



Dipl.-Ing. Martin Mortsch

Entzundern und Entgraten von hohlen Getriebewellen

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

durchgeführt am

Institut für Fertigungstechnik der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Schmid

Zweitgutachter

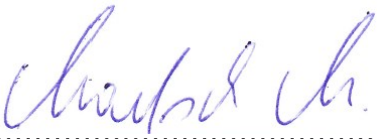
Univ.-Prof. Dr. Franc Čuš

Graz, März 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Graz, am 10.03.2017.....
(Datum)

.....
(Unterschrift)

Vorwort

Diese Arbeit, die für die Sparte Daimler Trucks Stuttgart erstellt wurde, entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Universitätsassistent an der Technischen Universität Graz. Ich bedanke mich besonders bei Herr Univ.-Doz. Dr.techn. Alois Schmid von der Firma Daimler AG, der für mich dieses Thema ausgewählt hat, mich bei dieser Arbeit betreute und mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Gatzionis, Herrn Klein und Herrn Candia, die mich während ihrer Tätigkeit bei der Firma Daimler AG bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof.i.R. Dr.techn. Heinrich Hochleitner für die Unterstützung während der ersten Projektjahre. Für die anschließende Förderung bis hin zum erfolgreichen Projektabschluss, bedanke ich mich beim Vorstand des Instituts für Fertigungstechnik, Herrn Univ.-Prof. Dr.techn. Franz Haas. Beim Team der Zentralwerkstätte des Instituts für Fertigungstechnik bedanke ich mich für die Herstellung der Prototypen, wie auch für die Unterstützung bei der Durchführung der Bearbeitungsversuche.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Pixner, Herrn Gruber und Herrn Hütter, die im Rahmen von Bachelorprojekten Teilaufgaben innerhalb dieses Forschungsprojekts übernommen haben. Für die Hilfe bei der Durchführung von metallurgischen Untersuchungen bedanke ich mich bei Herrn Gernot Stöfan und Herrn Dipl.-Ing. Daniel Prodingner vom Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz.

Mein Dank gilt außerdem dem Team der Firma GFM, Steyr, mit denen ich im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Schmiedeversuche durchgeführt habe. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Großbichler und Herrn Huber, die für mich die Radialschmiedeversuche durchgeführt haben und mich bei der Prozessoptimierung der Umformvorgänge fachlich unterstützten. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Hofer bedanken. Er ermöglichte die seriennahe Versuche bei der Firma GFM und hat diese wesentlich mit vorangetrieben.

Danken möchte ich auch Herrn Paul von der Firma Benseler, Marbach, für die Ermöglichung und Durchführung der thermischen Entgratversuche. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Ulrich und Herrn Dr. Mainka von der Firma Hef-Durferrit, Mannheim, in deren Technikum Versuche mit dem Koleneverfahren durchgeführt wurden. Zudem gilt mein Dank den Mitarbeitern der Kanzel Steinbruch Dennig GmbH, die mir die Sprengversuche ermöglichten.

Für das Richten der Erprobungsteile bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Firma Dunkes, Kirchheim/Teck. Nicht zuletzt möchte ich mich bei den Betriebsangehörigen der Firma Hoffmann, Pfungstadt, bedanken, die das Auswuchten der Getriebewellen durchgeführt haben.

Graz, 10.03.2017

Dipl.-Ing. Martin Mortsch

Kurzfassung

Unter Leichtbauaspekten und aus funktionalen Gründen sollen zukünftig in Nutzfahrzeuggetrieben Hohlwellen Verwendung finden. Dabei ist eine zentrale Anforderung, dass der schwer zugängliche und öldurchflutete Hohlwelleninnenraum eine vollständig zunder- und gratfreie Oberfläche aufweist. Aus Kostengründen sollten die Halbzeuge aus einem Schleudergussrohr hergestellt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden ausgewählte Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die gestellten Aufgabenstellungen untersucht und bewertet. Zudem sind hier Bearbeitungsversuche dokumentiert, bei denen neuartige Werkzeuge für das Entzundern entwickelt und erprobt worden sind sowie die spezifischen Anwendungsgrenzen der ausgewählten Fertigungstechnologien. Zudem wird zur produktionsbegleitenden Qualitätssicherung ein neuartiges Verfahren vorgestellt, welches eine vollautomatische Oberflächenbeurteilung bzw. Zundererkennung ermöglicht. Da im fortgeschrittenen Projektverlauf oberflächennahe Risse im Werkstoffgefüge erkannt worden sind, wird die anfangs gestellte Aufgabenstellung um einen weiteren Punkt, der Optimierung des Schmiedeprozesses (einschließlich der Massenverteilung), erweitert. Bei den Schmiedeversuchen zeigt sich, dass das Schleudergussrohr als Halbzeug keine gute Ausgangsbasis zur Herstellung von Getriebehohlwellen ist. Deshalb wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch das Ausgangsmaterial für die betrachtete hohle Getriebehauptwelle modifiziert. Schlussendlich werden zwei neue Prozessketten zur Herstellung von fehlerfreien Hohlwellen vorgestellt.

Abstract

In the future, in the interests of promoting lightweight design and for functional reasons, hollow shafts should be used in commercial vehicle transmissions. One central requirement to this end is that the difficult-to-access and oil-flooded hollow shaft interior has a completely scale-free and burr-free surface. For cost reasons, semi-finished products should be manufactured from a centrifugally cast pipe. To achieve this goal, selected manufacturing processes are analyzed and evaluated with respect to their feasibility for the tasks in question. Machining tests are also documented, with new tools having been developed and trial tested for descaling and specific application limits defined for the respective manufacturing technologies. A new process is likewise introduced for production line quality assurance that facilitates fully automatic surface evaluations and scaling formation. As surface cracks have been detected in the material microstructure at a late stage in the project, the operative task described at the beginning of this document is supplemented with an additional item for optimizing the forging process (including the distribution of mass). During the forging trial tests, it was determined that the centrifugally cast pipe as a semi-finished product does not represent a good starting point for manufacturing hollow transmission shafts. This is why the starting

material is also modified for the hollow transmission main shaft as part of this investigative work. Finally, two new process sequences are introduced for manufacturing fault-free hollow shafts.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Vorwort.....	III
Kurzfassung	V
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Formelzeichen und Bezeichnungen.....	XIV
1. Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2. Stand der Technik	1
2.1. Leichtbau	1
2.2. Anforderungen an Lkw- Getriebe.....	2
2.3. Aufbau Powershift-Getriebe	2
2.4. Von der Roheisengewinnung bis zur fertigen Getriebewelle.....	3
2.5. Konventionelle Fertigungsprozesskette für Getriebewellen	4
2.5.1. Schleuderguss als Ausgangsmaterial für hohle Getriebewellen.....	5
2.5.2. Wärmebehandlung	7
2.5.3. Einsatzhärten	8
2.5.4. Anlassen.....	10
2.6. Verfahren zur Herstellung von rohrartigen Teilen	10
2.6.1. Alternative Herstellung eines rotationssymmetrischen Hohlkörpers	10
2.6.2. Nahtlose Rohre.....	11
2.6.3. Stopfenwalzverfahren	11
2.6.4. Geschweißte Rohre.....	12
2.6.5. Geschmiedete Rohre.....	12
2.6.6. Querkeilwalzen	15
2.6.7. Bohrungsdrücken	16
2.6.8. Innenhochdruckumformen (IHU).....	17
2.7. Andere Herstellverfahren für Halbzeuge für Getriebewellen	17

2.7.1.	Gießen von Getriebewellen im Sandguss	17
2.7.2.	Hohlwellen aus mehreren Einzelsegmenten zusammengebaut	18
2.7.3.	Abgestufte Hohlwelle durch Schleudergießen hergestellt	19
2.8.	Unwucht bei Getriebewellen	19
2.8.1.	Wuchten	20
2.9.	Richten	21
2.10.	Ungelöste Herausforderungen für hohle Getriebewellen	22
2.10.1.	Hochtemperaturkorrosion	22
2.10.2.	Oxidation beim Schmieden und Erwärmen	24
2.11.	Verfahren zur Erkennung der Zunderschicht	25
2.12.	Automatische Erkennung von Oberflächenfehlern in zylindrischen Bohrungen	26
2.13.	Verfahren zur Beseitigung der Zunderschicht	28
2.13.1.	Durchfließläppen	28
2.13.2.	Beizen	29
2.13.3.	Thermochemische Reinigung mit Salzschnmelzen	30
2.13.4.	Gleitschleifen	31
2.13.5.	Strahlverfahren	33
2.13.6.	Ultrasonic Kugelstrahlen	34
2.13.7.	Hydromechanisches Verfahren	34
2.14.	Entgraten	35
2.14.1.	Messgrößen des Grates	35
2.14.2.	Aussehen des Grates und vollautomatische Gratkontrolle	37
2.14.3.	Richtlinien zur Verwendung der unterschiedlichen Entgratverfahren	38
2.15.	Mechanische Entgratverfahren	38
2.15.1.	Keramische Faserstäbe	38
2.15.2.	Keramik Schleifstifte	39
2.15.3.	GMO-Entgrater	40
2.15.4.	Burr-Off	41

2.15.5.	Heule™ COFA.....	41
2.15.6.	Entgratspirale	43
2.15.7.	Burraway	44
2.15.8.	Orbitool.....	45
2.16.	Weitere Verfahren zur Beseitigung von Bohrungsaustrittsgraten.....	46
2.16.1.	Elektrochemisches Entgraten	46
2.16.2.	Thermisches Entgraten.....	46
2.16.3.	Wasserstrahlentgraten.....	47
2.16.4.	PinFlow	47
2.16.5.	Erix Tool	48
2.17.	Bohrverfahren	49
2.17.1.	Elektrochemisches Bohrverfahren (ECM)	49
2.17.2.	PECM.....	50
2.17.3.	Funkenerosionsverfahren	51
2.17.4.	Trepanierbohren	52
2.18.	Rissprüfung.....	53
2.19.	Messung der Wanddicke.....	53
3.	Experimentelle Untersuchungen.....	55
3.1.	Bestimmung der Zunderdicke des Schleudergussrohres.....	55
3.2.	Ausgangszustand: Entzünderte Getriebewelle der Versuchsserie 3.....	56
3.3.	Sprengversuch.....	57
3.4.	Seilwerkzeug.....	61
3.4.1.	Seilwerkzeug mit Schneidplatten	62
3.4.2.	Seilwerkzeug mit drei zylinderförmigen Schleifstiften.....	62
3.4.3.	Seil mit schleifmittelbesetzter Trommel.....	63
3.5.	Versuche mit Bürsten	64
3.5.1.	XEBEC Entgratbürste	64
3.6.	Fliehkraftauslenkungswerkzeuge	65
3.6.1.	Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Stahlborsten	65
3.6.2.	Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Schneidplatten V1	66

3.6.3.	Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Schneidplatten V2	68
3.7.	Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Schleifstiften.....	70
3.7.1.	Schleifstift zylindrisch.....	70
3.7.2.	Schleifstift kugelförmig.....	73
3.7.3.	Schleifstift zylindrisch und drehbar.....	74
3.7.4.	Schleifstift kugelförmig und drehbar.....	76
3.8.	Drehbares Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Spannfutter	79
3.9.	Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Kugelfräser.....	80
3.10.	Hydraulisch ausgelenktes Werkzeug mit Schneidplatte.....	81
3.11.	Versuche mit Hochdruckwasserstrahlen (Fa. Hammelmann)	84
3.12.	Versuche mit dem Kolene-Verfahren.....	86
3.13.	Schmiederversuche Serie 4.....	90
3.13.1.	Metallografische Untersuchungen der Versuchsserie 4	93
3.13.2.	Welle Nr. 388 mit 950 °C Schmiedetemperatur und Innenseite nicht ausgedreht.....	93
3.13.3.	Welle 335 mit 950 °C Schmiedetemperatur (unlackiert).....	93
3.13.4.	Welle 350 mit 950 °C Schmiedetemperatur und Schutzlackbeschichtung	94
3.13.5.	Welle 343 mit 850 °C Schmiedetemperatur (unlackiert).....	94
3.13.6.	Welle 352 mit 850 °C Schmiedetemperatur und Schutzlackbeschichtung	94
3.13.7.	Welle 382 mit 800 °C Schmiedetemperatur (unlackiert).....	95
3.13.8.	Welle 385 mit 800 °C Schmiedetemperatur mit Schutzlackbeschichtung	95
3.13.9.	Welle 353 mit 750 °C Schmiedetemperatur (unlackiert).....	95
3.13.10.	Optische Untersuchung der Getriebewellen der Schmiedeserie 4	96
3.14.	Radialschmiederversuche der Serie 5	97
3.14.1.	Welle 401: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 850 °C unmittelbar vor dem Schmieden.....	101

3.14.2.	Welle 404: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 850 °C	102
3.14.3.	Welle 406: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 950 °C jeweils unmittelbar vor dem Schmieden	103
3.14.4.	Welle 409: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 950 °C jeweils unmittelbar vor dem Schmieden	104
3.14.5.	Welle 411: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 950 °C, ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten.....	106
3.14.6.	Welle 415: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 950 °C, ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten.....	107
3.14.7.	Welle 419: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 1000 °C jeweils unmittelbar vor dem Schmieden	108
3.14.8.	Welle 422: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 1000 °C, induktive Nacherwärmung der zweiten Werkstückseite auf 1000 °C unmittelbar vor dem Schmieden	109
3.14.9.	Welle 423: Halbzeug: Stahlrohr (Ck35), zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, induktive Nacherwärmung beider Werkstückseiten auf 1000 °C unmittelbar vor dem Schmieden.....	111
3.15.	Schmiedeversuche Serie 6.....	112
3.15.1.	Welle 438: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung Wellenseite 1 (935 °C) und 2 (950 °C) unmittelbar vor dem Schmieden	113

3.15.2.	Welle 439: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung Welleseite 1 (900 °C) und Seite 2 (870 °C) unmittelbar vor dem Schmieden	114
3.16.	Fertig bearbeitete Wellen der Serie 6	114
3.16.1.	Entzundert durch Kugelstrahlen: Getriebewellen 442 und 441 fertigbearbeitet: geschmiedet über zweistufigen Dorn DB, Ofenvorwärmtemperatur 800 °C, Induktionserwärmung beider Wellenseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 950 °C	115
3.16.2.	Entzunderung mit Kolene-4-Verfahren.....	117
3.16.3.	Härtmessungen	119
3.17.	Richten.....	119
3.18.	Auswuchten	121
3.18.1.	Auswuchten der Getriebewellen	122
3.18.2.	Endergebnis der Wuchtgüte der hartbearbeiteten Wellen nach dem zweiten Richten	126
3.19.	Wanddickenmessung mittels Ultraschall	128
3.19.1.	Grafische Auswertung der Exzentrizität	129
3.20.	Biaxialshaker als alternatives Entzunderungsverfahren.....	131
3.20.1.	Bearbeitungsversuche mit dem Biaxialshaker	133
4.	Entgratversuche	134
4.1.	GMO-Entgrater.....	135
4.2.	Burr Off	136
4.3.	Burr Away	137
4.4.	XEBEC Entgratbürste.....	138
4.5.	Vergleich der Ergebnisse der ausgewählten, mechanischen Entgratwerkzeuge	139
4.6.	Thermische Entgratungsversuche	140
5.	Bohren ohne Gratbildung.....	143
5.1.	AgemaGermany AS430	143
5.2.	Mandra BT – 2NC ATC	143

5.3.	Versuchsobjekte.....	144
5.4.	Rauheitsvergleich.....	145
5.5.	Automatische Detektion des Zunderbestandes	147
6.	Weitere Verbesserungsmöglichkeiten.....	149
6.1.	Rohteilgeometrie	149
6.2.	Herstellung des Rohteils für das Radialschmieden.....	150
6.3.	Schmiedeprozess.....	151
6.4.	Schmiedemaschine	152
6.5.	Zunderschichtdicken	152
6.5.1.	Zunderbildung bei Ofenvorwärmung und induktiver Nacherwärmung	152
7.	Empfohlene Prozessketten zur Herstellung einer fehlerfreien Getriebehohlwelle.....	155
8.	Literaturverzeichnis	158
9.	Anhang.....	170

Formelzeichen und Bezeichnungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Gesamte Oberfläche der Probe.....	m ²
A_p	In Formteilung projizierte Fläche des Gussstückes auf den Oberkasten	m ²
b	Anzahl der Gramm-Atome O ₂ pro Mol M _a O _b	-
B10	Nominelle Lebensdauer, die 90% der Kernkomponenten erreichen	km
c	Schallgeschwindigkeit im Prüfgegenstand.....	m/s
δ	Elektrische Eindringtiefe.....	mm
D	Büchsendurchmesser.....	mm
D_A	Aussendurchmesser des Schleudergussrohres.....	cm
D_I	Innendurchmesser des Schleudergussrohres	cm
Δm	Massenzunahme durch die Oxidation	kg
ρ_{Metall}	Dichte des Metalls	kg/m ³
Dn	Nummer des Bearbeitungsdurchlaufes	-
ρ_{Oxid}	Dichte des Oxids	kg/m ³
d_{PG}	Gemessene Wanddicke	mm
D_R	Aussendurchmesser des Rohres	mm
d_R	Innendurchmesser des Rohres	mm
ε, ε_{zul}	Exzentrizität, zulässige Exzentrizität.....	mm
ρ_{O_x}	Dichte des Oxids	g/cm ³
ρ_s	Dichte des Gießwerkstoffes.....	g/cm ³
ρ_F	Dichte des zu erwärmenden Festkörpers	kg/m ³
ρ_W	spezifischer Widerstand des zu erwärmenden Materials	Ω·mm ² /m
F	Fliehkraft	N
f	Frequenz des Induktionsstroms	Hz
F_A	Abhebekraft gegen den Oberkasten.....	N
F_K	Auftriebskraft auf den Kern.....	N
FP	ferritisch/perlitisch	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
G	Wuchtgüte.....	g·mm
h	Oberkastenhöhe.....	m
i	Anzahl der Rückwändechos	-
K	Eingestellter Skalenfaktor am Gerät.....	Skt./mm
k_p	Parabolische Oxidationskonstante (auf Massenzunahme bezogen)....	kg ² m ⁻⁴ s ⁻¹
k'_p	Parabolische Oxidationskonstante (auf Schichtdicke bezogen).....	m ² s ⁻¹

k_{p0}	Parabolische Wachstumskonstante.....	$g_{O_2}^2 cm^{-4} s^{-1}$
L, L_{neu}	Länge des Rohteils	mm
m	Rotormasse.....	g
M_{Metall}	Molare Masse des Metalls.....	kg/mol
M_O	Relative Atommasse des Sauerstoffs	g/mol
M_{O_x}	Relative Molmasse des Oxids	g/mol
M_{Oxid}	Molare Masse des Oxids.....	kg/mol
μ_r	Permeabilitätszahl des zu erwärmenden Materials.....	1
n	Anzahl der Metallatome pro Sauerstoffatom.....	-
n_{krit}	Minstdrehzahl nach Hurst.....	U/min
p	Durch die Rotation erzeugte Gießdruck	bar
p_z	Anpressdruck der Schmelze an die Kokilleninnenwand.....	Pa
Q	Aktivierungsenergie beim Schichtwachstum.....	kJ/mol
R	Allgemeine Gaskonstante	J/mol·K
\vec{r}	Abstand des Unwuchtmassenschwerpunktes zur Schaftachse	mm
R_{PB}	Pilling Bedworth-Faktor	-
$R_{z(i)}$	Größte Einzelrautiefe der Messstrecke i.....	μm
r_A	Außenradius des Schleudergussteiles	mm
s_R	Wandstärke des Schleudergussrohres.....	mm
s	Deckschichtdicke	m
s_{SG}	Weg der Schallwelle vom Sender zur Grenzfläche.....	mm
SSVn	Schleifstiftversuch mit laufender Nummer	-
t	Zeitspanne	s
T	Temperatur der Probe	K
T_{PG}	Echoposition	Skt.
TUN	Unbeeinflussbare Nutzungszeit.....	min
u	Unwuchtmasse.....	g
U, U_{zul}	Gesamte Unwucht, zulässige Unwucht	g·mm
V	Volumen des Rohteils	mm^3
V_k	Kernvolumen	cm^3
VTn	Versuchsteil mit der Nummer n	-
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s

Weitere Bezeichnungen sind im Text erklärt.

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, prozesssichere Fertigungsverfahren zum Entgraten und Entzundern des öldurchfluteten Innenraums von Getriebewellen aufzuzeigen. Dazu werden nicht nur etablierte Fertigungstechnologien herangezogen, sondern auch neuartige Ansätze entwickelt und erprobt. Des Weiteren werden auch Verfahren aufgezeigt, mit denen die Zunderfreiheit vollautomatisch überprüft wird. Die hierfür erforderlichen experimentellen Untersuchungen werden selbstständig bzw. in enger Zusammenarbeit mit ausgewählten Technologiepartnern (Hersteller von Maschinen, Werkzeugen, Messeinrichtungen) durchgeführt. Schlussendlich werden optimierte Prozessketten vorgestellt, mit denen die Fertigung von Getriebehohlwellen für Nutzfahrzeuge in anforderungsgerechter Qualität und unter Großserienbedingungen ermöglicht wird.

2. Stand der Technik

2.1. Leichtbau

Während der letzten zwei Jahrzehnte wurde versucht, das Gewicht von Kraftfahrzeugen durch die Optimierung der Fahrzeugkarosserie und des Fahrwerks zu verringern. Andere Fahrzeugkomponenten, insbesondere im Antriebsstrang befindliche, blieben dabei unberücksichtigt. Eine Arbeitsgruppe, zusammengesetzt aus Fachleuten der Industrie und universitären Einrichtungen, hat in einer Studie erkannt, dass auch bei massiv umgeformten Bauteilen ein großes Potenzial zur Gewichtseinsparung schlummert. Als Studienobjekt diente dabei ein am Markt sehr verbreiteter Mittelklassewagen.¹ Das Gewicht der untersuchten Bauteile repräsentieren 48% des Fahrzeuggesamtgewichtes. Bei den Bauteilen, bei denen ein Leichtbaupotenzial festgestellt wurde, lässt sich im Durchschnitt etwa 10% an Gewicht einsparen. Die dabei aufgezeigten konstruktionsbedingten Leichtbaumaßnahmen können bei bestimmten Bauteilen auch zu Kosteneinsparungen führen. Jedoch ist es eher die Regel, dass die Gewichtsersparnis einen erhöhten Fertigungs- und Entwicklungsaufwand bedingt und daher mit höheren Bauteilkosten erkaufte wird.² Eine Fahrzeugkomponente, in der ein erhebliches Leichtbaupotenzial steckt, ist die Getriebehauptwelle in Schaltgetrieben. Hohle Getriebehauptwellen können sowohl im Pkw als auch im Nutzfahrzeugsegment eingeführt werden. Während das Einsparungspotenzial pro Welle bei Personenkraftwagen bis zu 1 kg beträgt, sind es bei Nutzfahrzeugen bis zu 6 kg. Um ein identifiziertes Potenzial zu nutzen, sind vor allem die Fertigungsverfahren und damit die Prozesskosten von Bedeutung. Die Gewichtsersparnis führt unter Betriebsbedingungen zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch, wodurch auch die CO₂-Emissionen gesenkt werden. Mit der Massivumformung – insbesondere durch Radialschmieden – sind Hohlwellen herstellbar, deren Wandstärke zwecks

¹ Vollrath, 2014

² Raedt, et al., 2014

Gewichtsreduzierung an die örtliche Belastung angepasst ist. In Kombination mit dem Radialschmieden kann es auch erforderlich sein, als weitere Bearbeitungsoperation das Langlochbohren (Tieflochbohren) heranzuziehen, um damit die zentrale Ölzuführungsbohrung herzustellen.³

2.2. Anforderungen an Lkw- Getriebe

Lastkraftwagen werden für die unterschiedlichsten Einsatzzwecke herangezogen. Sie transportieren Güter im Kurz- oder Langstreckenbetrieb, auf Straßen oder unbefestigten Wegen. Je nach Einsatzzweck unterscheidet sich die erforderliche Lebensdauer eines Lastkraftwagens und liegt viel höher als im Pkw-Segment. Wird dieser hauptsächlich im Baustellenbetrieb eingesetzt, so liegt die B10-Lebensdauer bei 400.000 km. Im Langstreckenbetrieb werden hingegen B10-Lebensdauern um die 1.400.000 km verlangt. Da bei Lastkraftwagen das maximal zulässige Gesamtgewicht beschränkt ist, wird das Fahrzeugeigengewicht so gering wie möglich gehalten, um damit die transportierbare Nutzlast zu erhöhen.⁴ Die repräsentative Getriebewelle, für die in dieser Arbeit die fertigungstechnischen Herausforderungen gelöst werden, stammt aus der „G 140-8 NewAMT“ Getriebebaureihe der Firma Daimler AG. Dieses Getriebe eignet sich bis zu einem maximalen Eingangsdrehmoment von 1400 Nm. Es wird als Getriebe für mittelschwere bis schwere Lkw, Kräne und Sonderfahrzeuge verwendet, wenn deren höchst zulässiges/zugelassenes Gesamtgewicht 32 t nicht überschreitet. Es hat acht Vorwärts- und zwei Rückwärtsgänge und weist eine Getriebespreizung von 11,82 auf.⁵

2.3. Aufbau Powershift-Getriebe

Um eine Verbrennungskraftmaschine immer im optimalen Betriebsbereich zu betreiben, muss ein Getriebe eine hohe Anzahl von möglichen Fahrstufen haben. Dies bedingt, dass mit zunehmender Ganganzahl auch die Baugröße und damit die Masse des Getriebes steigt. Um dennoch das Getriebe kompakt zu bauen wird es heute üblicherweise aus mehreren Getriebegruppen aufgebaut. Besitzt das Hauptgetriebe zu wenig Gangstufen, so wird die Anzahl der Gänge durch ein zusätzlich vor- oder nachgeschaltetes Getriebe erhöht. Liegt das zusätzliche Getriebe im Antriebsstrang vor dem Hauptgetriebe, so wird von der Splitgruppe gesprochen. Sie ist meistens zweistufig ausgeführt. Damit verdoppelt sich die Gangzahl des Getriebes. Liegt das Zusatzgetriebe nach dem Hauptgetriebe, so wird es als Rangiergruppe bezeichnet. Auch die gemeinsame Kombination aller drei vorhin erwähnten Getriebegruppen ist möglich.⁶

³ Raedt & Quintenz, 2009, S. 922-925

⁴ Fischer, et al., 2012

⁵ Mercedes Benz AG, 2013, S. 3-4, 8

⁶ Hoepke, et al., 2008, S. 141-142

Das Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Nutzfahrzeuggetriebes in Zweigruppenbauweise. Der Motor überträgt das Antriebsdrehmoment über die Kupplung auf die Eingangswelle. Von dort aus wird, je nach Schaltstellung, dieses entweder über das Losrad K1 oder das Losrad K2 auf die Vorgelegewelle übertragen. Dadurch werden zwischen der Eingangswelle und der Ausgangswelle (Hauptwelle) zwei wählbare Übersetzungsstufen realisiert, wodurch sich die Ganganzahl des Getriebes verdoppelt wird. Dieser Teil des Getriebes wird als Vorschaltgruppe bezeichnet. Während auf der Vorgelegewelle alle Zahnräder fest mit der Welle verbunden sind, sind alle schaltbaren Losräder auf der Eingangs- und Hauptwelle angeordnet. Nach der Auswahl eines der beiden Gänge der Vorschaltgruppe wird, über die Auswahl einer der möglichen vier Schaltstufen auf der Hauptwelle (1, 2, 3 oder 4), eines der Losräder mit der Hauptwelle kraftschlüssig verbunden. In der Folge wird von der Vorgelegewelle aus das Drehmoment weiter zur Hauptwelle übertragen.

