): Einführung in die Funktionswerkstoffe. Kapitel 7: Magnetostriktion. Universität des Saarlandes. Universität des Saarlandes, 10.2010.

Rappen 2014

Marc Rappen (2014): REM-Auswertung. Marc Rappen. Online verfügbar unter <http://www.sachverstaendiger-motoren.de/labor/rem-auswertung>.

Schäfer 1975

Schäfer, Friedrich (1975): Entgraten. Theorie, Verfahren, Anlagen. Mainz: Krausskopf-Verlag (Bd. 14).

Schlatter 1986

Schlatter, Manfred (1986): Entgraten durch Hochdruckwasserstrahlen. Unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. H.-J. Warnecke und Prof. Dr.-Ing. W. König. Berlin: Springer-Verlag (91).

Schulz 2013

Schulz, Doris (2013): Grate effizient und prozesssicher entfernen. Entgraten und Reinigung - Voraussetzung für Qualitäts-Bauteile. Hg. v. Doris Schulz. Online verfügbar unter http://www.mav-online.de/image/image_gallery?img_id=38576842, zuletzt aktualisiert am 10.09.2013, zuletzt geprüft am 21.10.2014.

Sorge 2002

Sorge, Georg (2002): Faszination Ultraschall. 1. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner.

Stadler 2013a

Stadler, Konrad (2013a): Entgraten. Haan. Online verfügbar unter <http://www.walther-trowal.de/de/bearbeitungsarten/entgraten/>, zuletzt geprüft am 17.02.2015.

Stadler 2013b

Stadler, Konrad (2013b): Kunststoff Schleifkörper: Haan. Online verfügbar unter <http://www.walther-trowal.de/de/produkte/verfahrensmittel/kunststoff-schleifkoerper/kunststoff-schleifkoerper-detail/>, zuletzt geprüft am 17.02.2015.

Steck 2009

Steck, Ralf (2009): Sonotroden-Optimierung mit Solidworks-Simulation. In: Schweizer Maschinenmarkt (09.2009), S. 84–87, zuletzt geprüft am 22.10.2014.

Thilow 2012

Thilow, Alfred (2012): Entgratetechnik. Entwicklungsstand und Problemlösungen. Unter Mitarbeit von Klaus Dipl. Ing Berger, Helmut Dr. Prüller, Rainer Maier, Klaus Dr.-Ing. Przyklenk, Friedrich Prof. Dr.-Ing. Schäfer und Siegfried Pießlinger-Schweiger. 4. Auflage. Renningen: expert (392).

Weber 2011

Dieter Weber (2011): Weber Ultrasonics - USA - Weld & Cut Produkte Komponenten Sonotroden. Online verfügbar unter http://www.weber-ultrasonics.de/wu_usa_de_wc_p-Sonotroden.php, zuletzt aktualisiert am 03.07.2013, zuletzt geprüft am 22.10.2014.