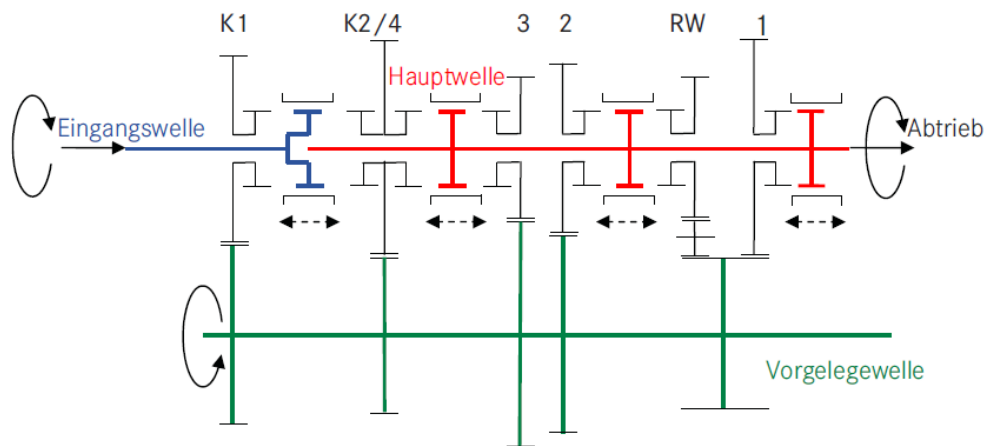


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines 8 stufigen Nutzfahrzeuggetriebes (G140-8) (Vorschaltgruppe, K=Konstantradpaar; Hauptgruppe, Zahlen 1-4: Gang, RW=Retourgang).⁷

2.4. Von der Roheisengewinnung bis zur fertigen Getriebewelle

Am Anfang steht die Gewinnung des Roheisens in einem Hochofen. Dieses wird dann entweder direkt als Gusseisen zum Gießen verwendet oder in einem nachfolgenden Prozess in einem Konverter zu Stahl weiterverarbeitet. Der Großteil dieses Stahles wird dann in Stränge oder Blöcke gegossen. Diese Halbzeuge werden durch verschiedene Fertigungsverfahren in ein Stahlerzeugnis umgeformt, welches die benötigten Eigenschaften und Formen für eine Weiterverarbeitung aufweist. In Bild 2 sind mögliche Prozessketten von der Roheisengewinnung bis zum fertigen Stahlerzeugnis dargestellt.⁸

⁷ Kluge, 2010, S. 5

⁸ Bergner, et al., 2007, S. 56-58

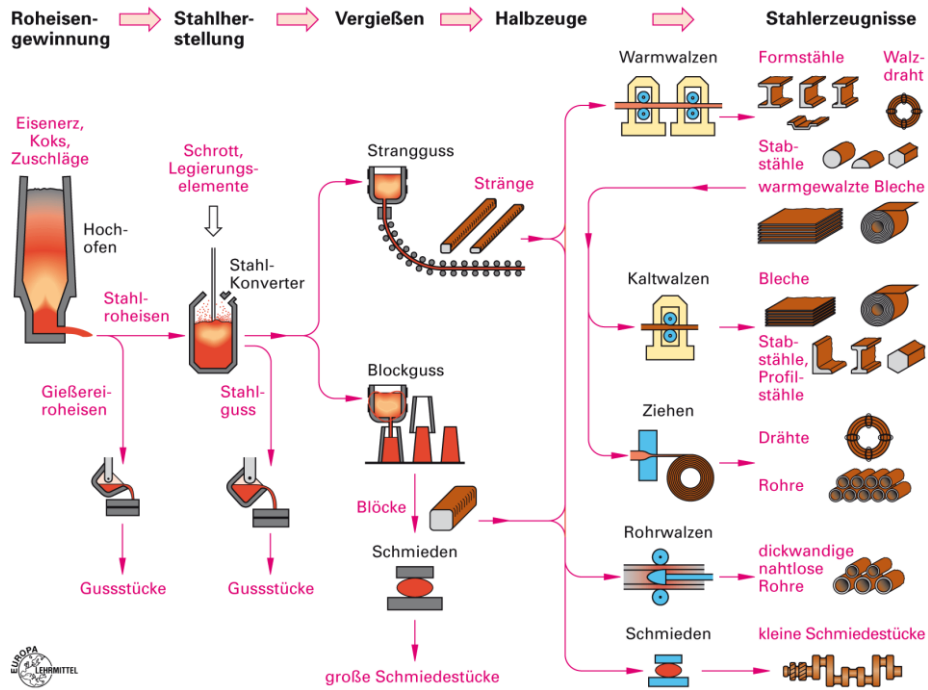


Bild 2: Prozesskette von der Roheisengewinnung zum fertigen Stahlerzeugnis.⁹

2.5. Konventionelle Fertigungsprozesskette für Getriebewellen

Das Bild 3 zeigt die Fertigungsschritte zur Herstellung einer massiven Hauptwelle. Ausgehend vom abgelängtem Stabmaterial erfolgt das Vorformen durch mehrstufiges Gesenkschmieden.

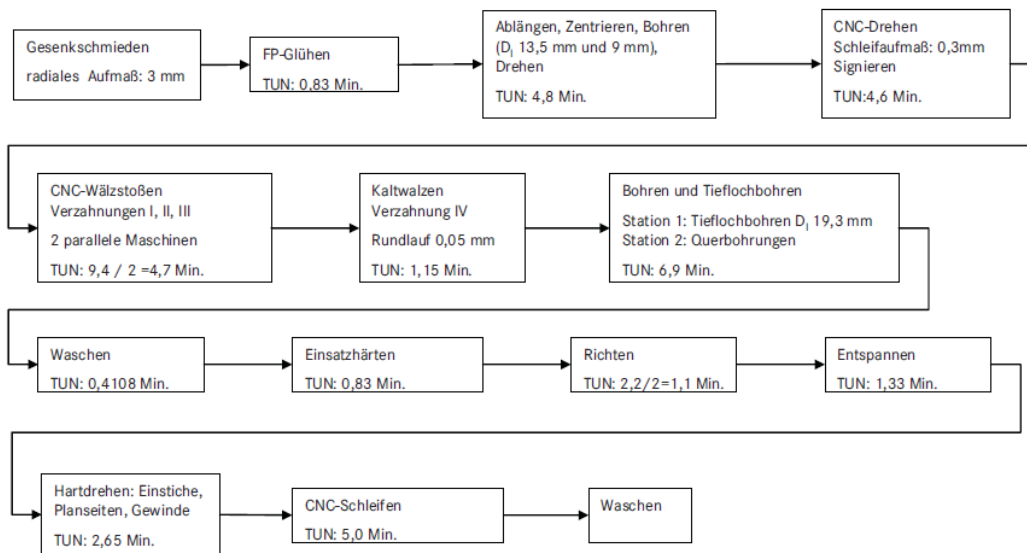


Bild 3: Prinzipieller Ablauf der Hauptwellenfertigung für schwere Nutzfahrzeuge am Beispiel der Vollwelle für das Getriebe G140 (TUN = unbeeinflussbare Nutzungszeit).¹⁰

Nach dem Rekristallisationsglühen folgen die spanende sowie kaltumformende Vorbearbeitung (sogenannte Weichbearbeitung), die Wärmebehandlung durch Einsatzhärten ein-

⁹ Bergner, et al., 2007, S. 58

¹⁰ Kaufmann, 1988

schließlich einem Richtprozess, die Hartbearbeitung und letztlich das Reinigen des fertigen Bauteils. Während der zeitintensiven Wärmebehandlungsschritte befinden sich jeweils viele Werkstücke gleichzeitig in den Durchlauföfen. Die für das Zuführen des Öles benötigten Querbohrungen werden in einem konventionellen Bohrprozess unter Verwendung von Spiralbohrern ausgeführt. Die zentrale Ölzuführungsbohrung wird durch einen Tieflochprozess hergestellt. Bis auf die Endbereiche weist sie einen konstanten Durchmesser auf.

2.5.1. Schleuderguss als Ausgangsmaterial für hohle Getriebewellen

Ein von Kluge¹¹ neu entwickelter Ansatz zur Herstellung von hohlen Getriebehauptwellen sieht als Ausgangsmaterial dickwandige Schleudergussrohre vor, die durch Radialschmieden umgeformt werden werden. Diesen Ansatz zunächst folgend werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit insgesamt 9 Schleudergussrohre bei der Firma Centricast, Bilbao, bestellt und durch Schleuderguss hergestellt. Die Rohre haben eine Ausgangslänge von 2,5 m, einen Außendurchmesser von 125 mm und einen Innendurchmesser von 65 mm. Von diesen werden Rohrsegmente mit einer Länge von 240 mm zur Weiterverarbeitung abgesägt.

Das Schleudergießen wird vorrangig zur Herstellung von rotationssymmetrischen Werkstücken verwendet, die die Geometrie eines Rohres oder einer Scheibe bzw. eines dickwandigen Ringes aufweisen. Dazu zählen Zylinderlaufbuchsen für Verbrennungskraftmaschinen, Zahnräder, Schwunräder und Riemenscheiben. Je nach Anordnung der Drehachse der Kokille wird zwischen vertikaalem und dem horizontalen Schleudergießen unterschieden. Im Vergleich zu anderen Gießverfahren werden damit hohle Bauteile ohne Zuhilfenahme eines Kernes hergestellt. Durch prozessbedingt wirkenden Kräfte (Zentrifugalkraft, Reibungskraft, Schwerkraft) kommt es zur Ausbildung eines gleichmäßigen Wanddickenverlaufs des rotationssymmetrischen Werkstückes. Die während des Gießprozesses wirkende Zentrifugalkraft führt zu einem dichten, poren- und gasblasenfreien Gefüges hoher Reinheit. Im Vergleich zu herkömmlich gegossenen Werkstücken weisen Schleudergussteile qualitativ bessere Werkstoffeigenschaften (u.a. Festigkeit) auf. Deshalb können durch das Schleudergießen geringe Wanddicken, bei vergleichbarer Festigkeit, realisiert werden.¹²

In eine Kokille, die rohrförmig ausgebildet ist und sich um ihre Symmetrieachse dreht, wird die Schmelze (flüssiger Stahl) eingebracht (Bild 4). Die Wanddicke des sich ausbildenden Rohres wird durch die Masse bestimmt, die in die Kokille gegossen wird. Im Horizontalguss muss die Kokillendrehzahl so hoch gewählt sein, dass das flüssige Metall die Schwerkraft überwindet und im Inneren einen hohlen Raum ausbildet. Stoffe, welche die Festigkeit des Werkstückes vermindern, sammeln sich durch die Wirkung der Schwerkraft und ihrer

¹¹ Kluge, 2010

¹² Westkämper & Warnecke, 2010, S. 90-91

geringeren Dichte an der inneren Oberfläche des entstehenden Rohres. Zu diesen unerwünschten Stoffen zählen Verunreinigungen, die aus Schlacke oder Sand bestehen. Ebenso werden Gaseinschlüsse im Werkstoffgefüge vermieden. Die für das Schleudergießen benötigte Mindestdrehzahl ist vom äußeren Durchmesser D und der Dichte ρ des zu gießenden Materials abhängig. Bei diesem Verfahren wird mit Drehzahlen bis zu 4000 U/min gearbeitet, bei denen der Druck im Wandbereich Werte von bis zu 50 bar erreichen kann. Durch den hohen Druck kommt es zu einer Verdichtung der Schmelze. Zusätzlich wird die Schlackenbildung sowie die Entstehung von Lunkern im Inneren des entstehenden Rohres unterdrückt.¹³

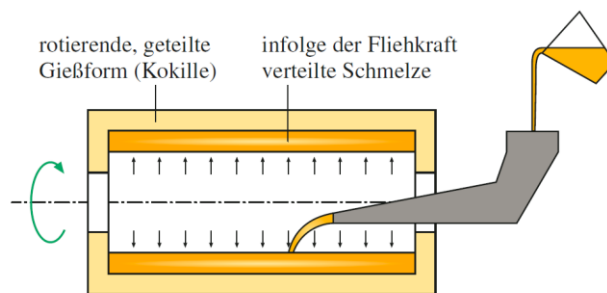


Bild 4: Prinzipieller Ablauf beim Schleudergießen.¹⁴

Der durch die Rotation erzeugte Gießdruck wird, in Abhängigkeit vom Außen- und Innendurchmesser des herzustellenden Rohres durch die Beziehung (1) überschlagsmäßig ermittelt¹⁵:

$$p \approx \frac{\rho_s \cdot \omega}{3000 \cdot g \cdot 100} \left(\frac{1}{4} \cdot D_A^2 - 2 \cdot \frac{D_I^2}{D_A^3} \right) \quad [\text{bar}] \quad (1)$$

Dabei drückt die Schmelze mit dem Druck nach Gleichung (2) auf die Innenwand der Kokille¹⁶:

$$p_z = 10^6 \cdot s_R \cdot r_A \cdot \rho_s \cdot 10^3 \cdot \omega \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Damit sich das Gießmaterial gleichmäßig in der Gießform verteilt, darf die Kokille eine bestimmte Drehzahl nicht unterschreiten. Die dafür erforderliche Mindestdrehzahl wird (nach Hurst) mit der Beziehung 3 beschrieben¹⁷:

$$n_{\text{krit}} = \frac{7200}{\frac{\rho_s}{g/\text{cm}^3} \cdot \sqrt{\frac{D}{\text{mm}}}} \quad \left[\frac{\text{U}}{\text{min}} \right] \quad (3)$$

¹³ Fritz, et al., 2012, S. 75-76

¹⁴ Fechter & Jaich, 2014, S. 991

¹⁵ Väh, 1929

¹⁶ Lochmann, 2013, S. 57

¹⁷ Fritz, et al., 2008, S. 76

Während des Eingießens der Schmelze in die Kokille wird deren Drehzahl über die Steuerung kontinuierlich erhöht, damit am sich verkleinernden Innendurchmesser der Gießdruck konstant bleibt

Die unerwünschten Ablagerungen, die sich im Inneren des Schleudergussteiles sammeln, müssen durch eine mechanische Bearbeitung entfernt werden. Im Vergleich zu anderen Gießverfahren tritt hier keine Nahtbildung am gegossenen Werkstück auf. Die Wanddickenabweichung der Bauteile beträgt +/-1 %. Als Werkstoffe für das Schleudergießen werden nicht nur Metalle wie Gusseisen, Leicht- und Schwermetalle, sondern auch thermoplastische Kunststoffe verwendet. Kunststoffe werden mit einem abgewandelten Verfahren, dem sog. Rotationsgießen, vorwiegend zur Herstellung von großen Kunststoffbehältern verwendet.¹⁸

Wie bereits erwähnt werden für gegenständliche Untersuchungen bei der Firma Centricast insgesamt 9 Rohre aus dem Werkstoff 1.7325 (25MoCr4) gegossen. Während des Gießvorganges (Temperatur der Schmelze ca. 1650 °C) wurde die Kokillendrehzahl, von anfänglich 1300 min⁻¹, auf ca. 1400 min⁻¹ erhöht. Nach etwa fünf Minuten Haltedauer wurde die Kokille stillgesetzt, die seitlichen Deckel wurden entfernt und das glühende Gussrohr wurde aus der Kokille herausgezogen. Zur Abkühlung auf Raumtemperatur wurde das Gussrohr auf ein Sandbett gelegt.

2.5.2. Wärmebehandlung

2.5.2.1. FP-Glühen

Beim FP-Glühen werden die Eigenspannungen im Werkstoffgefüge verringert, wodurch er leichter umgeformt werden kann. Dabei wird die Temperaturführung an den jeweiligen Werkstoff angepasst.¹⁹

2.5.2.2. Aufkohlen

Der Kohlenstoffgehalt von Einsatzstählen ist zu gering um Härtewerte über 45 HRC zu erreichen. Um in der Randzone höhere Härtewerten zu erreichen, wird im oberflächennahen Bereich der Kohlenstoffgehalt erhöht. Dies wird durch das Aufkohlen erreicht. Dazu wird das Werkstück für längere Zeit bei hoher Temperatur von einem kohlenstoffhaltigen Medium in gasförmigem, flüssigem, oder festem Zustand umgeben.²⁰ Die festen Aufkohlungsmittel bestehen entweder aus Kohle bzw. Holzkohle oder aus einem Kohle-Karbonat-Gemisch. Soll eine große Anzahl von Werkstücken mit großen Abmessungen aufgekohlt werden, kommen dafür gasförmige Aufkohlungsmittel zur Anwendung. Dabei wird der Aufkohlofen kontinuierlich von einem Gasgemisch durchströmt, von dem eine Komponente (z. B. Methan) den

¹⁸ Peters, et al., 2012, S. 426

¹⁹ Roos & Maile, 2015, S. 163

²⁰ Göbel & Marfels, 1953, S. 41

Kohlenstoff an das jeweilige Werkstück abgibt. Des Weiteren wird dafür auch ein Granulat aus Kohle verwendet, welches mit Luft im Ofen umgewälzt wird. Für Bauteile, die nicht in allzu großer Stückzahl vorliegen und deren Abmessungen einer mittelgroßen Baugröße entsprechen, kommen flüssige Medien zur Anwendung. Dabei werden als Aufkohlungsmittel Salze verwendet, die Cyanid enthalten. Mithilfe der flüssigen Aufkohlungsmittel wird das Werkstück schneller erwärmt als es im Rahmen einer der beiden zuvor erwähnten Aufkohlungsarten möglich ist.²¹ Die Aufkohlungszeit für die Erprobungsteile liegt in Gasatmosphäre bei etwa 4 Stunden.

2.5.2.3. Härten

Für Bauteile, die keinen hohen Belastungen ausgesetzt sind, erfolgt das Härten unmittelbar nach dem Aufkohlen durch Abschrecken im Wasser- bzw. Ölbad direkt von der Einsatztemperatur aus. Ansonsten erfolgt nach dem Aufkohlen durch eine angepasste Temperaturführung eine weitere Wärmebehandlung, bevor abgeschreckt wird. Das Bild 5 zeigt einige mögliche Temperaturverläufe, mit denen das Einsatzhärten durchgeführt werden kann.²² Bei richtig gewählten Abkühlgeschwindigkeiten kommt es beim Abschrecken im Werkstoffgefüge zur Ausbildung von Martensit, der durch Volumenzunahme das Kristallgitter vorspannt, und dadurch eine deutliche Härtesteigerung erreicht.²³

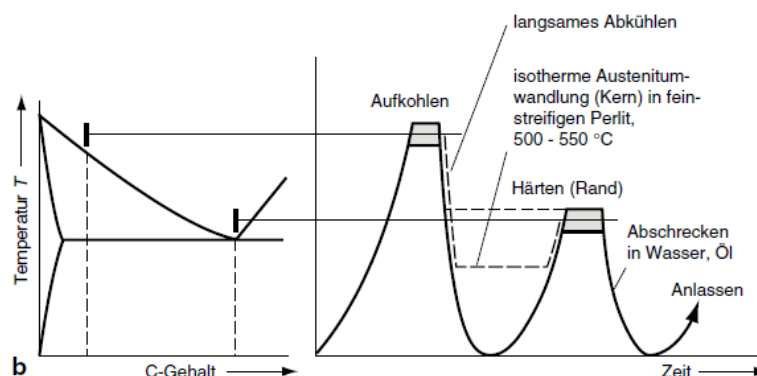


Bild 5: Unterschiedliche Temperaturführung beim Einsatzhärten.²⁴

2.5.3. Einsatzhärten

Mit dem Einsatzhärten werden Einsatzstähle gehärtet, die einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0,06 und 0,25 % haben. Dabei entsteht ein Bauteil mit einer sehr harten Oberfläche und einem zähen Kern.²⁵ Hierzu wird zunächst, während des Aufkohlens, der Kohlenstoffgehalt in der Randzone des Werkstückes auf ca. 0,8 % erhöht. Anschließend erfolgt das Härten auf etwa 60 HRC, wodurch auch eine verschleißfeste Oberfläche erzeugt wird. Beim Einsatz-

²¹ Bleckmann, 1968, S. 20

²² Bargel, et al., 2012, S. 224ff

²³ Läßle, 2006

²⁴ Bargel, et al., 2012, S. 225

²⁵ Raedt, et al., 2012, S. 201

härten gibt es verschiedene Varianten, die sich anhand der Temperaturführung unterscheiden. Erfolgt das Härten direkt von der Aufkohlungstemperatur aus, so handelt es sich um das Direkthärten. Wird das Werkstück vor dem Härten noch abgekühlt, so nennt sich dies Einfachhärten. Abgeschlossen wird die Wärmebehandlung mit dem Anlassen, um überhöhte Eigenspannungen im Bauteil abzubauen.²⁶

2.5.3.1. Alternatives Härteverfahren: Induktionshärten

Voraussetzung ist ein Kohlenstoffanteil im Werkstoffgefüge von mindestens 35%. Durch das induktive Erwärmen mit unmittelbar anschließenden Abschrecken entsteht bei Stählen eine sehr harte, verschleißfeste Randschicht. Im Vergleich zum Ofenhärten wird beim Induktionshärten mit viel kürzeren Erwärmungszeiten gearbeitet, dafür aber mit bis zu 100 °C höheren Temperaturen. Ein großer Vorteil des Induktionshärtens ist, dass zur Wärmebehandlung der kontinuierliche Fertigungsablauf nicht unterbrochen werden muss. Die Erwärmungszeiten sind i. Allg. derart kurz, dass sich eine Induktionshärteanlage im Linientakt der anderen Maschine/Einrichtung betreiben lässt. Dagegen erfordert das Erwärmen im Ofen für das Aufkohlen unter Großserienbedingungen stets eine Großserienbildung (Patchbetrieb). Die Einhärtetiefe wird beim Induktionshärten mit der Frequenz des Spulenstroms gesteuert. Es gilt, je niedriger die Frequenz, in umso tiefere Schichten erfolgt die Erwärmung und damit die Aufhärtung. Je höher die Frequenz ist, umso dünner ist die Härteschicht.²⁷ Werden noch die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes berücksichtigt, so gilt für die Eindringtiefe des Stromes in die Werkstückoberfläche näherungsweise die Beziehung (4):

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\mu_r \cdot f}} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Die Erwärmung erfolgt über eine Kupferspule, mit einer oder mehreren Windungen, deren Geometrie an das zu härtende Werkstück angepasst ist. Bei der Innenfelderwärmung mit einer einwindigen Spule dreht sich das Werkstück. Gleichzeitig bewegt sich dabei die Spule mit konstantem Vorschub über den zu erwärmenden Oberflächenbereich. Besitzt der Induktor mehrere Windungen, so wärmt dieser auf einmal den gesamten Oberflächenbereich auf. Dabei führt nur das Werkstück eine rotierende Bewegung um seine Symmetrieachse aus. Die Bauteilerwärmung erfolgt durch den eigenen, ohmschen Innenwiderstand, den der Werkstoff dem durch die Induktorspule im Bauteil bewirkten Stromfluss entgegensetzt. Direkt nach der Erwärmung erfolgt das Abschrecken mit Wasser durch eine ringförmige Brause. Dieses Verfahren kann nur angewendet werden, wenn das zu erwärmende Material elektrisch leitend ist.²⁸ Beim Härten von Bauteilen mit komplizierten Oberflächengeometrien,

²⁶ Seidel & Frank, 2012, S. 149-152

²⁷ Alducto AG, 2015

²⁸ Alisch, et al., 2015, S. 390ff

wie sie z. B. Zahnräder aufweisen, wird durch die Überlagerung von zwei verschiedenen Frequenzen während der Induktion eine gleichmäßige Erwärmung in der Randzone erreicht.²⁹ Auf Grund der verhältnismäßig komplexen Geometrie der betrachteten Hohlwelle, insbesondere wegen der großen Durchmessersprünge und der Verzahnungsgeometrien, ist nach heutigem Stand der Technik die betrachtete hohle Getriebehauptwelle nicht induktionshärtbar. Hierzu müsste erst ein Induktor entwickelt werden, der durchmesservariabel ist und gleichzeitig der Verzahnungsgeometrie folgen kann.

2.5.4. Anlassen

Durch den vorhin beschriebenen Härteprozess erhält der Stahl eine hohe Härte, jedoch verliert er dadurch auch zum Teil seine Zähigkeit und versprödet. Mit dem Anlassen werden überhöhte Eigenspannungen teilweise umgebaut, so dass sich die Werkstoffzähigkeit wieder verbessert. Umso niedriger die Anlasstemperatur gewählt wird, umso geringer ist der dabei erzielte Zähigkeitsgewinn und Härteverlust. Während beim Härten der Stahl mit hoher Geschwindigkeit abgekühlt wird, erfolgt hier die Abkühlung sehr langsam.³⁰ Auf das Ergebnis der Wärmebehandlung hat nicht nur die gewählte Temperatur, sondern auch die Dauer der Wärmebehandlung einen Einfluss.³¹

2.6. Verfahren zur Herstellung von rohrartigen Teilen

2.6.1. Alternative Herstellung eines rotationssymmetrischen Hohlkörpers

Ob Rohre mit oder ohne Naht verwendet werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dabei ist die Kombination des Außendurchmessers in Verbindung mit einer bestimmten Wandstärke sehr bedeutend. Für Rohre mit großen Wandstärken und kleinen bis mittelgroßen Außendurchmesserbereichen sind nahtlose Rohre am kostengünstigsten. Diese haben, je nach Rohrgröße, Wandstärken von bis zu 70 mm. Bei diesen warmgewalzten Rohren ist das marktverfügbare Angebot an Metalllegierungen eingeschränkt. Bei den geschweißten Rohren mit Außendurchmessern bis zu 100 mm, die aus Blechen oder Platten hergestellt werden, ist ein Außendurchmesser zu Wanddickenverhältnis von $\leq 5:1$ realisierbar. Bei größeren Rohren kann dieses Verhältnis einen Wert von bis zu $8:1$ erreichen. Da bei diesen als Ausgangsmaterial Bleche oder Platten verwendet werden, sind hier viele Metalllegierungen, sogar spezielle Legierungen, erhältlich. Durch die bei der Fertigung auftretenden Wanddickenschwankungen kommt es zu einer unsymmetrischen Massenverteilung bzw. Exzentrizität bei den Rohren. Warmgewalzte, nahtlose Rohre haben eine höhere Wandstärkentoleranz ($\leq 12,5\%$), bei den geschweißten Rohren ist diese etwas

²⁹ EMAG, 2016

³⁰ Rau & Ströbel, 1999, S. 198

³¹ Berns & Theisen, 2008, S. 68

kleiner ($\leq 10\%$).³² Für die erforderliche Rohrdimension für die hier betrachtete hohle Getriebehauptwelle sind keine geschweißten Rohre am Markt verfügbar. Für warm gewalzte, nahtlose Rohre verlangen die Rohrhersteller wegen des Werkstoffes eine beachtliche Mindestabnahmemenge.

2.6.2. Nahtlose Rohre

2.6.2.1. Herstellung eines hohlen, zylindrischen Teiles aus einem Stangenmaterial

Eine alternative Herstellung von hohlen, rotationssymmetrischen Teilen wird in der Schutzrechtsanmeldung EP 2 591 866 A1 beschrieben. Dabei wird eine Vollwelle (Stangenmaterial) zu einer Hohlwelle umgeformt (z. B. aus dem Werkstoff 20MnCr5). Diese wird zuerst auf Schmiedetemperatur erwärmt und durch einen Querkeilwalzprozess umgeformt. Dabei kommt es im Inneren dieses Teiles, im Bereich um die die Symmetrieachse, zu einer Schwächung des Werkstoffes infolge hoher Zugspannungen. Diese Schwächung des Materials wird ausgenutzt, um einen Dorn in das Werkstück zu treiben. Dadurch wird ein Hohlraum erzeugt. Bei der Verwendung eines einzigen Dornes wird dieser komplett durch das Rohteil durchgedrückt. Werden zwei Dorne verwendet, so werden diese gleichzeitig oder leicht zeitversetzt nur so weit in das Material hineingedrückt, dass sich diese gerade nicht berühren. Anschließend wird ein Dorn etwas herausgezogen, damit der zweite den Überlagerungsbereich durchfahren kann. Dadurch wird eine komplett glatte, durchgehende Bohrung erzeugt. Wird die axiale Vorschubbewegung des Dornes mit einer Drehbewegung überlagert, so wird damit die Rundheit und Oberflächenbeschaffenheit des Hohlraumes verbessert. Dieses Verfahren ist für eine Vielzahl von Werkstoffen anwendbar.³³

2.6.3. Stopfenwalzverfahren

Das Stopfenwalzverfahren dient der Herstellung von nahtlosen Rohren aus einem bereits zylindrischen, hohlen Ausgangsmaterial.³⁴ Dabei wird in ein Rohr eine Stange geschoben, an deren Ende ein Stopfen ist. Über den Bereich dieses Stopfen erfolgt das Walzen des Rohres. Dabei wird der Außendurchmesser des Ausgangsmaterials verringert.³⁵ Die Bearbeitung auf einen bestimmten Außendurchmesser erfolgt dabei stufenweise durch mehrere hintereinandergeschaltete Walzen im erwärmten Zustand. Der Innendurchmesser bleibt dabei bei jeder Walzstufe gleich.³⁶ Mit diesem Fertigungsverfahren sind Rohre mit

³² H. Butting GmbH & Co. KG, 2012

³³ Kolbe, et al., 2012

³⁴ Häusler, 1993

³⁵ Kopecky & Schamschula, 1961, S. 321-322

³⁶ Hiersig, 1995, S. 1177-1178

einem maximalen Außendurchmesser von 324 mm und einer maximalen Wandstärken von 20 mm herstellbar.³⁷

2.6.4. Geschweißte Rohre

Ein Stahlband wird durch mehrere hintereinandergeschaltete Walzen (Bild 6) stufenweise zu einem Rohr gebogen, welches dann noch eine offene Stoßstelle hat. Diese Stoßstelle wird mit einem geeigneten Schweißverfahren geschlossen. Danach folgt eine Wärmebehandlung und eine mechanische Nachbearbeitung der Schweißnaht.³⁸ Geschweißte Stahlrohre haben den Nachteil das sie, wenn sie gebogen werden, im Bereich der Schweißnaht aufplatzen können.³⁹

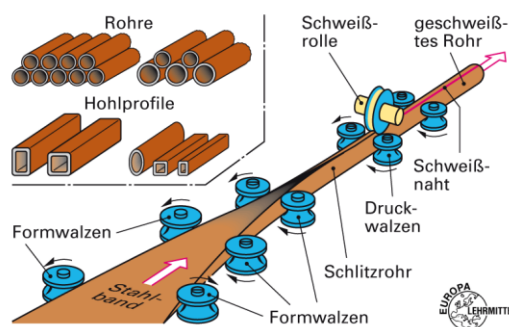


Bild 6: Herstellung von geschweißten Hohlprofilen durch ein Walzverfahren.⁴⁰

2.6.5. Geschmiedete Rohre

Das Radialschmieden, auch inkrementelles Umformen genannt, wird zur Herstellung von rotationssymmetrischen Teilen verwendet. Die damit bearbeiteten Rohre oder Stäbe sind entweder bereits direkt nach der Schmiedebearbeitung einbaufertig oder es erfolgt im Anschluss eine Nachbearbeitung mit einem spanabhebenden Fertigungsverfahren. Je nach Maschinentyp sind mindestens 2 bis maximal 8 Hämmer symmetrisch um das Werkstück angeordnet. Diese führen eine Hubbewegung in Form einer linearen Schwingung aus, bei der der Hub, je nach Maschinenbauform, zwischen 0,2 und 5 mm beträgt. Die Frequenz des Hubes erreicht dabei Werte bis zu 10.000 U/min.⁴¹ Die Handhabung des Schmiedeteils erfolgt durch einen Manipulator, der das Schmiedeteil um seine Symmetrieachse dreht und sich auch entlang dieser Achse linear verschieben lässt. Diese beiden Bewegungen sind genau auf die Bewegung der Hämmer abgestimmt. Während die Hämmer das Werkstück plastisch verformen, wird die Drehbewegung des Werkstückes kurzzeitig unterbrochen. Nur die Längenänderung des Werkstückes wird über eine lineare Zustellbewegung in Achs-

³⁷ Mutschmann & Stimmelmayer, 2002, S. 465

³⁸ Bergner, et al., 2007, S. 60

³⁹ Wiemann, et al., 1992, S. 181

⁴⁰ Bergner, et al., 2007, S. 60

⁴¹ HMP Umformtechnik GmbH, 2014

richtung ausgeglichen.⁴² Der Manipulator hält mit Zangen das Werkstück fest. Zudem enthält er auch Dorne, die für das Schmieden von rotationssymmetrischen Hohlkörpern benötigt werden. Sind zwei Manipulatoren vorhanden, so wird das Werkstück zwischen diesen hin und her gereicht.⁴³ Das Schmieden wird im kalten, halbwarmen oder warmen Bereich durchgeführt. Wird Stahl bei Temperaturen zwischen 600 und 900°C geschmiedet, so wird vom Halbwarmumformen gesprochen. Über 900 bis 1200°C spricht man vom Warmumformen. Kaltumformen heißt, dass das Werkstück zu Beginn des Schmiedeprozesses Raumtemperatur aufweist. Hierfür hat sich der Begriff Rundkneten etabliert. Im warmen Schmiedebereich lässt sich der Werkstoff mit relativ geringen Umformkräften gut umformen, weshalb hierdurch Teile mit geringen Wanddicken realisiert werden können. Die dabei auftretenden Schmiedekräfte liegen niedriger als bei der Halbwarmumformung, jedoch tritt dabei als unerwünschter Nebeneffekt an der Oberfläche eine stärkere Zunderbildung auf.⁴⁴ Die höchsten Fertigungsgenauigkeiten weisen Teile auf, die durch Kaltumformung hergestellt werden. Diese können bereits nach dem Schmiedeprozess einbaufertig bearbeitet sein und weisen auch keine unerwünschten Zunderschichten auf. Nachteilig ist hier zu erwähnen, dass aufgrund der niedrigen Schmiedetemperaturen höhere Schmiedekräfte erforderlich sind und das Umformvermögen des Werkstoffes bei niedrigen Temperaturen gering ist. Wird das Schmieden hingegen bei höheren Temperaturen durchgeführt, so werden dafür niedrigere Schmiedekräfte benötigt und höhere Umformgrade realisiert.⁴⁵

Beim Schmieden ohne Werkstückvorwärmung lässt sich mithilfe eines Dornes das Aussehen des Innenprofils exakt zu steuern. Wird über diesen Dorn geschmiedet, der als Negativform das gewünschte Innenprofil abbildet, wird nicht nur die gewünschte Außenkontur sondern gleichzeitig auch die vorgegebene Innenkontur hergestellt. Damit werden z. B. für Langwaffen die im Lauf benötigten Züge und Felder hergestellt. Des Weiteren sind dabei die in Bild 7 dargestellten Profile möglich, sofern der Außendurchmesser des Teiles 50 mm nicht überschreitet.⁴⁶

Rundknetmaschinen (Bild 8) werden u. a. von der Firma Felss, Königsbach-Stein, hergestellt. Bei dieser beispielhaften Maschinenbauart wird der Hub der Hämmer durch eine Erhöhung realisiert, die an den Druckstößeln angebracht sind. Überrollen die Druckrollen die kurvenförmigen Überhöhungen am Druckstößel, so wird dadurch das Werkzeugsegment nach innen gedrückt und dadurch die Arbeitsbewegung der Hämmer erzeugt. Die Knetwelle ist angetrieben, wobei durch das Überrollen des Druckstößels durch die Rollen auch der

⁴² Weck & Brecher, 2005, S. 98-99

⁴³ SMS MEER, 2014, S. 14

⁴⁴ Weidel, 2013, S. 35

⁴⁵ Vollrath, 2011, S. 23-24

⁴⁶ Kalpakjian, et al., 2011, S. 472-473

Rollenkäfig in Rotation versetzt wird. Der äußere Ring (gelb) steht entweder still oder kann zusätzlich in beide Richtungen angetrieben werden. Die Rückwärtsbewegung der Werkzeugsegmente wird durch die Fliehkraft, hervorgerufen durch die Drehbewegung der Knetwelle, erzeugt.⁴⁷

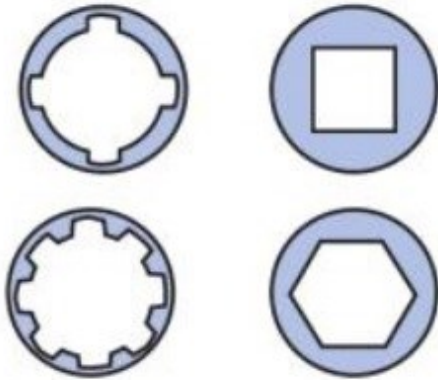


Bild 7: Beispielhafte Innenprofile beim Radialschmieden ohne Werkstückvorwärmung.⁴⁸

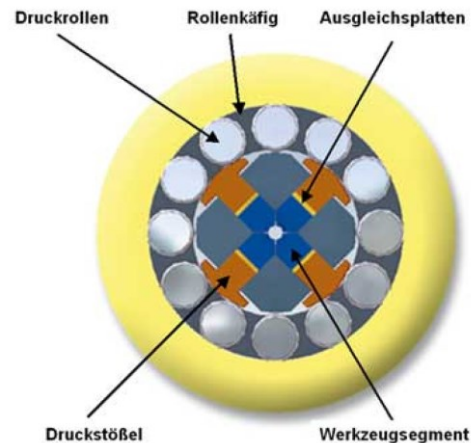


Bild 8: Prinzipieller Aufbau einer Rundknetmaschine.⁴⁹

Bei dieser Maschinenbauart erfolgt das Einstellen des Schmiededurchmessers nur über Platten (oder Keile), die zwischen den Stößeln und dem Werkzeug liegen. Da für diesen Maschinenbautyp meistens Öl als Gleit- bzw. Schmierstoff zur Anwendung kommt, ist er hauptsächlich für das Kaltumformen verwendbar. Dagegen wird bei einer anderen Bauart von Radialschmiedemaschinen, Typ SKK der Firma GFM, Steyr, die Auslenkung der Schmiedehämmer über eine elektrisch angetriebene Exzenterwelle gesteuert (Bild 9 links). Dabei laufen alle Hämmer durch eine mechanische Kopplung synchron zueinander. Deren Abstand zueinander und damit der zu schmiedende Werkstückdurchmesser wird durch einen programmierbaren Verstellmechanismus genau eingestellt. Dieser besteht aus einem Schneckengetriebe, einer Gewindehülse und einem Gewinde auf der Hammerwelle. Hiermit können Teile im kalten oder warmen Zustand geschmiedet werden. Eine andere Bauart, RF-Type, unterscheidet sich von der vorhin beschriebenen Variante dahingehend, dass hier zwischen dem Werkzeug und dem Exzenter keine mechanische Kopplung besteht. Zwischen diesen beiden Teilen erfolgt die Übertragung der Hubbewegung über einen ölbefüllten Raum (Bild 9 rechts). Dadurch erfolgt die Verstellung der Hämmer auf den jeweiligen gewünschten Schmiededurchmesser. Der Hub wird nicht mehr nur durch die Exzenterwelle vorgegeben, sondern über die Hydraulik gesteuert und ist über einen großen Bereich verstellbar. Für einen synchronen Hammerschlag sorgt auch hier ein Zahnradgetriebe, welches die

⁴⁷ Felss, 2005

⁴⁸ Kalpakjian, et al., 2011, S. 473

⁴⁹ Felss, 2005

Exzenterwellen miteinander verbindet.⁵⁰ Eine wiederum andere Bauart von Radialschmiedemaschinen der Firma SMS Meer arbeitet mit einem Hydraulikzylinder. Durch diesen werden kleine, schnelle Hubbewegungen erzeugt und die Zustellbewegung gesteuert. Ebenso wird die Frequenz geregelt, mit der die Hubbewegung durchgeführt wird.⁵¹

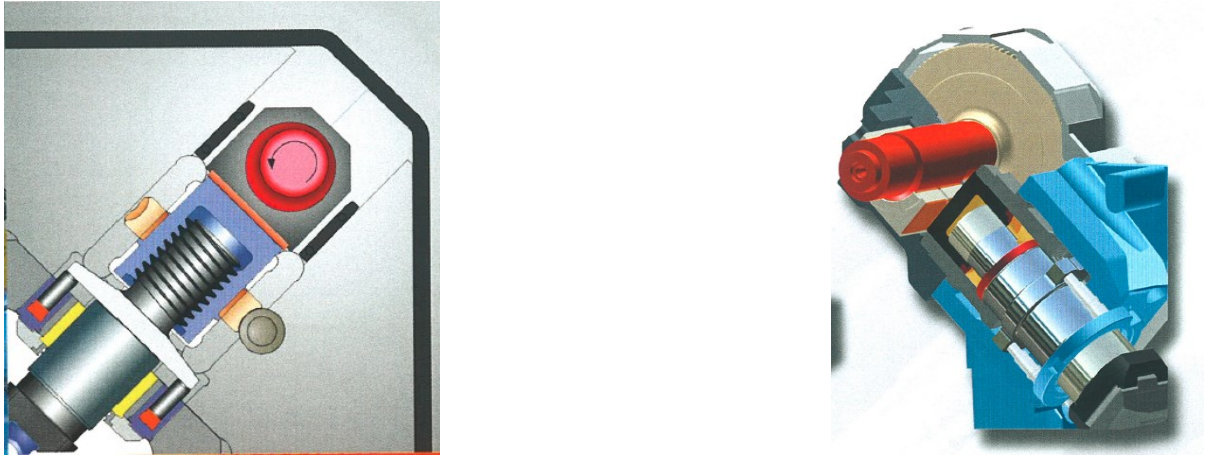


Bild 9: Prinzipieller Aufbau einer Radialschmiedemaschine des Typs SKK mit Exzenterwelle und mechanischer Verstellung des Schmiededurchmessers (links) und der Radialschmiedemaschine Type SF mit Exzenterwelle sowie hydraulischer Verstellung des Schmiedehubs und des Schmiededurchmessers (rechts).⁵²

2.6.6. Querkeilwalzen

Als Ausgangsmaterial wird ein kreisrundes Stangenmaterial verwendet, das erwärmt und den Walzen, wie im Bild 10 dargestellt, zugeführt wird. Das achsparallel zu den Walzen liegende Werkstück wird über zwei Führungsleisten immer genau auf einer bestimmten Position gehalten. Beim Walzvorgang führen die Walzen eine Rotation in gleicher Richtung aus.⁵³ Während dieses Umformvorganges rotiert das Werkstück gegensinnig um seine eigene Achse. Das umformende Werkzeug hat die Form eines Keiles und ist auf die Mantelfläche der Walze montiert.⁵⁴ Dieses verändert die Geometrie des Rohteils durch schrittweises Umformen des Außendurchmessers, wodurch es gleichzeitig zu axialer Materialverdrängung und damit zu einer Verlängerung des Werkstückes kommt. Da bereits nach einer einzigen Walzenumdrehung die Bearbeitung abgeschlossen ist, werden damit Taktzeiten von 2,5 bis 8 Sekunden erreicht.⁵⁵ Derzeit wird die Serienproduktion von Bauteilen mit diesem Walzverfahren bei einer Temperatur von ca. 1250 °C durchgeführt. Um die Oberflächenrauheit zu verbessern und die Maßabweichung der umgeformten Teile zu

⁵⁰ Wieser, 2005

⁵¹ SMS MEER, 2014

⁵² GFM, Steyr

⁵³ Lasco Umformtechnik Werkzeugmaschinenfabrik, 2012, S. 4

⁵⁴ Barnickel & Reissenweber, 2013, S. 2, 5

⁵⁵ Lasco Umformtechnik GmbH, 2013, S. 4

verringern, wird derzeit versucht, diesen Fertigungsprozess im halbwarmen Temperaturbereich durchzuführen.⁵⁶

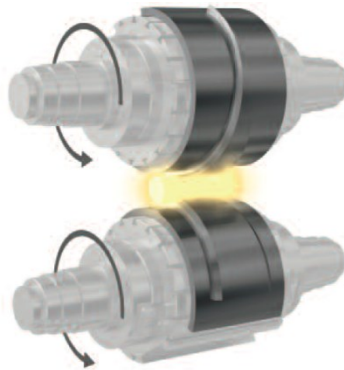


Bild 10: Prinzip des Querkeilwalzens.⁵⁷

Nach heutigem Stand der Technik sind durch das Querkeilwalzen keine Rohre (Hohlkörper) umformbar. Es eignet sich ausschließlich für massive Bauteile.

2.6.7. Bohrungsdrücken

Mit diesem Verfahren werden rotationssymmetrische Hohlkörper ausgehend aus einem Vollmaterial hergestellt. Die Umformung erfolgt, je nach benötigtem Umformgrad, von Raumtemperatur oder von höheren Werkstücktemperaturen aus. Da mit diesem Verfahren eine Werkstoffausnutzung von bis zu 90% erreicht wird, ist es auch sehr gut für die Bearbeitung von kostenintensiven Werkstoffen geeignet. Der prinzipielle Ablauf dieses Verfahrens ist im Bild 11 dargestellt. Als Ausgangsmaterial dient eine Vollwelle. Um diese sind radial Druckrollen angeordnet, die gleichzeitig eine radiale Zustellbewegung und axiale Vorschubbewegung durchführen. Überlagert werden diese Bewegungen mit der Drehbewegung des Werkstückes sowie des Stempels um die Werkstückachse. Hinzu kommt eine Bewegung des Stempels in axialer Richtung. Es kommt zum Fließen des Materials entgegengesetzt zur Vorschubrichtung, wodurch sich der gewünschte Hohlkörper ausbildet. Während des Umformvorganges kommt es im Bereich der Rollen infolge der freigesetzten Prozesswärme zu einer Temperaturerhöhung im Werkstück um bis zu 700 °C.⁵⁸

Dieses Verfahren ist nicht nur auf die Herstellung von Bauteilen mit runden Innenkonturen beschränkt. Der Stempel kann konstruktiv auch so gestaltet sein, dass der beim Umformvorgang entstehende Hohlraum das Profil eines Polygons, einer Keilwelle oder andere komplexen Geometrien annimmt. Die Größe der mit diesem Verfahren herstellbaren Teile hängt zum einen vom verwendeten Maschinentyp, zum anderen von der Temperatur ab, von

⁵⁶ Kache, et al., 2010, S. 3

⁵⁷ Lasco Umformtechnik Werkzeugmaschinenfabrik, 2012, S. 4

⁵⁸ Hoffmann, et al., 2012, S. 665-666

der aus der Umformprozess startet. Derzeit existiert weltweit nur eine Fertigungsmaschine, die nach diesem Prinzip arbeitet.⁵⁹

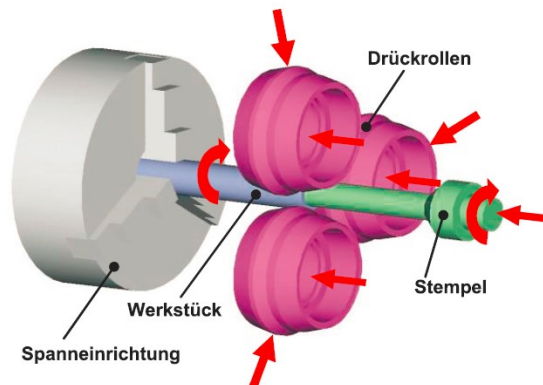


Bild 11: Prinzip des Bohrungsdrückens.⁶⁰

2.6.8. Innenhochdruckumformen (IHU)

Die Schutzrechtsanmeldung DE2003105074 von der Firma Porsche AG beschreibt, wie eine Getriebewelle mit dem IHU-Verfahren hergestellt wird. Hierzu wird zunächst im ersten Schritt aus einem Rohr mit dem IHU-Verfahren das Formteil der Hohlwelle hergestellt. Anschließend erfolgt das Nachbearbeiten jener Stellen, an denen sich die Lagerstellen befinden oder auf denen mithilfe des IHU-Verfahrens Anbauteile (z. B. eine Scheibe mit Außenverzahnung) mit der Hohlwelle kraftschlüssig verbunden werden sollen. Hierzu werden im zweiten Schritt die miteinander zu verbindenden Teile zusammen mit der Hohlwelle in den Unterkasten eingelegt. Nach dem Aufsetzen des Oberkastens ist das Umformwerkzeug verschlossen. Nun wird in das Innere des Formteiles eine Flüssigkeit mit hohem Druck geleitet. Dabei wird die Hohlwelle so stark verformt, dass sie an der Kastenform und den eingelegten Teilen komplett anliegt. Ist die Wanddicke nach diesem Prozessablauf noch zu dünn, so kann diese durch das Einschieben eines Rohres, welches sich dann durch das IHU-Verfahren mit seiner Außenfläche an die Innenfläche der Hohlwelle anlegt, vergrößert werden.⁶¹ Dennoch sind die Grenzen der Anwendbarkeit bei Wanddicken <10 mm zu sehen (gilt für Stahlwerkstoffe).

2.7. Andere Herstellverfahren für Halbzeuge für Getriebewellen

2.7.1. Gießen von Getriebewellen im Sandguss

Ein etabliertes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Hohlkörpern ist das Sandgießen. In der industriellen Fertigung werden die dafür benötigten Formhälften vollautomatisch hergestellt. Diese Formen bestehen im Regelfall aus zwei Teilen, zwischen denen zur Ausbildung des Hohlraums ein Kern bzw. ein Kernpaket gelegt wird. Die Kerne müssen in der Form gut

⁵⁹ Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2013

⁶⁰ Hoffmann, et al., 2012, S. 666

⁶¹ Kluge, 2015

gelagert sein.⁶² Um diese bei komplexen Innengeometrien zu versteifen oder um sie nach dem Gießen leichter aus dem Hohlraum zu entfernen, sind in den Sandkern manchmal Einlagen eingearbeitet (z. B. Drähte).⁶³ Liegt die Teilungsebene in horizontaler Richtung, so wirkt während des Gießvorganges auf den Oberkasten eine Auftriebskraft, die mit der Gleichung (5) beschrieben wird.

$$F_A = g \cdot A_p \cdot \rho_F \cdot h \quad [N] \quad (5)$$

Dabei wirkt auch auf den Kern eine Auftriebskraft, die durch die folgende Gleichung (6) beschrieben wird.⁶⁴

$$F_K = g \cdot V_K \cdot \rho_F \quad [N] \quad (6)$$

Eine weitere Variante, die in der Schutzrechtsanmeldung DE1998133594 beschrieben ist, verwendet verlorene Kunststoffformen zur Herstellung von gegossenen, hohlen Nockenwellen (Lost-Foam-Verfahren). Dieses Verfahren ist so ausgelegt, dass die gegossenen Teile nur ein sehr kleines Aufmaß für die Nachbearbeitung erfordern und dass damit eine Vielzahl von Teilen in einem einzigen Gießvorgang auf einmal hergestellt werden können.⁶⁵

Im der Schutzrechtsanmeldung DE1996153668 wird ein alternativer Verfahrensablauf vorgestellt, bei dem mit einem Niederdruckgussverfahren Hohlkörper hergestellt werden können. Dabei wird zunächst das flüssige Metall in eine Gussform gegossen. Ist die Schmelze im Bereich der Formwände erstarrt, wird das überschüssige, noch flüssige, Metall abgelassen. Dadurch entsteht ein dünnwandiges Gussteil mit einem Hohlraum.⁶⁶

2.7.2. Hohlwellen aus mehreren Einzelsegmenten zusammengebaut

Aus der Schutzrechtsanmeldung DE200610016099 ist ein Verfahren bekannt, durch welches eine komplette Getriebewelle aus mehreren Wellensegmenten zusammengebaut wird. Dabei muss auf mindestens zwei Teilen eine Außenverzahnung vorgesehen sein. Die einzelnen Teile werden erst dann miteinander verbunden, wenn sie komplett fertigt bearbeitet sind. Die Verbindung der einzelnen Teile erfolgt durch einen Reibschweißprozess an den dafür vorgesehenen Fügstellen.⁶⁷

⁶² Klein, 2010

⁶³ Padovan, et al., 2009

⁶⁴ Fritz, et al., 2015, S. 14

⁶⁵ Basler, 2000

⁶⁶ Hopf, et al., 1998

⁶⁷ Diekmann, et al., 2006

2.7.3. Abgestufte Hohlwelle durch Schleudergießen hergestellt

Im der Schutzrechtsanmeldung DE200810021906 wird ein Verfahren beschrieben, durch das eine Hohlwelle mit ungleichmäßig verlaufendem Innendurchmesser hergestellt wird. Die Außenform der Welle wird hier nicht durch die Kokille vorgegeben, sondern durch die Aneinanderreihung von Rohrsegmenten und Blechscheiben, welche in eine Hälfte der zweigeteilten Kokille eingelegt werden. Durch das Montieren der zweiten Kokillenhälfte werden die Einzelteile komplett von der Kokille umschlossen, die auf beiden Seiten je eine zylindrische Öffnung hat. Über eine dieser Öffnungen wird ein Rohr bis knapp zur gegenüberliegenden Öffnung eingeführt, über das die Schmelze in die Kokille gegossen wird. Während des Gießvorganges dreht sich die Kokille. Dabei wird das Rohr von der einen zur anderen Seite des Hohlraumes, durch die Kokille hindurch, mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit bewegt.⁶⁸

2.8. Unwucht bei Getriebewellen

Teile von Maschinen, welche im Wesentlichen eine zylindrische Geometrie aufweisen und sich beim Rotieren über Lagerstellen abstützen werden als Rotoren bezeichnet. Nicht homogenes Werkstoffgefüge, fertigungs- und montagebedingte Einflüsse, sowie belastungsbedingte Verformungen bewirken eine unsymmetrische Massenverteilung bezogen zur Drehachse; es kommt zur Ausbildung einer Unwucht. Durch diese entstehen während der Drehbewegung Fliehkräfte, durch welche die Lagerstellen zusätzlich zu den Betriebskräften belastet werden.⁶⁹ Es wird zwischen dem starren und dem elastischen Rotor unterschieden. Ein elastischer Rotor erfährt durch die Drehzahl eine Verformung, durch die sich auch sein Auswuchtzustand ändert.⁷⁰ Er wird als starr bezeichnet, wenn seine Durchbiegung bis zum Erreichen der Betriebsdrehzahl nur Werte annimmt, die gegenüber der geforderten Unwucht-toleranz vernachlässigbar klein sind.⁷¹ Die für diesen Fall zusätzlich auftretenden Lagerkräfte ist die im Schwerpunkt angreifende Fliehkraft verantwortlich. Die Größe dieser Kraft ist abhängig von der Exzentrizität ε , der Masse m und der Winkelgeschwindigkeit ω und wird mit der Gleichung (7) bestimmt:⁷²

$$F = \frac{\varepsilon}{1000} \cdot \frac{m}{1000} \cdot \omega^2 \quad [N] \quad (7)$$

⁶⁸ Kluge & Schmid, 2008

⁶⁹ Berger, 1998, S. 216ff

⁷⁰ Dresig & Holzweißig, 2006, S. 151

⁷¹ Schneider, 2013, S. 74

⁷² Gasch, et al., 2006, S. 6-7

Die Wuchtheit eines Körpers wird durch die Exzentrizität ε beschrieben, die von der Gesamtmasse m des Körpers unabhängig ist und mit der Gleichung (8) beschrieben wird. Das darin enthaltene U steht für die gesamte Unwucht des Bauteiles.⁷³

$$\varepsilon = \frac{U}{m} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

Die Unwucht \vec{U} ist definiert als die Unwuchtmasse u mal dem Abstand \vec{r} des Schwerpunktes zur Drehachse des Schaftes (Gleichung (9)).

$$\vec{U} = u \cdot \vec{r} \quad [\text{g} \cdot \text{mm}] \quad (9)$$

Die tolerierte, spezifische Restunwucht ist mit der Gleichung (10) definiert.

$$\varepsilon_{\text{zul}} = \frac{U_{\text{zul}}}{m} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

Zur Definition der maximal zulässigen Restunwucht für eine Maschinenkomponente haben sich verschiedene Vorgehensweisen bewährt. Die am häufigsten verwendete Methode ist eine Tabelle, die anhand von Erfahrungswerten eine bestimmte Gütestufe für bestimmte Bauteile empfiehlt.⁷⁴ Die dort angegebenen Auswucht-Gütestufen für starre Rotoren sind definiert als $\varepsilon_{\text{zul}} \cdot \omega$, wobei ω für die Betriebswinkelgeschwindigkeit der Maschinenkomponente steht. Die in der DIN ISO 1940-1:2004 vordefinierte kleinste Gütestufe ist 0,4. Die darauf folgenden Stufen sind jeweils um den Faktor 2,5 größer und haben als Einheit [mm/s]. Die größte Gütestufe hat den Wert von 4000 mm/s. Für bestimmte Anwendungen gibt es auch kleinere Abstufungen. Laut der in der DIN ISO 1940-1 gezeigten Tabelle 7.1 wird empfohlen, dass für Antriebswellen die Auswuchtgütestufe G16 angestrebt werden soll.⁷⁵

2.8.1. Wuchten

Beim Wuchten wird durch das Erhöhen oder Verringern der Masse an geeigneten Stellen die Unwucht weitestgehend reduziert. Dies kann entweder durch Einbringen von Bohrungen oder durch Hinzufügen von Ausgleichsmassen erfolgen.⁷⁶ Hat der zu wuchtende Rotor die Form einer Scheibe, so muss dieser nur in einer Ebene ausgewuchtet werden. Hier ist es irrelevant, ob das Auswuchten statisch oder dynamisch erfolgt. Überschreitet jedoch das Verhältnis seiner Länge zum Durchmesser einen bestimmten Wert, so ist ein dynamisches Auswuchten in zwei Ebenen erforderlich. Würde hier die Unwucht nur statisch in einer Ebene ausgeglichen werden, so entsteht bei der Rotation des Rotors eine Momentenunwucht.⁷⁷

⁷³ Dresig & Holzweißig, 2012, S. 155ff

⁷⁴ Schneider, 2013, S. 77ff

⁷⁵ Deutsches Institut für Normen, 2004

⁷⁶ Brommundt & Sachau, 2014, S. 41

⁷⁷ Reutlinger & Klump, 2013, S. 173

2.9. Richten

Zu den Bauteilen, bei denen das Richten unerlässlich ist, zählen Antriebs- und Getriebewellen, die nach der Wärmebehandlung einen Verzug aufweisen. Wird z. B. eine Welle nach dem Härten nicht gerichtet, sondern unmittelbar nach der Wärmebehandlung fein- bzw. fertigtbearbeitet, so besteht die Gefahr, dass stellenweise beim Schleifen die komplette Härteschicht abgetragen wird.⁷⁸

Grundsätzlich wird zwischen dem Biege- und Walzrichten unterschieden. Beim manuellen Biegerichten einer Getriebewelle wird diese beidseitig drehbar gelagert. Während des Verdrehens der Welle wird an mehreren Achspositionen der Verzug („Schlag“) der Welle mit Hilfe von Wegmesssystemen gemessen. Abhängig von diesem Messergebnis wird die Welle mit einem frei positionierbaren Pressstößel geradegebogen und dabei dem „Schlag“ entgegengerichtet leicht plastisch verformt. Dabei liegen die Messwertaufnehmer kontinuierlich am Bauteil an. Um einen Bruch des Werkstückes beim Richten zu vermeiden, muss der Richtvorgang stufenweise, mit mehreren kleinen Hüben, erfolgen. Für Serienteile, die in großer Stückzahl hergestellt werden, erfolgt das Richten vollautomatisch.⁷⁹ Dazu hat bspw. die Firma MAE, Erkrath, eine voll automatisierte Anlage mit einem Lasermesssystem und einem Roboter ausgestattet. Die Handhabung der zu richtenden Teile wird durch den Roboter ausgeführt und die Bauteilgeometrie mit einem Lasermesssystem gemessen.⁸⁰ Die damit erreichbare Geradheit beim Richten liegt bei 10 µm. Während des Richtens wird durch ein eingebautes akustisches Messsystem (Mikrofon) das Werkstück auf Rissbildung überprüft. Schadhafte Teile werden automatisch ausgesondert.⁸¹ In der Großserienfertigung von massiven Getriebehauptwellen beträgt der Richtausschuss bis zu 5 %.

Für das Richten von Profilen, rundem Stangenmaterial und rohrförmigen Erzeugnissen wird das Walzrichten herangezogen. Dabei wird das zu richtende Material kontinuierlich durch zwei oder mehrere Walzen gezogen. Beim Richten von stangenförmigem Material führt der Stab während des Walzens zusätzlich eine Rotationsbewegung um seine eigene Achse aus. Die dafür konzipierten Maschinen sind meistens mit zwei oder drei gesteuerten Maschinenachsen ausgestattet. Soll hingegen ein blechförmiges Material gerichtet werden, so wird hierfür eine Maschine mit einer Vielzahl von Walzen benötigt, um das Blech durch mehrmaliges Auf- und Abbiegen stufenweise geradezubiegen.⁸²

⁷⁸ Thiel, 1988

⁷⁹ Weck & Brecher, 2005, S. 312-314

⁸⁰ Maschinen- und Apparatebau Götzen GmbH, 2013

⁸¹ Maschinen- und Apparatebau Götzen GmbH, 2013

⁸² Pöhlandt, et al., 1990, S. 295ff

2.10. Ungelöste Herausforderungen für hohle Getriebewellen

2.10.1. Hochtemperaturkorrosion

Kommt es bei metallischen Werkstoffen bei erhöhten Temperaturen zu einer oberflächennahen Oxidation, so wird dies Hochtemperaturkorrosion genannt.⁸³ Dabei tritt eine Reaktion zwischen dem Werkstückwerkstoff und dem ihn umgebenden Gas auf. An der Oberfläche des Werkstoffes bildet sich eine Zunderschicht. Der Grad dieser Hochtemperaturkorrosion wird entweder über die Messung der dabei auftretenden Gewichtsänderung oder über die Messung der Dicke der Zunderschicht aus Schliffbildern bestimmt werden.⁸⁴ Beim Schmelgießen, Schmieden und beim Härten reagiert das Eisens mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft kommen (siehe Beziehung (11)). Dabei entsteht ab einer Temperatur von 500 °C eine Zunderschicht, die hauptsächlich aus Magnetit Fe_3O_4 besteht.⁸⁵ Diese und die zweite dabei auftretende Schicht, Hämatit, sind bei Temperaturen bis 570 °C stabil.⁸⁶



Bei Temperaturen von über 570 °C kommt es, wie im Bild 12 dargestellt, zur Ausbildung einer dreischichtigen Zunderschicht. Die erste Schicht liegt direkt an der Metalloberfläche, wird Wüstit genannt und weist die größte Dicke auf. Darauf folgt eine Schicht aus Magnetit und anschließend eine aus Hämatit. Die Bildung der Zunderschicht kann durch das Legieren des Stahls mit Chromzusätzen verringert werden. Das Bild 13 zeigt den Einfluss der Temperatur und des Chromgehaltes auf die Zunderbildung. Je höher die Temperatur ist, umso schneller wächst die Zunderschicht.⁸⁷

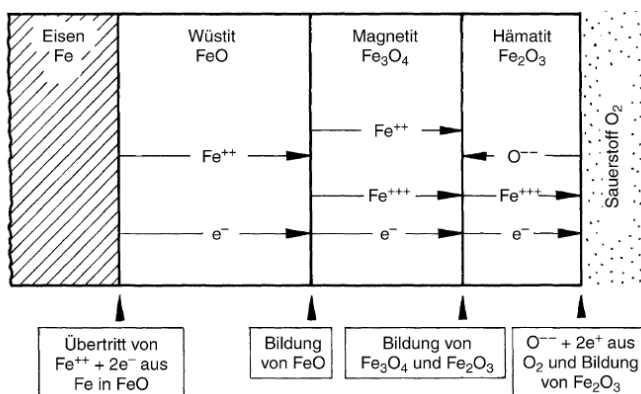


Bild 12: Zunderbildung an Eisen bei Temperaturen über 570°C.⁸⁸

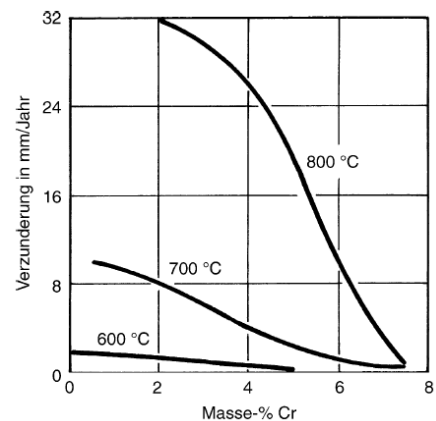


Bild 13: Einfluss des Cr-Gehaltes auf die Verzunderung eines C15 Stahls.⁸⁹

⁸³ Deml, et al., 2014, S. 230

⁸⁴ Böllinghaus, et al., 2014, S. E111

⁸⁵ Briehl, 2008, S. 113

⁸⁶ Bertrand, et al., 2004

⁸⁷ Macherauch & Zoch, 2011, S. 412 ff

⁸⁸ Macherauch & Zoch, 2011, S. 412

⁸⁹ Macherauch & Zoch, 2011, S. 413

Liegt der Chromgehalt bei mindestens 13%, so wird dadurch nicht nur die Zunderbeständigkeit des Werkstoffes erhöht, sondern auch seine Korrosionsbeständigkeit. Oft werden chromlegierte Stähle zusätzlich auch mit Molybdän legiert, wodurch sich die Zunderbeständigkeit weiter verbessert.⁹⁰

Für die Beschreibung des Wachstums der Zunderschicht existieren unterschiedliche Ansätze. Mit dem logarithmischen Oxidationsgesetz für niedrige Temperaturen lässt sich das Oxidwachstum an der Metalloberfläche, die auch Legierungselemente enthalten kann, beschreiben. Dagegen wird für höhere Temperaturen, wie sie auch beim Schmieden auftreten, wird das Schichtwachstum durch das parabolische Oxidationsgesetz charakterisiert. Darin ist berücksichtigt, dass mit zunehmender Dicke der Zunderschicht sich deren Wachstum verlangsamt. Zur Beschreibung der durch die Zunderschicht hervorgerufenen Änderung der Masse nimmt dieses Gesetz die folgende Form an (Gleichung (12)).

$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right)^2 = k_p \cdot t \quad [\text{kg}^2 \text{m}^{-4}] \quad (12)$$

Die Konstante k_p ist abhängig von der Temperatur und kann entweder über die Beziehung (13) ermittelt oder aus der Tabelle 1 herausgelesen werden.

$$k_p = k_{p0} \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \quad [\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^{-1}] \quad (13)$$

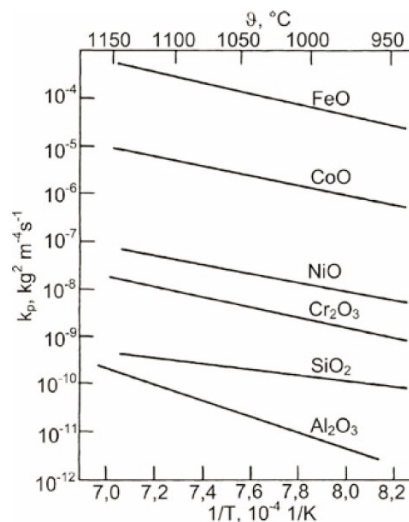


Tabelle 1: Parabolische Oxidationskonstante für bestimmte Metalle in Abhängigkeit von der Temperatur.⁹¹

Soll hingegen die Dicke der Zunderschicht ermittelt werden, so nimmt das parabolische Gesetz die folgende Form an (Beziehung (14)):

$$s^2 = k'_p \cdot t \quad [\text{m}^2] \quad (14)$$

⁹⁰ Wegst & Wegst, 2010, S. 4-6

⁹¹ Maier, et al., 2015, S. 256

Die darin enthaltene parabolische Oxidationskonstante k'_p , die sich auf die Dicke der Zunderschicht bezieht, wird aus der Konstante k_p durch das Umrechnen mit der Beziehung (15) ermittelt.

$$k'_p = k_p \left(\frac{M_{Ox}}{\rho_{Ox} \cdot b \cdot M_O} \right)^2 \quad [\text{m}^2\text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Die auftretende Zunderschicht kann sowohl geschlossen als auch porös sein. Folgt das Wachstum der Zunderschicht dem parabolischen Gesetz, so liegt eine geschlossene Zunderschicht vor. Da diese isolierend wirkt, hemmt sie mit zunehmender Schichtdicke immer stärker die Zunderneubildung. Bei einem linearen Zuwachs der Zunderdicke ist die Schicht porös. Welche dieser beiden Schichtformen vorliegt, wird durch das Pilling Bedworth Verhältnis beschrieben. Ist der Wert dieser Zahl <1 , so ist die Schicht porös.⁹² Liegt das Pilling Bedworth Verhältnis im Bereich zwischen 1 und 3 ($1 < R_{PB} < 3$), so bildet sich eine Schicht mit guter Schichthftung aus. Für Werte größer als 3 ($R_{PB} > 3$) platzt die neu gebildete Zunderschicht kontinuierlich von der Oberfläche ab.⁹³ Der Pilling Bedworth-Faktor R_{PB} (Beziehung (16)) ist definiert als das Verhältnis der Molekularmasse des Oxids zur Oxiddichte, dividiert durch das n-fache Verhältnis der Molekularmasse des Metalls zur Dichte des Metalls. Der Faktor n ist definiert als die Anzahl der Metallatome pro Sauerstoffmolekül.⁹⁴

$$R_{PB} = \frac{\frac{M_{Oxid}}{\rho_{Oxid}}}{n \frac{M_{Metall}}{\rho_{Metall}}} \quad [-] \quad (16)$$

Beim Schleudergießen von dickwandigen Rohren als Ausgangsmaterial für hohle Getriebehaupwellen tritt beim Abkühlen des Gussteils Hochtemperaturkorrosion auf.

2.10.2. Oxidation beim Schmieden und Erwärmen

Die Erwärmung der Guss- bzw. Schmiedeteile erfolgt in einem Ofen, der elektrisch oder mit fossilen Brennstoffen beheizt wird. Dabei können die Geometrie und der Werkstoff des Werkstückes die Einhaltung eines bestimmten Temperaturverlaufs erfordern. Wird die vorgegebene Temperaturführung nicht eingehalten, dann kommt es bei zu schneller Erwärmung zu großen Temperaturunterschieden im Inneren des Werkstückes. Dadurch wird die Ausbildung von Rissen begünstigt. Die Erwärmung des Guss- bzw. Schmiedeteils unter Schutzgasatmosphäre kann die Zunderbildung nicht vollständig verhindern. Der Werkstoff, die Gaszusammensetzung und die Dauer der Wärmebehandlung bei hoher Temperatur beeinflussen das Ausmaß der Zunderbildung. Die Erwärmung des Werkstückes ist nicht nur mit dem zuvor beschriebenen konvektiven Verfahren sondern auch mit einem induktiven

⁹² Maier, et al., 2015, S. 252ff

⁹³ Werner, et al., 2016, S. 313-314

⁹⁴ Mc Cafferty, 2010, S. 234-236

Verfahren möglich.⁹⁵ Zur Erwärmung von stangenförmigen Materialien können auch Anlagen herangezogen werden, die auf konduktiver Basis arbeiten. Dazu wird das Werkstück zunächst an dessen Enden an Kontakten eingespannt, um über diese Strom durch das Bauteil zu leiten. Im Stromkreis ist es als Widerstand geschaltet. Nach dem ohm'schen Gesetz erwärmt der Stromdurchfluss das Bauteil. Die dadurch maximal erzielbare Erwärmungstemperatur hängt von der Größe des Bauteils ab. Je größer es ist, umso niedriger wird die erzielbare Temperaturerhöhung. Das Verhältnis des Durchmessers zur Länge beeinflusst den Temperaturverlauf im Inneren des Werkstückes.⁹⁶ Diese Erwärmungsart ist beschränkt auf elektrisch leitfähige Werkstoffe und sehr wirtschaftlich, da nur 5 bis 15 % der eingesetzten, elektrischen Leistung als Wärmeverlust verloren geht.⁹⁷ Eine weitere Variante, mit der ein umzuformendes Werkstück schnell auf die Schmiedetemperatur gebracht werden kann, ist die Verwendung von induktiven Erwärmungsanlagen. Dabei bewegt sich das Bauteil durch eine Spule mit einer Windung, die das Bauteil nicht komplett abdeckt, oder einer Spule mit mehreren Windungen, die es komplett umschließt. Dabei induziert die Spule, ohne Berührung, Wirbelströme in das Bauteil, das dabei erwärmt wird. Die Induktionsanlage kann so aufgebaut sein, dass eine Zwischenerwärmung zwischen mehreren Umformstufen möglich ist.⁹⁸

2.11. Verfahren zur Erkennung der Zunderschicht

Eine Zunderschicht von einer blanken Metalloberfläche zu unterscheiden, ist derzeit nur unmittelbar durch das menschliche Auge des Prüfers möglich. Um hier eine sichere Aussage darüber treffen zu können, ist viel Erfahrung nötig. Momentan gibt es ein noch kein serien-erprobtes Verfahren, das eine vollautomatische Bewertung der Zunderschicht ermöglicht.

Mit einem neu entwickelten Verfahren, das nur unter Laborbedingungen getestet wurde, kann die kalte Metalloberfläche auf das Vorhandensein einer Zunderschicht überprüft werden. Dabei wird der zu untersuchende Oberflächenbereich mit einem Kurzpuls laser beaufschlagt und die Intensität des reflektierten Strahles gemessen. Das Verfahren nutzt das unterschiedliche Reflexionsvermögen der blanken Edelstahloberfläche gegenüber der Zunderschicht aus. Das Bild 14 zeigt das unterschiedliche Reflexionsvermögen der beiden vorhin genannten Oberflächentopografien, welches über der Wellenlänge aufgetragen ist. Diese Darstellung zeigt, dass die Reflexion der blanken Edelstahloberfläche immer größer als die der verzunderten Oberfläche ist. Das Ergebnis einer damit durchgeführten Untersuchung zeigt helle (zunderfreie) und dunkle (zunderbehaftete) Bereiche. Durch die geeignete Wahl der Wellenlänge des dabei verwendeten Lasers wird dieser Unterschied besser oder

⁹⁵ Klocke & König, 2006

⁹⁶ Blum, et al., 2002, S. 319

⁹⁷ Baake, et al., 1992, S. 238-239

⁹⁸ Kegel, 1961, S. 3ff

schlechter dargestellt. Im Bild 15 ist ersichtlich, dass die Standardabweichung im Bereich von 250 bis 750 nm gering und nahezu konstant ist. Bei genauerer Betrachtung der Differenz der verlaufenden Kurve in Richtung steigender Wellenlänge im Bild 15 zeigt sich, dass bei einer Wellenlänge von 650 nm der erste Peak der Reflexionsdifferenzen auftritt. Deshalb ist ein Laser im grünen Wellenlängenbereich für diese Untersuchungsmethode optimal. Ein mit einem solchen Laser erhaltenes Bild der kalten Metalloberfläche zeigt das Bild 16. Darin stellen die mit blauen Kreisen markierten, dunklen Stellen verzünderte Bereiche der Oberfläche dar. Die hellen Stellen zeigen die blanke Metalloberfläche.⁹⁹

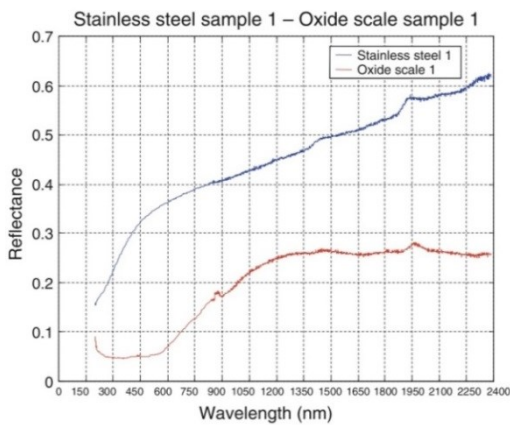


Bild 14: Reflexionsvermögen der Edelstahl- und Zunderoberfläche.¹⁰⁰

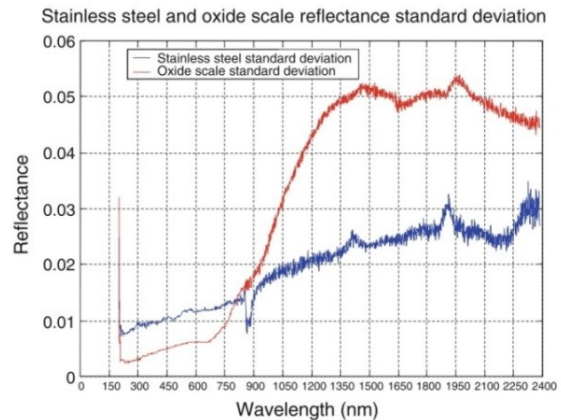


Bild 15: Standardabweichung des Reflexionsvermögens der Edelstahl- und Zunderoberfläche.¹⁰¹

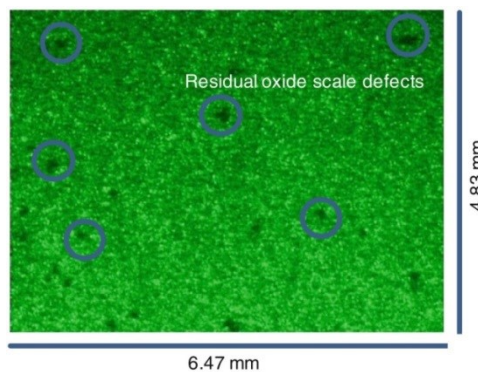


Bild 16: Detektion der Zunderschicht mit grünem Laser.¹⁰²

2.12. Automatische Erkennung von Oberflächenfehlern in zylindrischen Bohrungen

Ein derzeit auf dem Markt erhältliches Gerät der Firma Jenoptics, Villingen-Schwenningen, untersucht im automatischen Ablauf die Oberfläche von Bohrungen auf fehlerhafte Stellen und unterscheidet zwischen unterschiedlichen Fehlerarten. Zu den detektierbaren Fehlern

⁹⁹ Martin, et al., 2010, S. 653 ff

¹⁰⁰ Martin, et al., 2010, S. 655

¹⁰¹ Martin, et al., 2010, S. 655

¹⁰² Martin, et al., 2010, S. 661

zählen Risse, Lunker und Porositäten, die sich unmittelbar an der Bohrungsoberfläche befinden. Hierzu durchfährt eine 360°-Optik (CCD-Ringsensor) die zu untersuchende Bohrung und nimmt dabei kontinuierlich Bilder von der Oberfläche auf. Die aufgenommenen 360°-Bilder (Panorama-Aufnahmen) werden dann über eine Software umgerechnet und zu dem im Bild 17 dargestellten Bild der Bohrung zusammengesetzt. Der dunkelste Bereich stellt einen Lunker an der Oberfläche dar. Da die Scanrate des dabei verwendeten ringförmigen Sensors sehr hoch ist, werden damit kurze Taktzeiten erreicht. Die maximal mögliche Bohrungstiefe mit einem Gerät der Baugröße IPS10 beträgt 465 mm. Dabei darf der zu untersuchende Durchmesser in einem Durchmesserbereich von 14 bis 50 mm liegen. Die Fokussierung erfolgt rechnerisch. Das Bild 17 zeigt das Untersuchungsergebnis einer beispielhaften Kolbenbolzenbohrung, in der ein Riss gefunden wurde. Zudem sind dort weitere Bauteile dargestellt, die mit einem solchen Messgerät unter Großserienbedingungen untersucht werden.¹⁰³

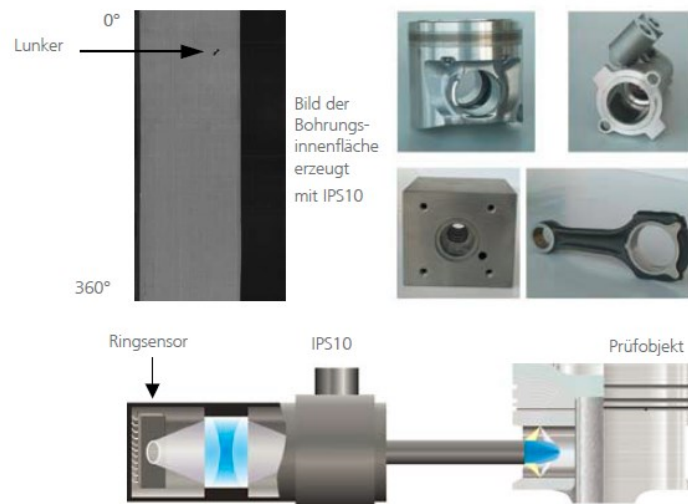


Bild 17: Hommel IPS10: Arbeitsweise; Untersuchungsergebnis der Bohrung eines Kolbens mit einem Lunker als erkannte Fehlerquelle (dunkler Strich); Beispiele, bei welchen Komponenten diese Untersuchung durchgeführt wird.¹⁰⁴

Für größere Durchmesserbereiche ist die Baugröße IPS 100 erhältlich. Damit wird der Durchmesserbereich von 75 bis 110 mm, ohne Limitierung der Bohrungstiefe, abgedeckt. Benötigt wird ein solcher Durchmesserbereich zur Untersuchung der Bohrungen von Getriebegehäusen, Zylinderbuchsen, u.a.¹⁰⁵

¹⁰³ Jenoptik AG, 2009

¹⁰⁴ Jenoptik AG, 2009, S. 2

¹⁰⁵ Jenoptik AG, 2009

2.13. Verfahren zur Beseitigung der Zunderschicht

2.13.1. Durchfließbläppen

Das Werkstück wird an der zu bearbeitenden Öffnung auf beiden Seiten zwischen zwei Zylindern eingespannt. Diese beiden Zylinder sind durch jeweils einen beweglichen Kolben nach außen abgeschlossen. Im Zwischenraum befindet sich das Arbeitsmedium, welches durch die gegenseitige Verschiebung der Kolben zwischen den beiden Zylindern hin und her gepumpt wird. Dabei bewegt sich das abrasive Arbeitsmedium durch das Werkstück hindurch und trägt dabei von dessen Oberfläche Material ab.¹⁰⁶

Werkstücke mit komplizierten Innengeometrien werden bei diesen Verfahren auch mit mehreren Zylindern bearbeitet. Dabei werden die Kolben der verschiedenen Zylinder unabhängig voneinander gesteuert. Eine andere Variante dieses Verfahrens wird zur Reinigung von Heißkanalsystemen herangezogen. Dabei wird das abrasive Medium nur mit einem Kolben durch den zu reinigenden Bereich gedrückt. Anschließend fließt es, durch die Wirkung der Schwerkraft, wieder zurück in den Zylinder.¹⁰⁷ Das für den Materialabtrag verwendete, abrasive Medium besteht aus zwei verschiedenen Bestandteilen. Zum einen, zwischen 25 % bis 95 % Volumprozent aus einem viskoelastischen Material, das als Träger für das abtragende, feste Material dient. Zum anderen Teil aus einem Schleifmittel (z. B. Aluminiumoxid, Siliziumoxid), welches das Material von der Oberfläche des Bauteiles abträgt. Da nur das Schleifmittel fest, das Trägermaterial aber verformbar ist, kann sich dieses Medium sehr gut an die Kontur des Werkstückes anlegen. Hier wird mit Arbeitsdrücken von 7 bis 220 bar gearbeitet.¹⁰⁸ Der Materialabtrag ist bei diesem Verfahren nicht genau steuerbar und ist an den Stellen, wo der größte Strömungswiderstand auftritt, am höchsten.¹⁰⁹ Die Abtragsleistung und die damit verbundene erreichbare Verbesserung der Oberfläche, hängt von der Härte des abzutragenden Materials und von der anfänglichen Oberflächenbeschaffenheit ab. Verwendung findet es beim Entgraten, Polieren, Abrunden von Kanten und zur Einbringung von Druckeigenspannungen in die Oberfläche.¹⁰⁶

Mit dieser Technologie lassen sich Hohlräume nachbearbeiten, die mit anderen Verfahren unerreichbar oder nur schwer erreichbar sind. Es besteht auch die Möglichkeit, mehrere Bauteile auf einmal mit diesem Verfahren zu bearbeiten.¹¹⁰ Der Hohlraum bei der in dieser Arbeit betrachteten Getriebehauptwelle weist eine komplexe Innengeometrie mit extremen Durchmesserschwankungen auf. Deshalb war die Anwendung dieses Verfahrens bei dieser Getriebekomponente nicht möglich.

¹⁰⁶ Jain, et al., 1999, S. 242-243

¹⁰⁷ Kennametal, 2008

¹⁰⁸ Manjot, et al., 2012, S. 1950-1951

¹⁰⁹ Maag, 2003, S. 21

¹¹⁰ Smith & Slaughter, 1997

2.13.2. Beizen

Die chemische Zusammensetzung der vorliegenden Zunderschichten, deren Dicke und ob diese porös sind oder nicht, haben einen starken Einfluss auf die Beizbarkeit durch Beizen. Die Dicke der betrachteten Schichten variiert zwischen 5 und 50 µm. Zudem haben die Haftfestigkeit des Zunders an der Oberfläche, mögliche Oberflächenfehler oder die im Material vorhandenen Eigenspannungen einen Einfluss. Je nach dem Aufbau der Zunderschicht ist diese besser oder schlechter mit chemischen Verfahren lösbar. Sie ist mehrschichtig und besteht in der Regel aus verschiedenen Zunderarten, die verschiedene Dicken aufweisen. Der Aufbau der Zunderschicht und die Zunderschichtarten werden durch mehrere Faktoren beeinflusst. Dazu zählt die Legierungszusammensetzung des Stahles und wie lange er bei welchen Temperaturen der Atmosphäre ausgesetzt war. Besteht eine Zunderschicht aus Hämatit, die keine Oberflächenrisse aufweist und durch die keine Säure eindringen kann, so ist ohne vorherige, mechanische Vorbehandlung eine Entzunderung nicht möglich. Die anderen möglichen Zunderschichtenarten, die eine poröse Oberfläche aufweisen, ermöglichen das Eindringen der Säure in tiefere Schichten. Dadurch ist bei diesen eine Entzunderung mit einer Beize möglich. Vor dem Beizvorgang muss die Oberfläche frei von Fetten und anderen Verunreinigungen sein. Eine vorangehende Reinigung und Entfettung ist unerlässlich. Je nach Ausführung des Beizvorganges wird nach folgenden Beizarten unterschieden:

Tauchbeizen

Dabei wird das Bauteil, mit einem Korb oder einem anderen Hilfsmittel, in ein Beizbad eingehängt. Das flüssige Beizmittel wird mit Hilfe von Pumpen, Druckluft oder anderen Hilfsmitteln in Bewegung versetzt. Ist das Beizmedium hingegen in Ruhe, so kann der Korb mit dem eingelegten Werkstück in Bewegung versetzt werden. Durch die auftretende Relativbewegung zwischen dem Beizmittel und dem zu bearbeitenden Werkstück (Umströmung) wird das erzielbare Bearbeitungsergebnis verbessert.

Kontinuierliches Beizen

Hierbei wird das zu beizende Werkstück durch einen Behälter gezogen, der mit der Beizflüssigkeit gefüllt ist. Um die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Werkstück und dem Beizmittel zu erhöhen, wodurch sich die Beizezeit verkürzt, kann das Beizmedium auch zwischen mehreren Behältern hin und hergepumpt werden.

Elektrolytisches Beizen

Hier wird beim Beizen zur Unterstützung ein Stromkreis zwischen dem Werkstück und der im Beizbad angeordneten Elektroden geschaltet. Damit verkürzt sich die Behandlungszeit erheblich. Die Beizgeschwindigkeit wird über die Wahl der Stromstärke eingestellt. Das zu beizende Werkstück kann sowohl als Kathode als auch Anode geschaltet sein. Es kann nur

bei Bauteilen angewendet werden, die eine ebene oder leicht gekrümmte Oberfläche aufweisen.

Spülen nach dem Beizen

Nach der Entnahme des Beizgutes aus der Beizlösung befinden sich noch reaktionsfähige Reste auf dessen Oberfläche. Damit diese nicht weiter mit der Oberfläche reagieren, werden sie mit Wasser abgespült oder so stark verdünnt, dass eine weitere Reaktion nicht mehr möglich ist. Eine Variante ist das Fließspülen, bei dem das Werkstück in einem mit Wasser gefüllten Behälter getaucht wird, dem in gewissen Abständen oder durchgehend frisches Wasser zugeführt wird. Alternativ können es auch mehrere Wasserbäder sein, die miteinander verbunden sind und das Wasser dabei von einem in den anderen Behälter fällt. Vor diesem Spülverfahren kann das Werkstück in ein ruhendes Bad, ohne konstante Wasserzuführung, eingetaucht werden. Dabei werden die größten Säurerückstände entfernt und die nachfolgenden Fließspülbäder entlastet. Eine andere Variante ist das Spritzspülen, bei dem das Bauteil von mehreren Düsen mit Wasser berieselt wird. Die kinetische Energie des auftreffenden Wassers verbessert die Reinigungswirkung.

Neutralisieren

Zum Entfernen der Rückstände, die nicht mit den vorhin beschriebenen Spülverfahren entfernt werden können, wird das Neutralisieren herangezogen. Je nach Art der vorhandenen Rückstände wird das Bauteil dabei eine bestimmte Zeit lang in eine dafür optimale Lösung getaucht. Da sich dabei Salze an der Oberfläche des Bauteiles bilden, müssen diese durch einen erneuten Spülvorgang entfernt werden.

Passivieren

Um die Korrosion des Eisens an der Luft zu verhindern, muss das Bauteil mit einer Schutzschicht überzogen werden. Das wird mit dem Passivieren erreicht, das dem Werkstück einen Korrosionsschutz für mehrere Wochen gibt.¹¹¹

2.13.3. Thermochemische Reinigung mit Salzschnmelzen

Bei Reinigungsanforderungen an der Metalloberfläche, bei denen andere Verfahren (z. B. Strahlen, Beizen, Reinigen mit Chlor- oder Kohlenwasserstoffen) an ihre Grenzen stoßen, kommt als Alternative das thermochemische Reinigen mit Salzschnmelzen zur Anwendung. Die dafür verwendeten Salzschnmelzen wirken, je nach Anwendungsfall, oxidierend oder nicht oxidierend wirken. Dazu wird zunächst das Salz durch die Erwärmung in den flüssigen Zustand übergeführt, wodurch es in die Lage versetzt wird, auch in kleinste Bohrlöcher einzudringen. Wird eine Salzschnmelze, die eine oxidierende Wirkung aufweist, zur Reinigung verwendet, so führt diese die an der Metalloberfläche befindlichen Oxide und Zunder in die

¹¹¹ Rituper, 1993, S. 145ff

nächsthöhere Oxidationsstufe über. Durch die dabei auftretende Volumenvergrößerung kommt es zu einer Auflockerung der Zunderschicht, die anschließend durch das Abschrecken in Wasser zum großen Teil abplatzt. Sollte danach noch eine Restzunderschicht an der Oberfläche vorhanden sein, so wird diese durch einen darauffolgenden Beizvorgang entfernt.¹¹² Zur Beschleunigung des Entzunderungsvorganges wird beim Kolene E-Verfahren elektrischer Strom verwendet. Dabei wird, nach dem Einhängen des Werkstückes in das 480 °C heiße Salzbad, eine Gleichspannungsquelle an das Werkstück und den Schmelztiegel gelegt. Da dieses dabei die negative Polung aufweist, wird hier der Zunder zu Eisen reduziert. Die dafür verwendete Stromstärke ist von der Oberfläche des zu entzundernden Bauteiles und der Einhängvorrichtung abhängig. Dabei soll, bei einer Spannung zwischen 3 V und 10 V, die Stromstärke so gewählt werden, dass an der Oberfläche des zu entzundernden Werkstücks eine Stromdichte von 5 A/dm² auftritt. Nachdem dort die Werkstücke maximal 40 Minuten verweilen, werden sie, mit oder ohne kurzer Abkühlzeit an der Luft, in warmen Wasser abgeschreckt. Nach dem anschließenden Waschen mit kaltem Wasser werden die Werkstücke zwecks Neutralisation in einer Säure behandelt. Anschließend werden sie nochmals gewaschen und letztlich mit einem Rostschutzmittel versehen.¹¹³

2.13.4. Gleitschleifen

Während bei anderen Fertigungsverfahren das Hauptaugenmerk auf die Herstellung der geometrischen Form und der Einhaltung von Maßen gelegt wird, hat das Gleitschleifen die Verbesserung der Oberflächenqualität zum Ziel. Die Veränderung der Makrogeometrie ist hier von untergeordneter Bedeutung. Durch die Erzeugung einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück und dem Schleifmittel wird von der Bauteiloberfläche Material abgetragen.¹¹⁴

Als Arbeitsmedium werden Schleifmittel aus verschiedenen Stoffen in verschiedenen Größen und Formen, mit Zugabe von Wasser und Compounds, verwendet. Das Schleifmittel ist dabei das Werkzeug, mit dem Material von der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstückes abgetragen wird. Als unerwünschten Nebeneffekt kommt es dabei auch zu einem Eigenabtrag der Schleifmittel untereinander. Compounds sind Flüssigkeiten oder Pulver, die je nach Aufgabenstellung aus unterschiedlichen, flüssigen oder pulverförmigen Stoffen bestehen. Das Wasser-Compound-Gemisch hat die Hauptaufgabe, das abgetragene Material an sich zu binden, um es aus dem Arbeitsbereich zu befördern. Die Beimengung von Compounds verbessert die Reinigungswirkung des Wassers und hat auch einen Korrosionsschutz zum Ziel. Sind das Werkstück und das abrasive Medium als Schüttgut im selben Behälter, so wird die für den Materialabtrag erforderliche Relativbewegung hauptsächlich durch Anlagen mit drehenden Arbeitsbehältern oder durch Vibrationen erzeugt.

¹¹² Baudis & Kreutz, 2001, S. 63-66

¹¹³ Eibeck, 1974

¹¹⁴ Klocke & König, 2005, S. 427

Drehender Arbeitsbehälter

Hier wird über die Drehung des Arbeitsbehälters eine Relativbewegung im Schüttgut erzeugt. In einer speziellen Ausführungsart weist der Arbeitsbehälter eine Glockenform auf. Der Behälter ist doppelt konisch ausgeführt und dreht sich um eine kippbare Achse. Durch diese Bauweise kann die Glocke zum Ausleeren entsprechend gekippt werden. Derartige Anlagen werden zum Schleifen von Kugellagerkomponenten herangezogen. Die hierfür benötigten Bearbeitungszeiten dauern bis zu einem Tag. Eine Anlage mit hohen Schleifleistungen stellt die im Bild 18 dargestellte Teller-Fliehkraftanlage dar. Im Vergleich zur vorhin erwähnten rotierenden Anlage wird hiermit die Abtragsleistung auf das bis zu Fünzigfache gesteigert. Der Arbeitsbehälter hat eine birnenförmige Gestalt und ist zweigeteilt. Der untere Teil ist ein drehender Teller, der obere Teil ist ein ortsfester stehender Behälter. Zwischen diesen beiden Maschinenkomponenten ist ein Spalt vorhanden, der hydraulisch geregelt wird. Während des gesamten Bearbeitungsprozesses wird dem Arbeitsraum Wasser zugeführt, welches über diesen Spalt den Abrieb abführt. Die Fliehkraft drückt im äußeren Bereich des Behälters das Schüttgut nach oben, welches durch die stehenden oberen Wände abgebremst wird und anschließend wieder im inneren Bereich nach unten sinkt. Dabei treten in bestimmten Bereichen zwischen dem Compound und Werkstück große Relativgeschwindigkeiten auf, durch die Material abgetragen wird.

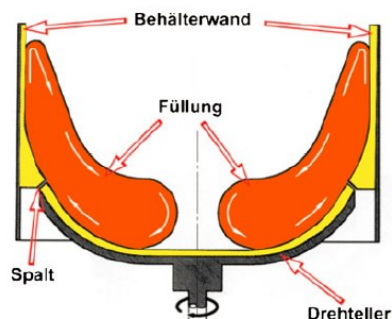


Bild 18: Prinzip der Teller Fliehkraftanlage.¹¹⁵

Vibratoren

Die am häufigsten verwendete Bauform der Gleitschleifmaschinen stellen die Vibratoren dar. Hierbei wird der Arbeitsbehälter über einen Unwuchterregermotor in Schwingungen versetzt und dadurch eine Schüttgutbewegung erzeugt. Eine spezielle Bauart ist der Trogvibrator, bei dem der Arbeitsraum mit vertikalen Blechen in kleinere Einheiten unterteilt ist. Somit können verschiedene Bauteile in separaten Bereichen simultan bearbeitet werden. Hier führt das Werkstück-Schleifmittel-Gemisch eine scheibenförmige Bewegung aus. Eine andere Variante stellen die Trogdurchlaufvibratoren aus. Im Vergleich zur vorhin erwähnten Bauart ist der Trog beidseitig offen, damit das Schüttgut den gesamten Trog durchlaufen kann. Die Zufuhr

¹¹⁵ Schneidau, 2014

bzw. Abfuhr des Schleifmittels und der zu bearbeitenden Werkstücke erfolgt über Förderbänder. Am Ende werden diese Komponenten wieder über ein Sieb automatisch voneinander getrennt.

Schleppschleifanlage

Während bei den vorhin erwähnten Gleitschleifanlagen das zu bearbeitende Werkstück und das Schleifmittel in Bewegung sind, so ist das bei Schleppschleifanlagen nicht der Fall. Hier befindet sich das Schleifmittel im Arbeitsbehälter in Ruhe. Über dem Behälter ist ein drehender Teller angebracht, an dem sich ebenfalls drehende Wellen montiert sind. Diese Wellen dienen zur Aufnahme für die Werkstücke und werden in das Schleifmittel eingetaucht. Der Werkstückwechsel kann voll automatisiert werden. Hier wird das Werkstück infolge der überlagerten Drehbewegung durch das Schleifmittel gezogen. Dabei wird ein hoher Materialabtrag erreicht.¹¹⁶ „Bei Massen- oder auch Einzelteilen lässt sich das Gleitschleifen zum Entgraten, Entzundern, Entrosten, Reinigen, Grob- und Feinschleifen sowie zum Glätten und Polieren einsetzen.“¹¹⁷

2.13.5. Strahlverfahren

„Strahlen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem Strahlmittel (als Werkzeug) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlensysteme beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Werkstückes (Strahlgut) gebracht werden.“¹¹⁸

Je nach Anwendungsfall stehen verschiedene Strahlverfahren zur Auswahl. Sollen unerwünschte, fremde Schichten von der Oberfläche eines Werkstückes abgetragen werden, so wird dazu das Reinigungsstrahlen verwendet. Soll dagegen Material von der Werkstückoberfläche abgetragen werden, so wird das Strahlspanen verwendet. Um der Oberfläche ein bestimmtes Aussehen zu verleihen oder um diese für einen anschließenden Beschichtungsvorgang zu optimieren, wird das Oberflächenveredelungsstrahlen herangezogen. Zur Erhöhung der Dauerfestigkeit eines Bauteils werden mit Hilfe des Kugelstrahlverfahrens Druckeigenspannungen in die Werkstückoberfläche eingebracht. Entzundern mit Strahlmitteln wird häufig bei Bauteilen angewendet, die durch Schmieden oder Walzen hergestellt werden.¹¹⁹

Beim Kugelstrahlen wird ein kugelförmiges Strahlmittel auf die zu bearbeitende Oberfläche geschossen. Um diese Kugeln auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu beschleunigen, wird als Trägermedium Druckluft oder die durch ein Schleuderrad erzeugte Zentrifugalkraft

¹¹⁶ Prüller, 2012, S. 9 ff

¹¹⁷ Fritz, et al., 2012, S. 336

¹¹⁸ Schneidau, 2014

¹¹⁹ Schneidau, 2010, S. 5 ff

genutzt.¹²⁰ Die hierfür verwendeten Kugeln haben einen maximalen Kugelradius von 2 mm und treffen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 50 m/s auf die Bauteiloberfläche auf. Dabei kommt es lokal zu einer plastischen Verformung der Oberfläche und zur Einbringung von Druckeigenstressungen in den wandnahen Oberflächenbereich. Diese können, abhängig von den gewählten Kugelabmessungen, bis in eine Tiefe von 0,2 mm eingebracht werden. Der Betrag der in die Bauteilrandschicht eingebrachten Druckspannungen kann Werte erreichen, die bis zu 50% der Mindestzugfestigkeit des Bauteilwerkstoffes entsprechen.¹²¹

2.13.6. Ultrasonic Kugelstrahlen

Bei der ursprünglichen Art dieses Bearbeitungsverfahrens zur Einbringung von Druckeigenstressungen in die Oberfläche wird der zu bearbeitende Oberflächenbereich von einer zylinderförmigen Kammer begrenzt. Während auf der einen Seite dieses Arbeitsraumes der zu bearbeitende Oberflächenbereich liegt, wird über die zweite Seite die Sonotrode zugeführt. Diese hat die Aufgabe, die in diesem Raum befindlichen, kugelförmigen Strahlmittel so stark zu beschleunigen, dass diese in Richtung der Oberfläche geschleudert werden. Die dafür benötigten Schwingungen werden über ein Piezoelement erzeugt, dessen Schwingfrequenz und Amplitude auf das Strahlmittel angepasst ist.¹²² Bei einem anderen Ansatz wird direkt das zu bearbeitende, hohle Werkstück als Sonotrode verwendet. Dabei bildet es selbst die Arbeitskammer, in die das Strahlmedium gefüllt wird. Über ein Piezoelement wird hier bsw. eine Hohlwelle in eine bestimmte Schwingung versetzt. Hierdurch wird das Strahlmittel beschleunigt. Es trifft auf die Oberfläche im Hohlraum auf und prallt von dort wieder ab. Dabei werden auch Eigenstressungen in die Werkstückoberfläche eingebracht.¹²³

2.13.7. Hydromechanisches Verfahren

Beim Entzundern mit dem hydromechanischen Verfahren wird das noch glühende Werkstück durch eine Vorrichtung mit definierter Vorschubgeschwindigkeit bewegt, an die eine Vielzahl von Düsen montiert sind. Die Düsen leiten Wasser mit hohem Druck auf die Oberfläche des zu entzundernden Bauteiles. Dabei kann das Werkstück auch mehrmals hintereinander an den Düsen vorbeibewegt werden.¹²⁴ Beim Auftreffen der Wasserstrahlen auf die Oberfläche kommt es zur Ablösung bzw. zum Abplatzen der Zunderschicht. Einfluss auf den Entzunderungsvorgang haben vier Mechanismen: Erstens kommt es durch die hohe kinetische Energie der auftreffenden Wasserstrahlen zu einem Abbrechen der Zunderschicht. Zweitens kommt es durch den Flüssigkeitsstrahl zu einer plötzlichen Abkühlung an der Oberfläche.

¹²⁰ Macherauch & Zoch, 2011, S. 481

¹²¹ Radaj & Vormwald, 2007, S. 111-112

¹²² Haller, 2007, S. 54-57

¹²³ Erdmann, et al., 2008

¹²⁴ Pahnke, 2000

Dabei schrumpft die Zunderschicht stärker als der Grundwerkstoff. Die lokale Volumenänderung führt zu einem Abplatzen. Drittens wird der Zunder abgesprengt, wenn Flüssigkeitstropfen unter die Zunderschicht geraten und dort schlagartig verdampfen. Viertens wird der Zunder bei Schrägstellung der Düsen von der Oberfläche gespült. Dieses Verfahren findet industrielle Anwendung beim Entzundern von warmgewalzten Oberflächen. Hier wird darauf geachtet, dass nicht zu viel Spritzwasser verwendet wird, damit das Bauteil dabei nicht zu stark abkühlt.¹²⁵ Darüber hinaus findet dieses Verfahren Anwendung bei der Herstellung von Schmiedeteilen. Sollen komplexere Teile mit einer hohen Oberflächengüte in einem mehrstufigen Schmiedeprozess hergestellt werden, so ist dafür eine zunderfreie Oberfläche sehr wichtig. Hierbei werden hydraulische Entzunderungsanlagen mit 270 bar Druck verwendet.¹²⁶

2.14. Entgraten

An den Grenzflächen von metallischen Bauteilen entstehen bei der spanenden Bearbeitung unzulässige Metallanhäufungen, welche die in den technischen Zeichnungen angegebenen Maße übersteigen. Diese Grate können Probleme bzw. Schäden bei der Montage verursachen. Zudem stellen sie ein Verletzungsrisiko während und nach der Montage dar. Werden Bauteile mit diesen Materialanhäufungen in ein System eingebaut und vorher nicht beseitigt, so können sie sich unter späteren Betriebsbedingungen lösen und zu einem Totalausfall der Maschine führen. Damit diese Situation nicht auftritt, werden Bauteile, die dynamisch belastet werden und eine lasttragende Funktion haben, entgratet. Je nachdem, ob das Entgraten manuell oder voll automatisiert durchgeführt wird, hat der Entgratungsprozess mit einem Anteil von 10 bis 30 % an den Fertigungskosten einen beträchtlichen Anteil an den Produktionskosten eines Bauteiles.¹²⁷

2.14.1. Messgrößen des Grates

Das Aussehen und die Entstehungsart des Grates sind vom jeweiligen Fertigungsverfahren abhängig. Ist der auftretende Grat beim Ur- und Umformen noch relativ gut vorhersehbar, so ist dies bei den spanenden Fertigungsverfahren nicht so leicht möglich. Da es in dieser Arbeit um das Entfernen von Bohrungsgraten geht, wird hier der Bohrungsgrat näher betrachtet. Bei einer Bohrung bildet sich ein Grat sowohl im Bereich des Bohrungseintritts als auch im Bohrungsaustritt aus. Während der Bohrungseintrittsgrat durch die Verdrängung des Materials in Richtung der Zerspankraftkomponente entsteht, bildet sich der Bohrungsaustrittsgrat durch die Materialverdrängung quer zur dieser aus. Im Bild 19 sind vom vorhande-

¹²⁵ Büchele, 1995

¹²⁶ SGGT Hydraulik GmbH, 2009

¹²⁷ Eberhard Abele, 2013, S. 135

nen Grat ein Gratlängs- und Gratquerschnittsprofil dargestellt. Im Gratlängsprofil ist die starke Schwankung der Grathöhe über die Kantenlänge ersichtlich.

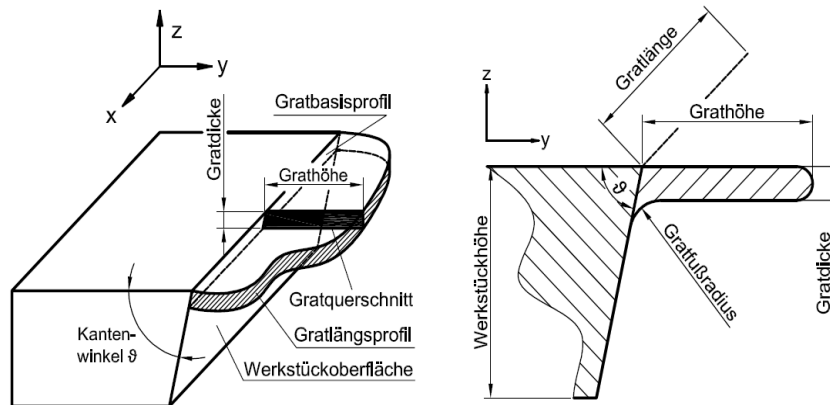


Bild 19: Bezeichnungen am Grat.¹²⁸

Das Querschnittsprofil des Grates in einem bestimmten Bereich kann durch die Herstellung von Gratschliffbildern veranschaulicht werden. In diesem Querschnitt wird der Zustand des Grates mit den im Bild 20 eingezeichneten Werten ermittelt. Auf der linken Seite im Bild 20 sind die messbaren Größen vor dem Entgraten, auf der rechten Seite danach dargestellt. Da diese Methode sehr aufwendig ist, die Probe dabei zerstört wird und zur Beurteilung der Entgratqualität nicht alle im Bild 20 definierten Messwerte benötigt werden, wird diese Methode nur vereinzelt oder für wissenschaftliche Arbeiten herangezogen. In der Praxis wird die Restgrathöhe h_0 mit Oberflächentastschnittgeräten gemessen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch das Auflegen eines Messlineals das Vorhandensein einer Restgrathöhe h_1 zu kontrollieren. Der Radius r_k der Kante wird mit einer Radiusschablone oder mit einem Mikroskop kontrolliert, ohne damit das Werkstück zu beschädigen. Durch die Definition von bestimmten Messgrößen (siehe Bild 20) kann der Aufwand für das Entgraten definiert werden. Dadurch wird die Qualität der Entgratung bestimmt und somit Kosten für die Entgratungsoperation gesenkt.¹²⁹

¹²⁸ Beier & Nothnagel, 2015, S. 26

¹²⁹ Thilow, et al., 2008, S. 30 ff

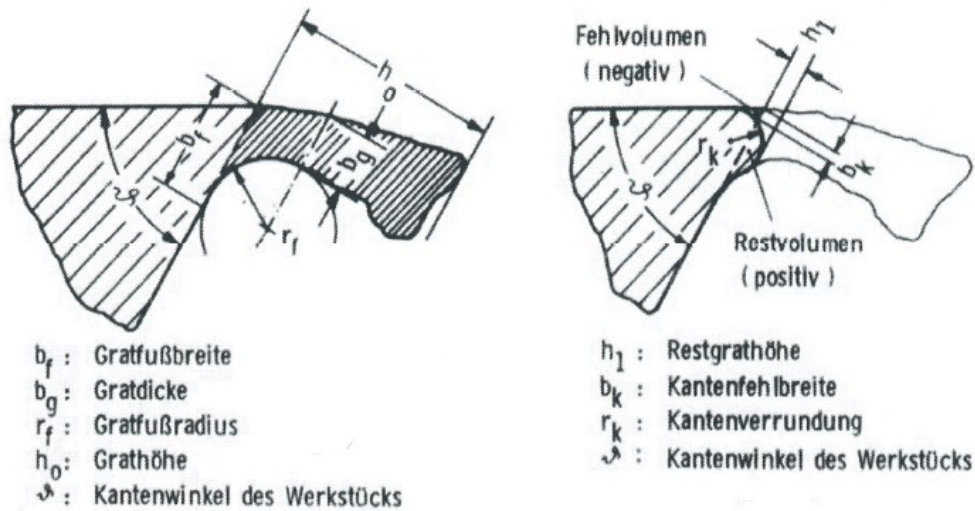


Bild 20: Messgrößen des Grates im Querschnittsprofil vor (links) und nach dem Entgraten (rechts).¹³⁰

2.14.2. Aussehen des Grates und vollautomatische Gratkontrolle

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde untersucht, den Grat mit einem neuartigen Messgerät im Bereich des Bohrungsaustrittes vollautomatisch zu erkennen. Zunächst wurde festgestellt, welche Formen und Größen der Grat annehmen kann. Anhand der Ergebnisse wurden Gratklassen definiert. Die dabei getroffene Unterteilung ist im Bild 21 dargestellt und wurde zur Entwicklung einer Gratsonde herangezogen. Dieser Sensor arbeitet mit Wirbelströmen, wodurch er unempfindlich gegenüber Verschmutzungen ist und deshalb auch gut in eine Fertigungsstraße integrierbar ist. Derzeit hat die kleinste Baugröße einen Durchmesser von 6,5 mm. Zukünftig sollen auch kleinere Baugrößen bis 3 mm Durchmesser erhältlich sein.¹³¹

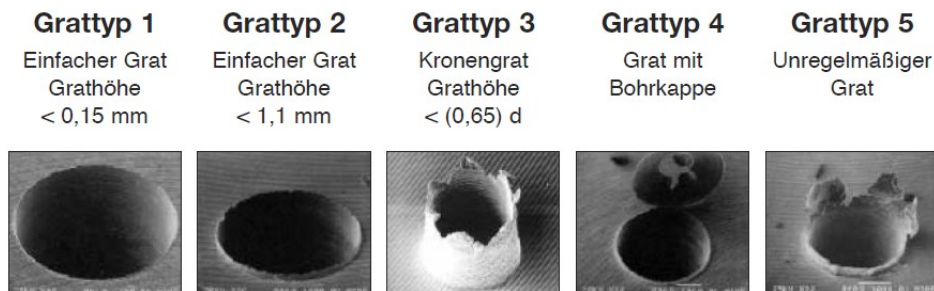


Bild 21: Definierte Grattypen.¹³²

¹³⁰ Thilow, et al., 2008, S. 36

¹³¹ Balluff, 2004, S. 24 ff

¹³² Balluff, 2004, S. 24

2.14.3. Richtlinien zur Verwendung der unterschiedlichen Entgratverfahren

Vor dem näheren Eingehen auf die unterschiedlichen Entgratmethoden wird zunächst zusammengefasst, für welche Anwendungsfälle bestimmte Verfahren ideal sind.

Welches Entgratverfahren letztendlich zum Einsatz kommt, hängt davon ab, ob sich der zu entfernende Grat auf einer Kontur im Inneren oder im Äußeren eines Bauteiles befindet und in welcher Stückzahl die zu entgratenden Bauteile hergestellt werden. Bei kleinen Bauteilen, die in hohen Stückzahlen hergestellt werden, hat sich das chemisch-thermische Entgratverfahren (siehe Abschnitt 2.16.2) als optimal herausgestellt. Verwendung findet es beim Entgraten von innen und außen liegenden Konturen bei Steuerschiebern und Gehäusen. Liegen Grate an den äußeren Flächen eines Bauteiles, so wird dafür hauptsächlich das in Abschnitt 2.16.3 beschriebene voll automatisierbare Wasserstrahlen verwendet. Mit den beiden bisher genannten Verfahren können Bauteile in kurzer Zeit prozesssicher nachbearbeitet werden. Bei Bohrungsverschneidungen kommt oft ein voll automatisierbares, mechanisches Entgratverfahren mit bestimmter Schneide zur Anwendung (siehe Abschnitt 2.15.3 - 2.15.8). In der Automobilserienfertigung kommen Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide zum Einsatz. Das dabei beispielsweise verwendete Bürstenwerkzeug besteht aus einer Vielzahl von elastischen Borsten, mit denen Grate von Oberflächen und in Bohrungsverschneidungen beseitigt werden. Auf diese Verfahren wird im nachfolgenden Abschnitt 2.15.1 näher eingegangen. Bei Bauteilen, die eine sicherheitsrelevante Funktion erfüllen oder deren Aufbau komplex ist, kommt das manuelle Entgraten zum Einsatz. Dabei beseitigt der Werker mit Werkzeugen, wie z. B. Fräsern, Bürsten oder Schleifstiften, die unerwünschten Materialanhäufungen manuell.¹³³

2.15. Mechanische Entgratverfahren

2.15.1. Keramische Faserstäbe

Keramische Faserstäbe werden zum Entgraten von Querbohrungen verwendet. Dabei wird das Werkzeug über die Hauptbohrung zu dem zu entgratenden Bohrungskreuzungsbereich geführt. Die Faserstäbe bestehen aus einer Vielzahl von dünnen Einzelfasern aus Aluminiumoxid (ca. 1000 Stück pro Faserstab), die zu einem Schleifstift gebunden sind. Die einzelnen Fäden weisen eine kristalline Struktur auf und haben an der Spitze eine große Anzahl von kleinen Schleifkanten. Wird der Schleifstift über seinen Schaft in Rotation versetzt, so kommt es durch die Fliehkraft zu einer Spreizung der Einzelfasern. Die Anwendung dieses Verfahrens ist auf Grate beschränkt, deren Größe 0,1 mm nicht übersteigen. Das Bild 22 zeigt den Arbeitsablauf mit diesem Werkzeug. Vorerst wird das nicht rotierende Werkzeug in der zylindrischen Hauptbohrung kurz vor der zu entgratenden Stelle positioniert (s. Bild 22a) und in Rotation versetzt (Bild 22b). Danach wird das Werkzeug, wie in Bild 22c dargestellt,

¹³³ Eberhard Abele, 2013, S. 135-137

mehrmals hintereinander vor und hinter die Querbohrungen bewegt, um die unerwünschten Grate zu entfernen. Bei Änderung der Vorschubrichtung ist eine Drehrichtungsänderung der Spindel von Vorteil. Vor dem Herausziehen des Werkzeuges aus der Bohrung darf sich die Spindel nicht mehr drehen. Um für den jeweils vorliegenden Bearbeitungsfall ein optimales Ergebnis zu erreichen, sind unterschiedliche Ausführungsformen der Bürsten erhältlich. Im wesentlichen unterscheiden sich die Ausführungsformen in der Porosität des jeweiligen Schleifmittels und in der Elastizität der Fäden. Mit einem solchen Werkzeug ist eine hohe Standzeit erreichbar, weshalb sich die Bearbeitung als kostengünstig darstellt.¹³⁴ Angetrieben und geführt wird das Werkzeug entweder von Hand mit einer Bohrmaschine oder in der industriellen Fertigung automatisiert durch einen Roboter.¹³⁵

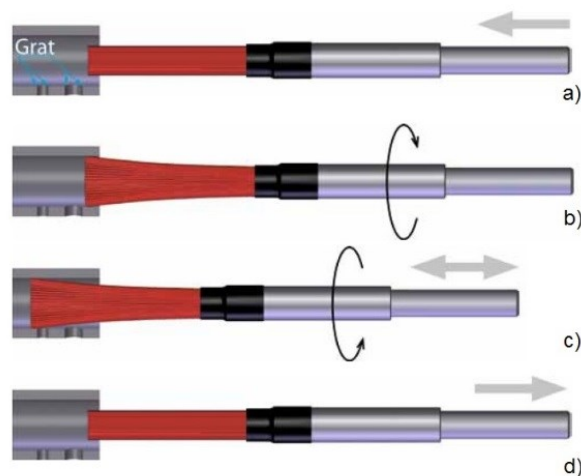


Bild 22: Funktionsweise eines keramischen Faserstabs.¹³⁶

2.15.2. Keramik Schleifstifte

Keramische Schleifstifte eignen sich ebenso zum Entgraten von Querbohrungen. Hierzu wird das Werkzeug manuell oder maschinell über die Haupt- (siehe Bild 23) oder die Querbohrung (siehe Bild 24) an die zu entgratende Stelle geführt. Hier handelt es sich um ein Feinentgratverfahren, das eine punktgenaue Bearbeitung des Querbohrungsgrates der Hauptbohrung ohne Beschädigung der Oberfläche ermöglicht. Als Schleifkörpergeometrie kann eine Kugel- oder Zylinderform mit verschiedenen Abmessungen gewählt werden. Während die Kopfgröße des Werkzeuges beim Entgraten der Querbohrungsgrates über die Hauptbohrung größer als der Querbohrungsdurchmesser sein muss, so ist er beim Entgraten über die Querbohrung selbst kleiner. Während die Anpresskraft des in Abschnitt 2.15.1 beschriebenen Verfahrens durch die Fliehkraft erzeugt wird, muss diese hier über die Verbiegung des Schafthalses erzeugt werden. Um das Werkzeug dabei nicht zu beschädigen, darf die maximale Durchbiegung einen Wert von 2 mm und die maximale Anpresskraft eine Kraft von 5 N

¹³⁴ Kempf GmbH, 2014, S. 8-9

¹³⁵ Kempf GmbH, 2013, S. 74

¹³⁶ Modifiziert: Kempf GmbH, 2014, S. 8

nicht überschreiten. Zum Entgraten von Querbohrungen, die am Ende einer Sacklochbohrung liegen, hat der am Werkzeug angebrachte Körper eine zylindrische Form.¹³⁷

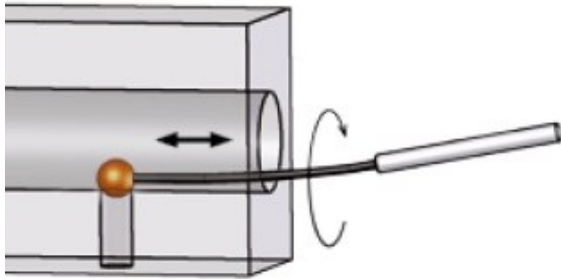


Bild 23: Entgratung über Hauptbohrung.¹³⁸

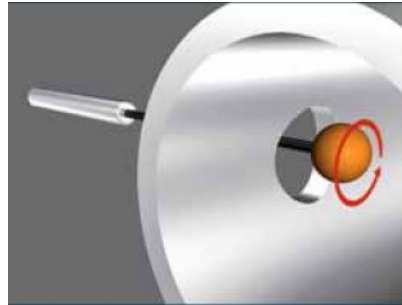


Bild 24: Entgratung über Querbohrung.¹³⁹

2.15.3. GMO-Entgrater

Der GMO-Entgrater (Gottfried Mattes Ohorn) (s. Bild 25) ist ein Werkzeug zum Entfernen von geraden und gewölbten Bohrungskanten im Ein- und Austrittsbereich von Bohrungen. Im Vergleich zu den beiden in den Abschnitten 2.15.1 und 2.15.2 beschriebenen Verfahren ist hier die Gratgröße nicht beschränkt. Der Einsatzbereich dieses Werkzeugs liegt bei Bohrungen mit einem Durchmesserbereich von 0,8 bis 7,5 mm. Die Hartmetallschneide ist auswechselbar und in mehreren Größen mit verschiedenen Schneidwinkeln erhältlich. Zum optimalen Einstellen des Werkzeugs für unterschiedliche Materialien und Gratstärken stehen vier verschieden starke, auswechselbare Druckfedern zur Auswahl. Deren Vorspannung wird über eine Stellschraube verändert. Um eine Bearbeitung durchführen zu können, wird zunächst die Mittelachse des Entgraters mit der Mittelachse der Bohrung zur Deckung gebracht. Danach wird das Werkzeug über die Einstellschraube so ausgerichtet, dass die Bohrungskante auf der Schneidkantenmitte liegt. Anschließend wird das Werkzeug über die Spindel in Rotation versetzt, mit Eilganggeschwindigkeit in Richtung der zu entgratenden Bohrung hinbewegt und korrekt positioniert. Nun erfolgt die Spanabnahme mit geringem Vorschub. Letztlich wird das Werkzeug mit Eilganggeschwindigkeit aus der Bohrung herausbewegt.¹⁴⁰

¹³⁷ Kempf GmbH, 2014, S. 10-11

¹³⁸ Kempf GmbH, 2014, S. 10

¹³⁹ Kempf GmbH, 2014, S. 10

¹⁴⁰ Kempf GmbH, 2013, S. 3-7

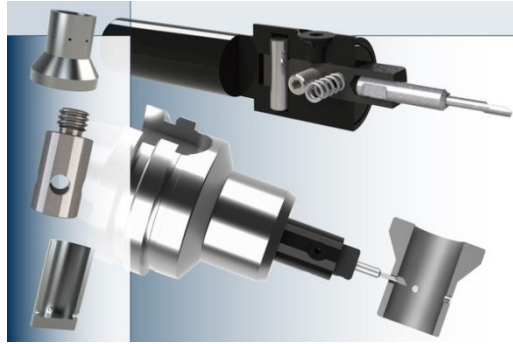


Bild 25: GMO Entgrater (aufgeschnitten) mit Druckfeder zum Einstellen der Entgratstärke (oben), GMO Entgrater im Eingriff beim Entgraten einer Querboreung im Bereich des Bohrungsaustritts (unten).¹⁴¹

2.15.4. Burr-Off

Ein Burr-Off ist ein Entgratwerkzeug bei dem, im Vergleich zu dem im vorherigen Abschnitt 2.15.3 beschriebenen GMO Entgrater, die Schneiden nicht auswechselbar sind. Damit können Bohrungen ab einem Durchmesser von 0,8 mm entgratet werden.¹⁴² Das Burr-Off ist im vorderen Bereich bis zum Beginn des hinteren Werkzeugschaftes durchgehend geschlitzt (Bild 26). Am geschlitzten vorderen Ende befindet sich auf jeder Hälfte des geschlitzten Grundkörpers jeweils eine Schneide. Durch diese Konstruktion arbeitet ein Teil des Werkzeuges wie eine Feder, weshalb die Schneiden in die Bohrung eintauchen können. Beim Einfahren in die Bohrung wird die Feder vorgespannt und die Schneiden entfernen beim Kontakt den Grat am Bohrungseintritt. Beim Durchfahren der Bohrung zum anderen Bohrungsende wird die Bohrungsoberfläche nicht beschädigt. Wenn die beiden Schneiden die Austrittsbohrung passiert haben, wird die Vorschubrichtung geändert und der Bohrungsaustrittsgrat beseitigt. Die Schneiden können mehrmals nachgeschliffen werden.¹⁴³



Bild 26: Burr Off Engtrater bis Baugröße CP-13 mit einer Schneide (oben); ab Baugröße CP-14 mit zwei Schneiden (unten).¹⁴⁴

2.15.5. Heule™ COFA

Das Entgratwerkzeug COFA dient zum Entgraten von ebenen und unebenen Kanten im Bereich des Bohrungseintritts und Bohrungsaustritts. Es kann manuell oder mit einer CNC-

¹⁴¹ Kempf GmbH, 2012

¹⁴² TTS Fertigungstechnologien GmbH, 2013

¹⁴³ Cogsdill Inc., 2011, S. 12-15

¹⁴⁴ Cogsdill Inc., 2011, S. 13

Maschine betrieben werden und ist bei Bohrungen ab einem Durchmesser von 2 mm einsetzbar. Je nach gewählter Variante dieses Werkzeuges deckt es einen kleinen Durchmesserbereich (z. B. von 2,0 – 3,1 mm) ab. In der größten Ausführung sind Bohrungen mit bis zu 40 mm Durchmesser bearbeitbar. Beim Entgraten entsteht, bauartbedingt, eine abgerundete Fase, die je nach Größe des Werkzeuges einen Radius von 0,1 bis 0,7 mm hat. Das Werkzeug besteht (Bild 27) aus einem Grundkörper, in den eine Blattfeder eingespannt ist. Diese verursacht für das auswechselbare Messer aus Hartmetall, das über einen Spannstift drehbar gelagert ist, einen Verdrehwiderstand. Durch die spezielle Ausprägung und drehbare Lagerung der Schneide kann sich diese in den Grundkörper einklappen und so zur anderen Seite der Bohrung gelangen, ohne dabei die Bohrungswand zu beschädigen. Die Blattfeder ist auswechselbar und in verschiedenen Härtestufen erhältlich, wodurch das Werkzeug für verschieden harte Werkstoffe verwendet werden kann.¹⁴⁵

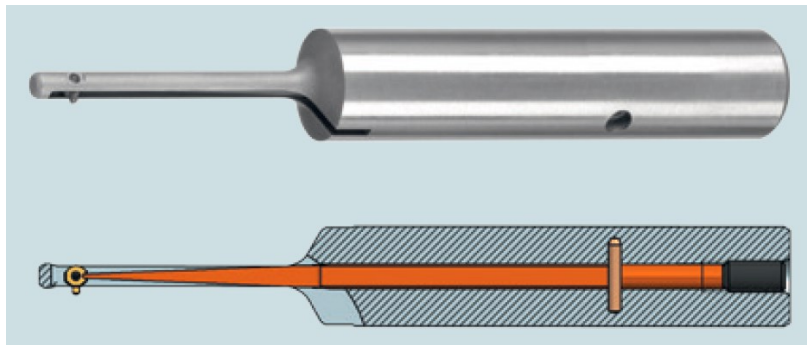


Bild 27: Prinzipieller Aufbau des Heule COFA C2 Werkzeugs für Bohrungen.¹⁴⁶

Sollen die Grate einer Durchgangsbohrung im Bereich des Ein- und Austrittsbereich entfernt werden, so wird das Werkzeug zunächst so positioniert, dass die Werkzeug- und Bohrungsachse sich überdecken und die Schneide kurz vor der Bohrungseintrittskante liegt. Nach dem Einschalten der Spindeldrehzahl wird das Werkzeug mit Arbeitsvorschubgeschwindigkeit in Richtung der oberen Bohrungskante bewegt und dabei der Grat abgenommen. Hat das Werkzeug eine bestimmte Bohrungstiefe erreicht, so wird es mit Eilganggeschwindigkeit so weit aus der Bohrung herausbewegt, bis die Schneide infolge der Fliehkraft wieder komplett ausgeklappt ist. Dann erfolgt, mit umgekehrter Vorschubbewegung, die Gratabnahme mit Arbeitsgeschwindigkeit im Bereich des Bohrungsaustritts. Die Drehzahl und Drehrichtung der Spindel müssen dabei nicht verändert werden. Bei Querbohrungen, wie im Bild 28 links ersichtlich, muss das Verhältnis vom Querbohrungsdurchmesser d zum Hauptbohrungsdurchmesser D einen Wert kleiner gleich 0,5 haben. Bei schrägen Bohrungsaustrittsflächen (Bild 28 rechts) darf der Winkel relativ zur Bohrungseintrittsfläche einen Wert von 15° nicht überschreiten. Sollten die mit einem Stern gekennzeichneten Werte im Bild 28 über-

¹⁴⁵ Heule Precision Tools, 2014

¹⁴⁶ Heule Precision Tools, 2014

schritten werden, so kann mittels eines Bearbeitungsversuches die Anwendbarkeit überprüft werden oder in gewissen Fällen liegt die Lösung in der Herstellung eines Sondermessers.¹⁴⁷

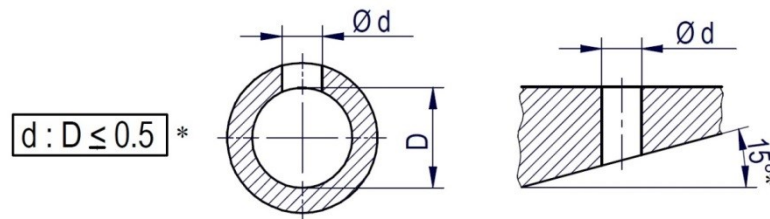


Bild 28: Randbedingungen für die Anwendung des Heule COFA: *) größere Werte unter bestimmten Umständen möglich.¹⁴⁸

2.15.6. Entgratspirale

Die Entgratspirale ist ein von der Firma Gühring entwickeltes Werkzeug zur Entgratung von Querbohrungen im Bereich des Bohrungsaustritts über die Hauptbohrung. Lieferbar ist dieses Werkzeug, in Durchmesserschritten von 1/100 mm, für Bohrungsdurchmesser von 3 bis maximal 16,1 mm. Es ist an seiner Vorderseite geschlitzt und keilförmig so ausgebildet, dass es am äußersten Punkt im Durchmesser geringfügig größer als der Durchmesser der Hauptbohrung ist. Dadurch wird es beim Einfahren in die Hauptbohrung zusammengedrückt, wodurch sich eine Vorspannung einstellt. Dies bewirkt, dass die spiralförmig verlaufenden Schneiden an die Bohrungswand gedrückt werden. Beim Entgratvorgang wird zunächst das Werkzeug mit einer Vorschubgeschwindigkeit, die der maximalen Steigung der Spirale entspricht, kurz vor der ersten Querbohrung positioniert. Anschließend wird, mit den für den jeweiligen Durchmesserbereich (siehe Tabelle 2) vorgegebenen Vorschub- und Schnittgeschwindigkeitswerten der Grat, wie im Bild 29 dargestellt, abgeschält. Wenn mindestens die Hälfte der Schneiden die letzte zu entgratende Querbohrung passiert hat, wird das Werkzeug mit einer vom Hersteller empfohlenen Drehzahl, Drehrichtung und Vorschubgeschwindigkeit aus der Bohrung herausgezogen.¹⁴⁹

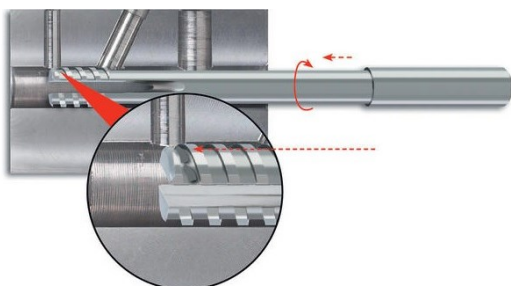


Bild 29: Abschälen des Grates.¹⁵⁰

Ø-Bereich (mm)	v_c m/min	f_u (mm)
< Ø 8	15 - 25	0,2 - 0,3
≥ Ø 8	15 - 25	0,4 - 0,8

Tabelle 2: Richtwerte für Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit für den Entgratvorgang in Abhängigkeit vom Durchmesserbereich.¹⁵¹

¹⁴⁷ Heule Precision Tools, 2014, S. 6-7

¹⁴⁸ Heule Precision Tools, 2014, S. 6

¹⁴⁹ Werkzeug Technik, 2008, S. 8-9

¹⁵⁰ Gühring oHG, 2009, S. 8

¹⁵¹ Gühring oHG, 2009, S. 8

2.15.7. Burraway

Das Burraway ist ein Entgratwerkzeug für das maschinelle Entgraten von Bohrungen. Die Stärke der Entgratung und die Größe der dabei entstehenden Fase werden über die Feder Vorspannung, die durch das Verdrehen einer Einstellschraube eingestellt wird, geregelt. Standardmäßig ist dieses Werkzeug mit einer doppelseitigen Schneide ausgerüstet. Beim Entgratungsvorgang fährt das Werkzeug in die zu entgratende Bohrung ein. Beim Kontakt der Schneide mit der Bohrungseintrittskante wird diese entgratet. Durch die vorgespannte Feder kann sich die Schneide in den Adapter (siehe Bild 30) einklappen und so die Bohrung zum anderen Ende hin durchfahren. Ist die Schneide komplett aus der Bohrung wieder ausgetreten, so wird bei der daraufhin folgenden Rückwärtsbewegung, bei der die Drehrichtung des Werkzeuges gleich bleibt, die Kante im Bereich des Bohrungsaustritts bearbeitet. Erhältlich ist dieses Werkzeug für Bohrungen von 2 mm bis maximal 50 mm Durchmesser. Das Messer hat bei diesem Werkzeug eine hohe Standzeit und kann, bei Bedarf, schnell ausgetauscht werden.¹⁵²

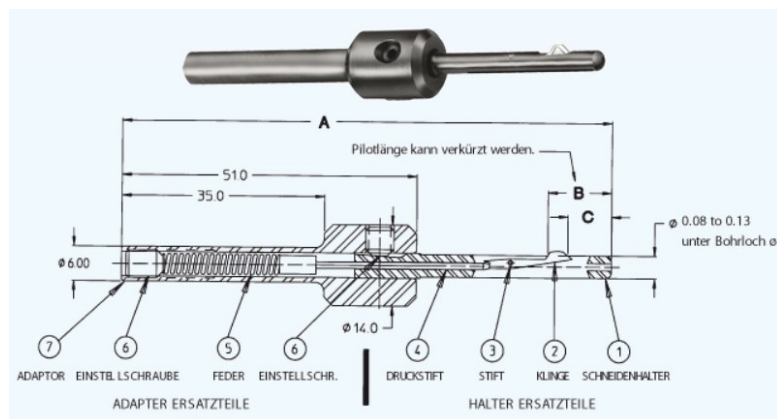


Bild 30: Burraway Entgratwerkzeug Typ MA in Volldarstellung (oben) und aufgeschnitten (unten).¹⁵³

Als weitere Option ist das Werkzeug für das reine Vorwärts- oder Rückwärtsentgraten mit einem Messer in einschneidiger Form erhältlich und wird an unterschiedliche Werkstoffe durch verschiedene Schneidengeometrien und Federsteifigkeiten angepasst. Abgenützte Schneiden des Messers müssen nicht sofort ausgetauscht werden, sondern können bis zu zehnmal nachgeschliffen werden. Das Werkzeug ist zum Entgraten von Querbohrungen geeignet, wenn sich diese direkt mit der Hauptbohrung schneiden und das Durchmesser- verhältnis zwischen der Hauptbohrung und der Querbohrung größer gleich 3 ist. Als Werte für die Vorschubgeschwindigkeit und die Spindeldrehzahl werden Werte wie beim Bohren des zu entgratenden Bohrloches mit einem HSS Bohrers empfohlen.¹⁵⁴

¹⁵² Kempf GmbH, 2014

¹⁵³ Kempf GmbH, 2015

¹⁵⁴ Cogsdill Inc., 2011, S. 5, 10-11

2.15.8. Orbitool

Das Orbitool (Bild 31) ist ein Werkzeug zum Entfernen von Graten im Bereich von zwei sich kreuzenden Bohrungen. Dabei ist es egal, ob sich die Bohrungen in T- oder L-Form schneiden. Es kann zur Entgratung von Serienteilen in einer CNC-Maschine verwendet werden, um damit die Entgratung voll automatisiert durchzuführen. Die dafür benötigten Bearbeitungsparameter müssen auf die jeweilige Entgrataufgabe angepasst werden und durch Bearbeitungsversuche selbst bestimmt werden.¹⁵⁵ In seinem Aufbau ähnelt es einem Kugelfräser, der jedoch in seiner Mitte noch zusätzlich einen Ring hat. Durch diesen Ring wird verhindert, dass es beim Zustellvorgang zu einer Beschädigung der Bohrung kommt. Der Schaft des Werkzeuges ist als elastisches Element ausgeführt, um eine bestimmte Nachgiebigkeit zu realisieren. Wenn die Nachgiebigkeit des Werkzeugschaftes zu gering ist, kann diese durch zusätzliche Verwendung eines elastischen Halters vergrößert werden.¹⁵⁶

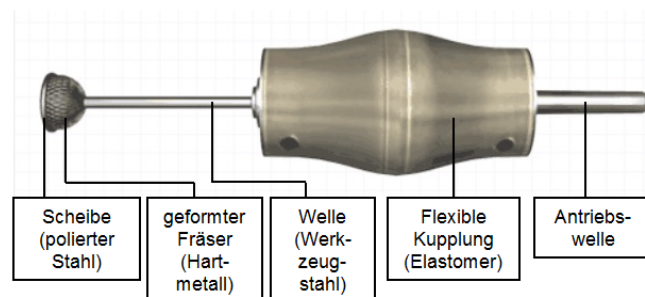


Bild 31: Aufbau des Orbitool.¹⁵⁷

Die Entgratung mit diesem Werkzeug wird von der kleineren der sich kreuzenden Bohrungen aus durchgeführt. Zuerst wird das Werkzeug außerhalb der Bohrung so positioniert, dass sich dessen Achse mit der Bohrungsachse überdeckt. Anschließend wird das Werkzeug in die Bohrung achsparallel eingeführt und so positioniert, dass es kurz vor der Bohrungskreuzung liegt. Dann erfolgt der Entgratvorgang, bei dem das Werkzeug um seine eigene Achse dreht und dabei gleichzeitig eine schraubenförmigen Bewegung um die Bohrungsachse durchführt. Der Bearbeitungsvorgang wird gestoppt, wenn der Fräser die Mitte der Querbohrung erreicht hat. In der Folge nimmt das stillgesetzte Werkzeug seine Ruhelage in die Mitte der Bohrung ein. Letztlich wird er wieder aus der Bohrung herausgezogen.¹⁵⁸ Bei nicht richtig gewählten Bearbeitungsparametern kommt es zu unerwünschten Bearbeitungsergebnissen. Wird die Spindeldrehzahl oder die Geschwindigkeit für die Spiralbewegung zu groß gewählt, so entsteht dadurch eine zu große Fase oder es bleibt ein Restgrat stehen.

¹⁵⁵ VSH Siegfried Hermann e.K., 2005

¹⁵⁶ VSH Siegfried Hermann e.K., 2005

¹⁵⁷ mod.: Avila, et al., 2004, S. 379-389

¹⁵⁸ J.W. Done Company, 2016

Zudem verbleibt ein Restgrat bei zu geringer Spindeldrehzahl und zu hoher Geschwindigkeit der Spiralbewegung.¹⁵⁹

2.16. Weitere Verfahren zur Beseitigung von Bohrungsaustrittsgraten

2.16.1. Elektrochemisches Entgraten

Eine Art des elektrochemischen Entgratens ist das Senkentgraten. Dabei wird das Werkzeug, die Elektrode, an das zu entgratende Werkstück so angepasst sein, dass nur im Bereich des Grates Material abgetragen wird.¹⁶⁰ Der Elektrolyt umströmt während der Bearbeitung nur die Bereiche, in denen sich der zu entfernende Grat befindet. Die Elektrode muss in den Bereichen, in denen kein Materialabtrag auftreten darf, gut isoliert sein. Damit dieses Verfahren industriell angewendet werden kann, dürfen die geometrischen Abmessungen der Grate nur kleine Schwankungen aufweisen.¹⁶¹

2.16.2. Thermisches Entgraten

Das Bauteil wird zunächst in eine Kammer gelegt, die mit einem Deckel hydraulisch verschlossen wird. Anschließend wird in die Kammer ein auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmtes, genau dosiertes Gasmisch mit einem bestimmten Druck eingeleitet. Je nach Anlagenbauform sind dabei Drücke bis zu 23 bar realisierbar. Bei der anschließenden Zündung des brennfähigen Gasmisches tritt für eine kurze Zeitspanne (ca. 20 ms) eine Temperatur von bis zu 3300 °C auf. Dabei kommt es zum Abbrennen der Grate und zu einer geringfügigen Erwärmung der zu entgratenden Werkstücke. Handelt es sich um Komponenten aus Stahl, so werden diese bei diesem Prozess auf bis zu 150 °C erwärmt. Aluminiumteile erfahren dabei eine Erwärmung auf bis zu 90 °C. Da sich das abgebrannte Material als Eisenoxid auf der Bauteiloberfläche niederschlägt, muss diese anschließend gereinigt werden. Der erste Teilschritt des Reinigungsvorganges besteht aus dem Einlegen der Teile in eine pH-neutrale Flüssigkeit, um diese dann mit Hilfe von Ultraschall und dem gleichzeitigen Abspritzen mit Wasser unter Drücken von bis zu 18 bar zu reinigen. Anschließend werden sie im zweiten Teilschritt passiviert und in einer Vakuumatmosphäre getrocknet. Bei metallischen Bauteilen ist dieses Verfahren nur dann anwendbar, wenn der Werkstoff oxidierbar ist. Je besser die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes ist, umso größer dürfen die zu entfernenden Grate sein.¹⁶² Das thermische Entgraten eignet sich nicht nur zur Entfernung von äußeren Graten, sondern auch zum Entfernen unerwünschter Materialanhäufungen im Inneren eines Werkstückes. Besonders vorteilhaft ist es für Hohlräume anzuwenden, die sonst mit einem mechanischen Verfahren nur schwer erreichbar bzw. zugänglich sind und wo andere Fertigungstechnologien unwirtschaftlich lange Bearbeitungszeiten

¹⁵⁹ Avila, et al., 2004

¹⁶⁰ Adam, et al., 1989

¹⁶¹ Beier & Nothnagel, 2015

¹⁶² ATL Anlagentechnik Luhden GmbH, 2013, S. 5-23

erfordern. Da das thermische Entgraten voll automatisierbar ist, steht einer Integration in eine industrielle Fertigungslinie nichts entgegen.¹⁶³

2.16.3. Wasserstrahlentgraten

Beim Wasserstrahlentgraten wird je nach Höhe des Arbeitsdruckes zwischen Hochdruckwasserstrahlen und Jet Cutting unterschieden. Jet Cutting Anlagen arbeiten mit Drücken von bis zu 4000 bar bei Durchflussmengen von 4 l/min. Die bei diesem Verfahren verwendeten Düsen haben einen Durchmesser von bis zu 0,5 mm. Beim Entgraten wird der Grat abgetragen und nicht abgebrochen. Da die Abtragsleistung mit diesem Verfahren bei Metallen verhältnismäßig gering ist, hat sich dieses Verfahren bislang weniger bewährt.

Von Hochdruckwasserstrahlen wird bei Anlagen mit Arbeitsdrücken bis zu 1000 bar und Durchflussmengen von 150 l/min gesprochen. Für das Bearbeiten von Metallen sind mindestens 600 bar erforderlich. Die Form der für das Entgraten benötigten Düse wird auf die jeweilige Entgrataufgabe abgestimmt. Die Düsen unterscheiden sich hinsichtlich der Strahlrichtung (vorwärts- oder rückwärtsstrahlend) und der Anzahl der Strahlkanäle. Durch die Zugabe abrasiver Stoffe wird die Abtragsleistung erhöht. Durch geeignete Auswahl der Strahlparameter und der Düsengeometrie kann die Größe des zu entfernenden Grates beeinflusst werden. Außerdem wird dadurch dem Grat in der Nähe seines Fußes eine Sollbruchstelle zugefügt, was leichteres Abbrechen zur Folge hat.¹⁶⁴ Ein von der Firma Piller entwickeltes Verfahren verwendet als Schneidflüssigkeit den Kühlschmierstoff von Bearbeitungsmaschinen zum Entgraten. Dadurch kann der Entgratvorgang in der Werkzeugmaschine, in der gleichen Aufspannung und unmittelbar nach der spanenden Bearbeitung durchgeführt werden.¹⁶⁵

2.16.4. PinFlow

Der Arbeitsraum wird mit Werkstücken, Stahlkugeln einheitlicher Größe und einer Spül-emulsion gefüllt. Während des Bearbeitungsvorganges können die Werkstücke den Arbeitsraum nicht verlassen. Durch eingebrachte mechanische Schwingungen in horizontaler Richtung entsteht eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und den Kugeln, wodurch Material abgetragen wird. Dringen die Kugeln auch in das Innere des Werkstückes vor, so wird dieses gleichzeitig im Inneren und Äußeren entgratet. Dieses Verfahren wird zum Entgraten von Bauteilen mit komplizierten Geometrien (z. B. Gehäuse von Pumpen, Hydraulikblöcke) verwendet. Am Ende des Bearbeitungsprozesses werden die Kugeln in den Vorratsbehälter zurückgeführt und das Spülmedium wird für den nächsten Bearbeitungsvorgang erneut aufbereitet. Da die verwendeten Stahlkugeln nur einen geringen Verschleiß unter-

¹⁶³ Bosch Rexroth AG, 2013

¹⁶⁴ Thilow, et al., 2008, S. 136ff

¹⁶⁵ Piller Entgrattechnik GmbH, 2014, S. 6

liegen, können sie für weitere Bearbeitungen wiederverwendet werden. Es ist ein sehr schnelles Bearbeitungsverfahren, bei dem die Rüstzeit und die Bearbeitungszeit jeweils nur 180 Sekunden betragen. Nach heutigem Stand der Technik ist dieses Verfahren auf ein maximales Bauteilgewicht von 80 kg und eine maximale Zuladung von 700 kg beschränkt.¹⁶⁶

2.16.5. Erix Tool

Das Erix Tool ist ein Werkzeug für das Entgraten, Ansenken und Abschrägen von Bohrungen. Mit der kleinsten Variante des in verschiedenen Baugrößen erhältlichen Werkzeuges sind Bohrungen ab einem Durchmesser von 4,5 mm bearbeitbar. Erst bei den Werkzeugbauarten, die für einen Bohrungsdurchmesser ab 10 mm einsetzbar sind, ist der Werkzeugschaft mit einem Kühlmittelkanal erhältlich. Das Erix Tool besteht aus einem Schaft, an dessen Ende eine Schwinge montiert ist (siehe Bild 32). Auf der Schwinge befindet sich die Schneide für die Spanabnahme. Diese ist entweder komplett aus HSS Stahl gefertigt oder es ist eine Hartmetallplatte für die Bearbeitung von höherfesten Werkstoffen auf der Schwinge angeschraubt. Beim rückwärtigen Senken wird mit den vom Hersteller angegebenen Werten für Spindeldrehzahl, Spindeldrehrichtung und Vorschubgeschwindigkeit gestartet. Beim Kontakt der Schwinge mit der Bohrungseintrittskante klappt die Schwinge in die Ausnehmung ein und das Werkzeug kann sich weiter Richtung Bohrungsaustritt bewegen. Hat die komplette Schwinge die Bohrung im Bohrungsaustritt verlassen, so wird die Spindeldrehzahl auf Rechtslauf geschaltet und die Schwinge klappt wieder aus. Wird jetzt auch die Vorschubrichtung geändert, so wird eine Fase oder eine Senkung hergestellt. Nachteilig ist bei diesem Werkzeug anzumerken, dass es sich nur zur Bearbeitung ebener Flächen eignet.¹⁶⁷

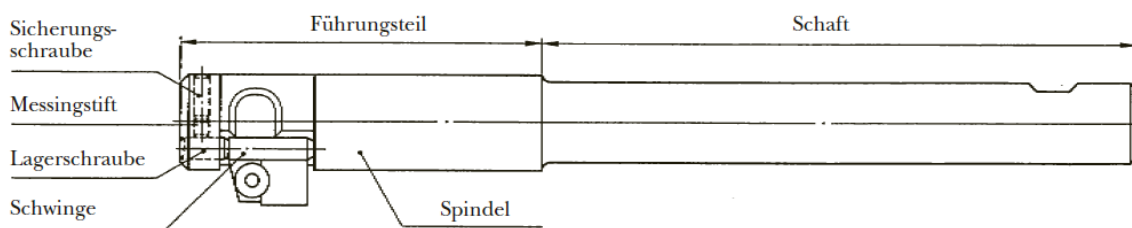


Bild 32: Prinzipieller Aufbau des Erix Tool.¹⁶⁸

¹⁶⁶ TDK Maschinenbau GmbH, 2015, S. 1-6

¹⁶⁷ Erix Tool, 2013, S. 3 ff

¹⁶⁸ Erix Tool, 2013, S. 3

2.17. Bohrverfahren

Die Bohrverfahren werden in verschiedene Untergruppen eingeteilt. Das für die gegenständliche Arbeit benötigte Bohrverfahren fällt in die Gruppe des Bohrens ins Volle. Hierfür werden sog. Wendelbohrer eingesetzt, deren Geometrie in DIN 6581 festgelegt ist. Je nach Anwendungsfall unterscheiden sich diese Bohrer in der Größe des Spitzenwinkels, der Drallrichtung und dem Schneidstoff. Von diesen sind Sonderbauformen erhältlich, die innere Kühlkanäle für die Kühlmittelzufuhr enthalten oder deren Schneiden aus auswechselbaren Wendeschneidplatten bestehen.¹⁶⁹ Zur Erreichung von hohen Stand- und Schnittzeiten wird die Geometrie und der Werkstoff, aus dem der Bohrer besteht, auf den jeweiligen zu zerspannenden Werkstoff angepasst.¹⁷⁰ Zur Herstellung von Bohrungen im Durchmesserbereich von 0,1 bis 3,0 mm bei besonders harten Werkstoffen kann, anstatt dem konventionellen Bohren, das Erodierbohren benutzt werden.¹⁷¹

2.17.1. Elektrochemisches Bohrverfahren (ECM)

Beim ECM Verfahren wird Material durch einen chemischen Prozess abgetragen, dessen Reaktionsgeschwindigkeit mit einer Spannungsquelle beschleunigt wird. Dabei wird das zu bearbeitende Werkstück als Anode und das Werkzeug als Kathode geschaltet. Das Werkzeug bildet die Negativform der zu erzeugenden Kontur ab und soll nur an seiner Stirnfläche Material abtragen. Auf der Mantelfläche ist eine isolierende Schicht aufgetragen, die einen Materialabtrag durch die seitlichen Elektrodenwände verhindert. Zwischen den Oberflächen der Elektrode und dem zu bearbeitenden Werkstück tritt dabei immer ein sehr kleiner Spalt auf. Da der Arbeitsspalt immer annähernd konstant gehalten werden muss, wird die Werkzeugelektrode mit langsamer, konstanter Geschwindigkeit in das Werkstück eingesenkt. Durch diesen Spalt wird während des Bearbeitungsvorganges ein Elektrolyt mit Drücken von bis zu 50 bar gepumpt. Die Flüssigkeit hat die Aufgabe, die bei der chemischen Reaktion entstehende Wärme, wie auch das dabei abgeschiedene Material abzutransportieren. Die Elektrolytzufuhr erfolgt, wie im Bild 33 dargestellt, entweder über einen in der Elektrode vorhandenen Kanal (Bild 33, links), von außen zum Arbeitsspalt mit Rückführung über den Elektrodenkanal (Bild 33, Mitte) oder nur von außen zum Arbeitsspalt (Bild 33, rechts). Damit der Arbeitsspalt am Ende der Bearbeitung überall den gleichen Wert aufweist, muss dafür die Geometrie der Elektrode optimiert sein. Da dafür im Vorfeld Bearbeitungsversuche durchgeführt werden müssen, eignet sich dieses Verfahren nicht für Kleinserien. Im Vergleich zu anderen Verfahren tritt hier keine Gratbildung auf.¹⁷²

¹⁶⁹ Westkämper & Warnecke, 2010, S. 140-141

¹⁷⁰ TTS Fertigungstechnologien GmbH, 2013, S. 43

¹⁷¹ Heun GmbH, 2015

¹⁷² Hellmich, et al., 2012, S. 220 ff

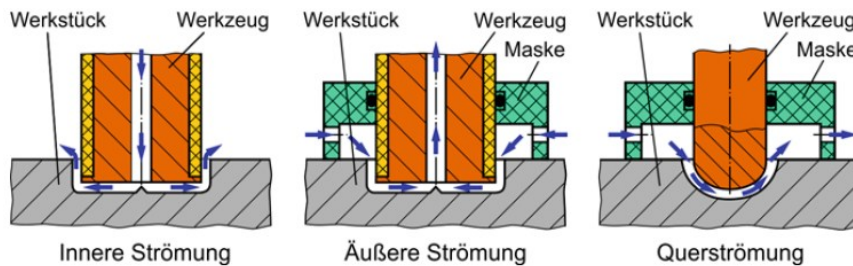


Bild 33: Varianten der Zufuhr des Elektrolyts.¹⁷³

Die Vorschubbewegung führt das Werkzeug aus, welches immer tiefer in das Werkstück eintaucht, ohne es dabei zu berühren. Dabei wird vom Werkstück Material abgetragen.¹⁷⁴ Werden sehr kleine Bohrungen hergestellt, so kann in die Elektrode kein Kanal für die Elektrolytzufuhr eingebaut werden. Hierbei wird das Verfahren mit der Querströmung verwendet (Bild 33 rechts). Das beim Bearbeitungsprozess abgetragene Material findet sich in ungelöster Form in der Elektrolytflüssigkeit wieder. Durch geeignete Vorrichtungen (z. B. Filter) werden diese aus dem Elektrolyt herausgefiltert. Verwendung findet dieses Verfahren zur Herstellung von Bohrungen mit kleinen Durchmessern. Damit können auch Werkstoffe mit hoher Festigkeit und Bohrungen, deren Achsen nicht rechtwinklig auf die Tangentialebene der Oberfläche im betrachteten Punkt liegen, gefertigt werden.¹⁷⁵ Mit dem ECM-Verfahren werden Bohrungen im Durchmesserbereich von 0,1 bis 5 mm hergestellt. Die Bohrtiefe kann dabei bis zu 200x größer sein als der Bohrlochdurchmesser.¹⁷⁶

2.17.2. PECM

Das PECM-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des herkömmlichen ECM. Hierbei führt das Werkzeug nicht nur eine langsame Vorschubbewegung aus, sondern diese überlagert sich mit einer zusätzlichen, mit einem Exzenter erzeugten, Hubbewegung von etwa 400 µm. Erst wenn die Elektrode einen Abstand von 10 µm zum Werkstück erreicht hat, wird im Millisekundenbereich eine impulsförmige Spannung angelegt und durch den kurzzeitigen Stromfluss Material abgetragen. Während der Auf- und Abwärtsbewegung der Elektrode, mit einer Frequenz von bis zu 60 Hz, wird frischer Elektrolyt in den Spalt befördert. Je nachdem, ob eine Schrupp- oder Schlichtbearbeitung durchgeführt wird, ändert sich dadurch die Vorschubgeschwindigkeit und das Materialabtragevermögen. Dabei werden Vorschubraten von 0,1 bis 2 mm/min erreicht. Der kleinste, damit realisierbare Bohrungsdurchmesser liegt bei 0,1 mm und darf dabei eine maximale Tiefe von 1 mm aufweisen.¹⁷⁷

¹⁷³ Hellmich, et al., 2012, S. 222

¹⁷⁴ Perovic, 2000, S. 242

¹⁷⁵ Klocke & König, 2007

¹⁷⁶ Wessels, 2007, S. 37

¹⁷⁷ Pemtec GmbH, 2009, S. 16 ff

2.17.3. Funkenerosionsverfahren

Im Gegensatz zum dem in Kapitel 2.17.1 beschriebenen Verfahren wird hier eine Flüssigkeit verwendet, die nicht elektrisch leitend ist. Während das Werkzeug immer tiefer in das Werkstück eintaucht, berührt es nie dessen Oberfläche. Der Arbeitsspalt wird immer vom Dielektrikum ausgefüllt. Das Werkstück ist bei diesem Verfahren als Kathode geschaltet, das Werkzeug als Anode. Das Dielektrikum wirkt wie ein Isolator. Um die Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums zu überwinden, muss die Anode einen bestimmten Abstand zur Kathode unterschreiten. Wird die dafür notwendige Position erreicht, so kommt es zum Funkenüberschlag und zur Ausbildung eines Plasmakanals. Die dabei vorherrschenden hohen Temperaturen bewirken ein Aufschmelzen und Verdampfen des Werkstückwerkstoffes und führen zur Bildung von Dampfblasen im Dielektrikum. Wird der Strom abgeschaltet, so fallen die Dampfblasen in sich zusammen, wodurch das aufgeschmolzene Material durch das Dielektrikum aus dem Arbeitsspalt heraustransportiert wird. Der am Werkzeug auftretende Materialabtrag (=Verschleiß) wird durch die Wahl von geeigneten Prozessparametern gering gehalten. Das Hauptanwendungsgebiet dieses Verfahrens liegt bei der Herstellung von Formen und Werkzeugen.¹⁷⁸ Da bei diesem Verfahren der Abtragsprozess über den Arbeitsspalt gesteuert wird, muss die Zustellbewegung, meistens durch das Werkzeug selbst, sehr genau gesteuert werden. Beim Senkerodierprozess kann die Bearbeitung als Schrupp- oder Schlichtzyklus durchgeführt werden. Bei der Schruppoperation erreicht die damit erzielbare spezifische Abtragsrate Werte von $9 \text{ mm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Mittenrauwert $\approx 2 \text{ } \mu\text{m}$). Die beim Schlichten erreichbare spezifische Abtragsrate liegt bei $0,3 \text{ mm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Mittenrauwert $\approx 0,5 \text{ } \mu\text{m}$).¹⁷⁹ Das abgetragene Material befindet sich in Form von kleinen Partikeln im Dielektrikum. Da der Arbeitsspalt bei diesem Verfahren sehr klein ist, besteht die Gefahr, dass diese Teilchen eine Brücke zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück bilden. Ein Kurzschluss wäre die Folge, welcher zu einer Beschädigung der Elektrode oder des Werkstückes führen würde. Um dies zu verhindern, wird der Arbeitsspalt gut mit Dielektrikum gespült und die abgetragenen Partikel über einen Filter abgeschieden. Die Zuführung des Dielektrikums erfolgt entweder von außen oder über einen in der Elektrode befindlichen Kanal. Dabei wird es entweder durch den Arbeitsspalt gepumpt, gesaugt oder durch kombiniertes Pumpen/Saugen zugeführt.¹⁸⁰ So werden auch kleine Bohrungen mit Durchmessern von bis zu $30 \text{ } \mu\text{m}$ hergestellt. Die damit erreichbare Bohrungstiefe darf als Länge den 10fachen Wert des Bohrungsdurchmessers nicht überschreiten. Bei großen Stückzahlen hat sich das Verfahren zur Herstellung von Bohrungen in Dieseleinspritzdüsen bewährt. Die dabei verwendeten Elektro-

¹⁷⁸ Klocke & König, 2007, S. 3 ff

¹⁷⁹ Hirsch, 2012, S. 415

¹⁸⁰ Oelheld GmbH, 2011, S. 17 ff

den haben die Gestalt eines Drahtes, der während der Bearbeitung eine Drehbewegung um seine Symmetrieachse durchführt.¹⁸¹

2.17.4. Trepanierbohren

Das Trepanierbohren ist ein Verfahren zur Herstellung von Bohrungen im Durchmesserbereich zwischen 0,2 bis 5 mm. Der Bohrprozess startet, wie im Bild 34 dargestellt, mit einer auf Basis des Perkussionsbohrens hergestellten Durchgangsbohrung. Dabei wird zunächst in der Mitte des herzustellenden Bohrloches mit einem pulsierenden Laser, je nach Laserbauart, eine Bohrung mit 0,1 bis 1 mm hergestellt. Das aufgeschmolzene Metall muss dabei über den Bohrungseintritt aus der Bohrung entfernt werden. Anschließend erfolgt die eigentliche Herstellung der Bohrung durch einen Schneidprozess, bei dem das flüssige Metall nach unten abgeführt wird. Dabei wird der Abtransport des durch den Laser aufgeschmolzenen Metalls aus der Schnittfuge durch eine Gasströmung unterstützt, die in Richtung des Laserstrahles gerichtet ist. Zur Erzeugung der für den Schnitt benötigten Bewegung steht das Werkstück still und der Laserstrahl wird durch ein Linsensystem so um die Bohrungsachse gelenkt, dass dadurch die für die Bohrung benötigte Schnittbewegung erzeugt wird. Bei einer anderen Variante des Trepanierbohrens wird durch die Bewegung des Tisches, auf den das Werkstück gespannt ist, die Schnittbewegung erzeugt. Die Bohrzeit beträgt, je nach verwendetem Laser, Bohrungsdurchmesser und Bohrtiefe, zwischen 1 und 20 Sekunden. Im Vergleich zum mechanischen Bohren, bei dem Neigungswinkel von maximal 20° realisierbar sind, ermöglicht dieses Verfahren auch Neigungswinkel größer als 60°. Das Trepanierbohren hat gegenüber den elektrochemischen Bohrverfahren den Vorteil der kürzeren Prozesszeit, wenn nur wenige Bohrungen hergestellt werden. Bei der Herstellung einer größeren Anzahl an Bohrungen ist das elektrochemische Verfahren die bessere Variante, da in diesem Fall mehrere Bohrungen gleichzeitig herstellbar sind.¹⁸² Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der Wärmeeintrag in das Werkstück durch den Laserstrahl.

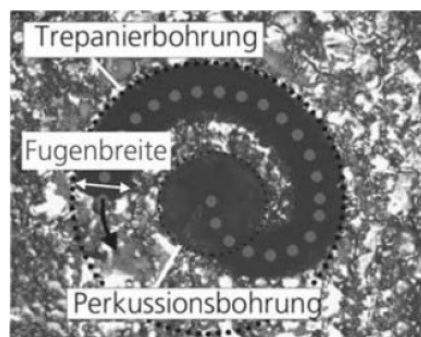


Bild 34: Verfahrensablauf: Ausgehend von einer Perkussionsbohrung wird eine Trepanierbohrung hergestellt.¹⁸³

¹⁸¹ Föhl, 2011, S. 34-35

¹⁸² Poprawe, 2005, S. 300-307

¹⁸³ Poprawe, 2005, S. 307

2.18. Rissprüfung

Bei Bauteilen, die eine sicherheitsrelevante Funktion erfüllen und die einen thermischen Prozess durchlaufen, ist eine 100%ige Überprüfung auf Rissfreiheit notwendig. Wird diese erst am Ende der Fertigung durchgeführt, so kommt es u. U. zur Fertigung von schadhafte Bauteilen, die später nachbearbeitet oder ausgesondert werden müssen.¹⁸⁵ Weit verbreitet ist das Magnetpulver-Rissprüfverfahren (sog. Fluxen), ein relativ aufwendiges manuelles Rissprüfverfahren. Hier wird das Werkstück über einen Induktor oder direkter Stromdurchflutung magnetisiert. Gleichzeitig wird das Werkstück mit einem dünnen Öl umspült, in dem feinste Eisenstäube und fluoreszierende Phosphorpartikel emulgiert sind. Durch die Magnetfeldlinien werden die Eisenpartikel in ggf. vorhandene Risse gezogen. Durch Beleuchtung mit einer UV-Lampe werden die mit den Eisenpartikel mit in die Risse gelangten Phosphorpartikel für das menschliche Auge sichtbar.¹⁸⁴ Ein anderes, relativ neues Verfahren zur Risserkennung während der Fertigung kann beim vierstufigen Pressen eines Wellenflansches eingesetzt werden. Dazu wurde ein Messsystem entwickelt und am oberen und unteren Werkzeug Sensoren montiert. Tritt während des Umformvorganges eine Schädigung des Bauteiles auf (z. B. beim automatisierten Richten), so entstehen dabei charakteristische Schallwellen, die akustisch gemessen werden.¹⁸⁵

2.19. Messung der Wanddicke

Um die Wanddicke eines Bauteiles mit einem taktilen oder optischen Messgerät zu bestimmen, muss dieses von beiden Seiten aus zugänglich sein. Bei Rohrleitungen, die beidseitig geschlossen sind, ist das nicht möglich. Hier bietet sich ein anderes Messverfahren an, die Messung der Dicke mit Hilfe des Ultraschalls.¹⁸⁶ Dabei wird die Eigenschaft genutzt, dass die in einen Körper eingeleiteten Schallwellen an den Grenzflächen reflektiert werden. Ist die Geschwindigkeit des Schalls c in einem Körper bekannt, so kann über die Zeit t , die die ausgestrahlte Schallwelle für den Weg s_{SG} vom Sender zur Grenzfläche und wieder zurück zum Empfänger benötigt, mit Gleichung (17) die Wanddicke d bestimmt werden. Diese entspricht dem halben Schallweg. Für das Einleiten und Auffangen der Schwingungen werden scheibenförmige Piezoelemente verwendet. Diese sind im Prüfkopf eingebaut und arbeiten als Aktoren zum Senden sowie als Sensoren zum Empfangen der Schallwellen.¹⁸⁷

$$s_{SG} = 1000 \cdot c \cdot t = 2 \cdot d_{PG} \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

Die dazu entwickelten Messgeräte können auf analoger oder digitaler Basis arbeiten. Bei den analogen Messgeräten gibt es zwei Möglichkeiten, um die Wandstärke zu bestimmen.

¹⁸⁴ Schiebold, 2015, S. 43ff

¹⁸⁵ Buse, et al., 2014, S. 54 ff

¹⁸⁶ Schiebold, 2015

¹⁸⁷ Bergmann & Zabler, 2006, S. 381 ff

Bei der ersten Variante wird zunächst die Skala am Display des Messgerätes so eingestellt, dass das Echo der Rückwand und das Signal des Sendeimpulses in den äußeren Randbereichen des Bildschirmes liegen. Ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine Welle mit vorgegebener Frequenz im Material ausbreitet, bekannt, so wird über den am Gerät eingestellten Skalenfaktor K und der am Display abgelesenen Differenz (T_{PG}) zwischen dem ausgestrahlten Signal und dessen Echo die Wanddicke bestimmt (Gleichung (18)).

$$s_{SG} = d_{PG} = K \times T_{PG} \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

Bei der digitalen Ausführungsvariante werden mehrere Echos eines Sendeimpulses berücksichtigt, was zu genaueren Messergebnissen führt. Dabei wird die Skala des Messgerätes so eingestellt, dass darauf mehrere Echos erkennbar sind. Wird das i -te Echo zur Berechnung der Wanddicke ausgewählt, errechnet sich diese aus der abgelesenen Differenz des Sendesignals und dem i -ten Rückwandecho nach Gleichung (19).

$$d_{PG} = \frac{s_{SG}}{i} = \frac{K \times T_{PG}}{i} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

Messgeräte, die auf digitaler Basis arbeiten, haben den großen Vorteil, dass die Messwerte elektronisch bzw. informationselektrisch verarbeitet werden. Werden Messköpfe ohne Vorlaufstrecke verwendet, so erfolgt die Messung der Wanddicke entweder aus der Zeitspanne zwischen dem gesendeten Impuls und dem ersten Rückwandecho (Bild 35) oder zwischen zwei hintereinanderliegenden Rückwandechos.¹⁸⁸

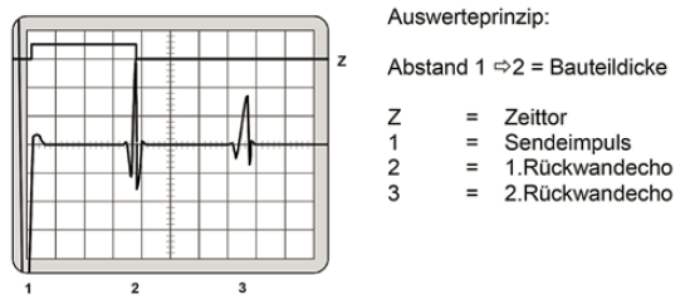


Bild 35: Bestimmung der Wanddicke durch Messung der Zeitspanne zwischen dem gesendeten Impuls (1) und dem ersten Echo (2).¹⁸⁹

¹⁸⁸ Schiebold, 2015, S. 173 ff

¹⁸⁹ Schiebold, 2015, S. 180

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Bestimmung der Zunderdicke des Schleudergussrohres

Das Ausgangsprodukt für die Herstellung einer hohlen Getriebewelle ist ein Schleudergussrohr, das einen Außendurchmesser von 126 mm, einen Innendurchmesser von 65 mm, und eine Länge von 3 m hat. Von diesem Rohmaterial werden kurze Rohrsegmente abgetrennt und plangedreht, um Rohteile für das anschließende Radialschmieden zu erhalten. Die Länge eines abgetrennten Rohrsegments beträgt 240 mm haben. Im Ausgangszustand weist dieses Rohrsegment im Inneren eine zerklüftete, mit Schlacke und Zunder besetzte Oberfläche auf. Zur Ermittlung der Oberflächentopografie des Schleudergussrohres wird zunächst aus einem Rohrabschnitt eine dünne Scheibe abgetrennt und daraus ein kleines Segment entnommen (Bild 36).

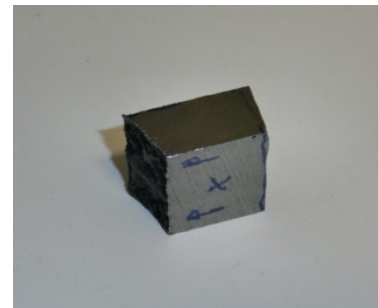


Bild 36: Schleudergussscheibe mit eingezeichneter Markierung zum Herausschneiden eines Segments (links) und herausgeschnittenes Segment für metallografische Untersuchungen zur Bestimmung der Zunderdicke (rechts).

Die Aufbereitung dieser Probe und die Lichtmikroskopie wird mit einem Axio Observer.Z1m des Herstellers Carl Zeiss am Institut für Werkstoffkunde der TU Graz durchgeführt. Die Probe wird in Kunststoff eingebettet, plangeschliffen und nicht geätzt. Das Bild 38 zeigt das Ergebnis der Untersuchung des Innenringes. Die Dicke der Zunderschicht liegt überwiegend bei 7 μm (Bild 37 links). In manchen Bereichen nimmt sie jedoch Werte bis zu 10 μm an (Bild 37 rechts). In diesem Bild ist auch ersichtlich, dass auf der Oberfläche Zerklüftungen vorhanden sind (linker Bereich im Bild 37 rechts)

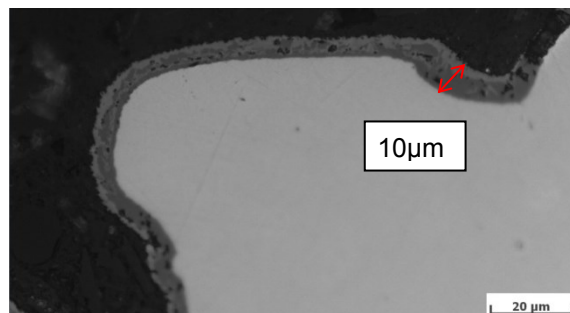
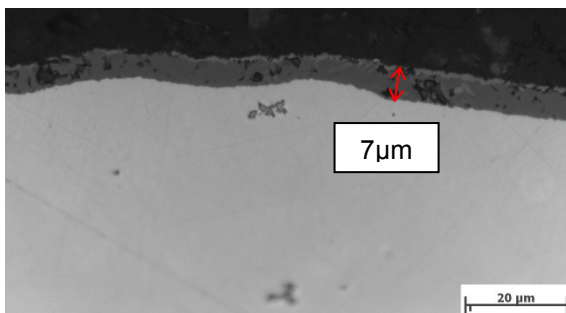


Bild 37: Ergebnis der Mikroskopie eines Innenringsegmentes: Minimale (links) und maximale (rechts) auftretende Zunderschichtdicke

In Bildern mit Vergrößerungsfaktoren zwischen 25x und 50x ist keine Zunderschicht mehr erkennbar. Dafür sind darin die durch den Schleudergussprozess entstandenen Senkungen und Hohlräume ersichtlich. Diese sind bis zu einer Tiefe von 1074 μm nachweisbar (Bild 38 links & rechts). Da hier bereits im Ausgangszustand eine verschmutzte und zerklüftete Oberfläche vorliegt, stellt ein innen unbearbeiteter Schleudergussrohrabschnitt als Rohteil für das nachfolgende Schmieden keine gute Ausgangslage für die Herstellung einer Getriebewelle dar.

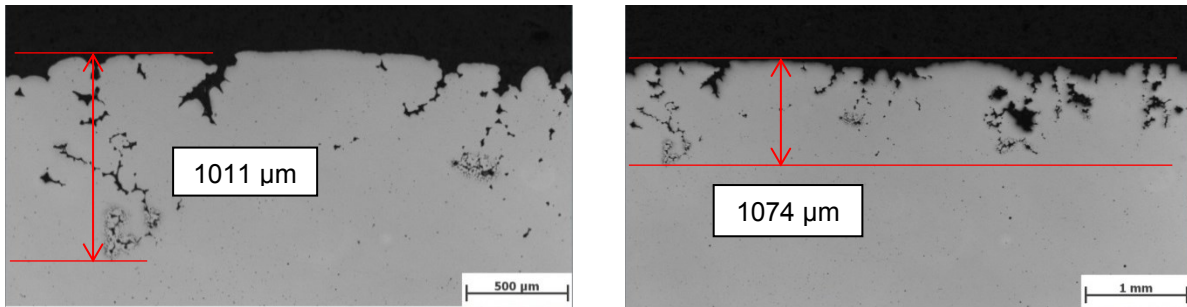


Bild 38: Ergebnis der Mikroskopie eines Innenringsegmentes: Lunker und Porositäten unter der Oberfläche

3.2. Ausgangszustand: Entzünderte Getriebewelle der Versuchsserie 3

Wird aus diesem Rohrabschnitt eine Getriebewelle hergestellt, welche nach dem Radial-schmieden durch das Kugelstrahlen im Inneren entzündert wird, so entsteht die im Bild 39 gezeigte Innenfläche.

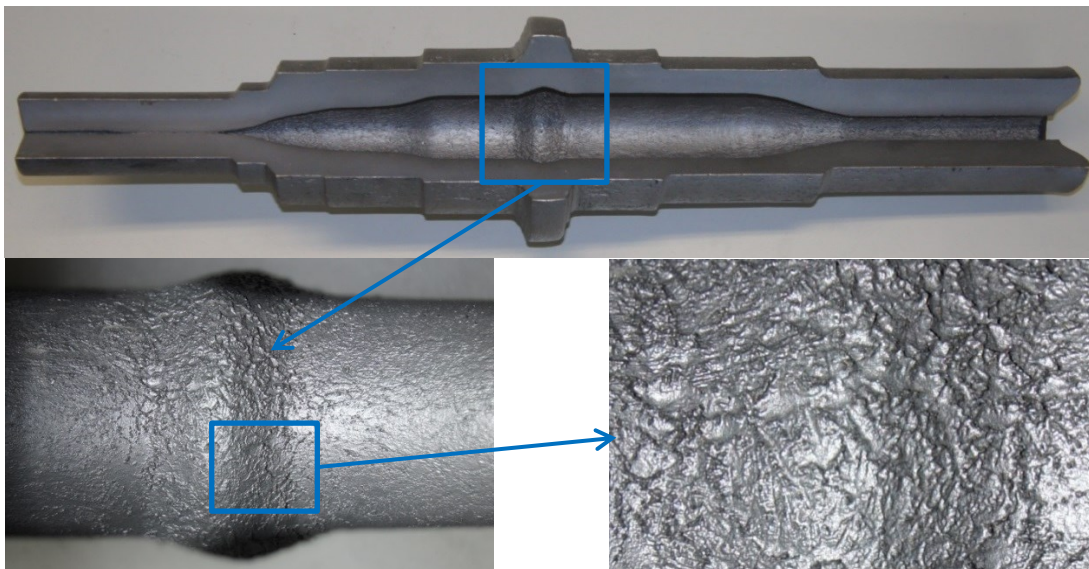


Bild 39: Oberfläche des zur Getriebewelle geschmiedeten Schleudergussrohrabschnitts der Serie 3. Das Schleudergussrohr ist innen nicht bearbeitet worden. Nach der Wärmebehandlung und der Hartbearbeitung erfolgte innen das Reinigen durch Kugelstrahlen.

Die zerklüftete Oberfläche, die wie kleine Kerben wirken, können unter Betriebsbedingungen Ausgangspunkte für Risse sein. Ein Riss birgt die Gefahr des vorzeitigen Wellenbruchs mit dem Totalausfall des gesamten Getriebes als Folge. Zum anderen können im Bereich dieser

Täler Zunderreste verbleiben, die sich im Betrieb von der Bauteiloberfläche lösen, mit dem Ölstrom mitgerissen werden und einen frühzeitigen Lagerschaden im Getriebe verursachen.

3.3. Sprengversuch

Hier wird untersucht, ob es mit einer Kombination von Stahlkugeln mit einer Zündschnur möglich ist, die Zunderschicht von der Oberfläche abzutragen. Die Sprengladung wird auf zwei unterschiedene Arten in die Getriebewelle eingebracht und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit überprüft (Bild 40). Bei der ersten Variante (Welle 1) kommt eine Rohrbombe (2) zur Anwendung. Diese besteht aus dem inneren, zylindrischen Hohlraum, in den eine Zündschnur (3) geschoben wird und dem äußeren Hohlraum, der mit den Stahlkugeln (5) gefüllt ist. An einem Ende der Zündschnur sitzt der Zündhut (4), mit dem die Explosion eingeleitet wird. Als Randbedingung wird dabei festgelegt, dass der Außendurchmesser der Rohrbombe maximal 18 mm haben darf, da diese sonst nicht über die 18,5 mm große Ölzuführungsbohrung in die Welle eingeführt werden kann. Die Zündschnur hat eine Gesamtlänge von 310 mm. Der Durchmesser des inneren Rohres muss 4,5 mm haben, um in diese die Zündschnur, die einen Außendurchmesser von 4,2 mm hat, einzufädeln. Bei der zweiten Variante wird die Zündschnur durch die Hohlwelle (Welle 2) gezogen. Anschließend wird der noch übrige Hohlraum mit Stahlkugeln (7), die jeweils einen Durchmesser von 1 mm haben, komplett gefüllt. Auch hier wird mit einem Zündhut (8), durch einen elektrischen Impuls, die Explosion eingeleitet.

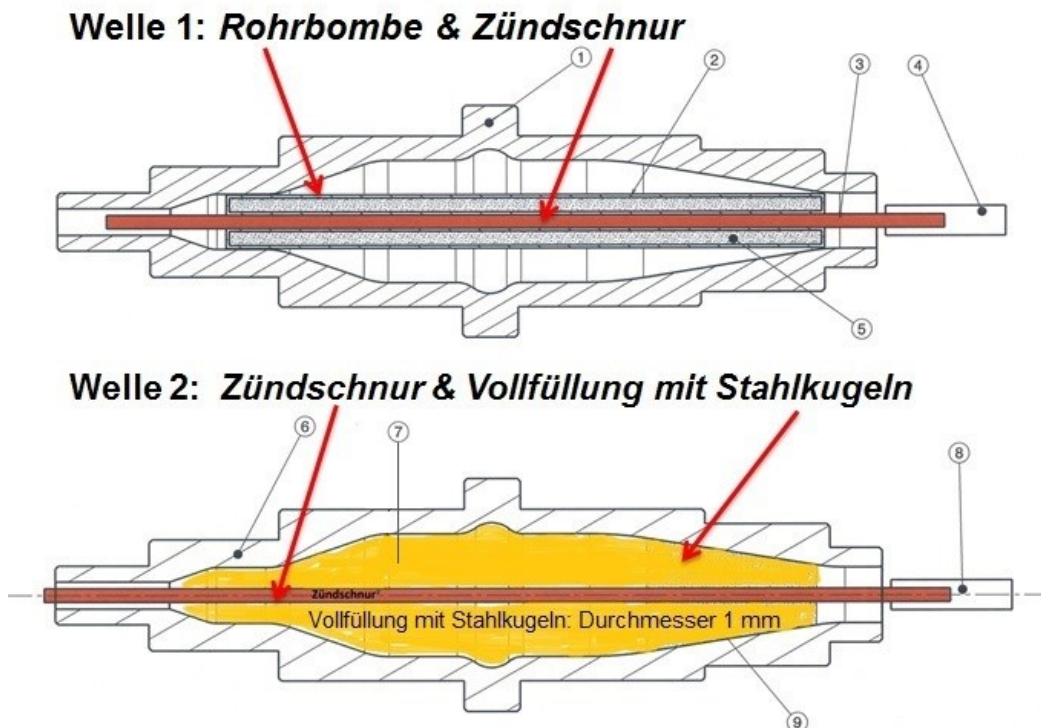


Bild 40: Zwei Konzepte für Sprengversuche: Welle 1 mit Rohrbombe (oben) und Welle 2 mit Stahlkugelvollfüllung und Zündschnur (unten)

Für die Herstellung des Körpers der Rohrbombe wird der Z-Printer 450, der mit dem Multijet 3D-Druckverfahren arbeitet, herangezogen. Deshalb besteht das damit hergestellte Bauteil aus einer Mischung von Kunststoffpulver (High Performance Pulver zp150) und Bindemittel (zb63 Cartridge klar). Zur Festigkeitssteigerung muss die Oberfläche mit einem Superkleber (zbond90) getränkt werden. Da der verfügbare Bauraum des verwendeten Z-Printer 450 für eine Komplettfertigung zu klein ist, wird das Gesamtpaket aus fünf kleineren Einzelteilen hergestellt. Es besteht aus den beiden Deckeln, dem Vorder-, Hinter- sowie Mittelteil (Bild 41 links). Durch das Zusammensetzen dieser fünf Einzelteile entsteht der Körper der Rohrbombe. Zunächst werden nur die drei größeren inneren Teile sowie ein Deckel zusammengeklebt. Nach der Volfüllung des größeren Hohlraumes mit 1 mm großen Stahlkugeln wird der Rohrbombenkörper auch auf der zweiten Seite mit dem Deckel verschlossen (Bild 41 rechts). Kurz vor der Sprengung wird durch den Innenraum die Zündschnur durchgezogen.

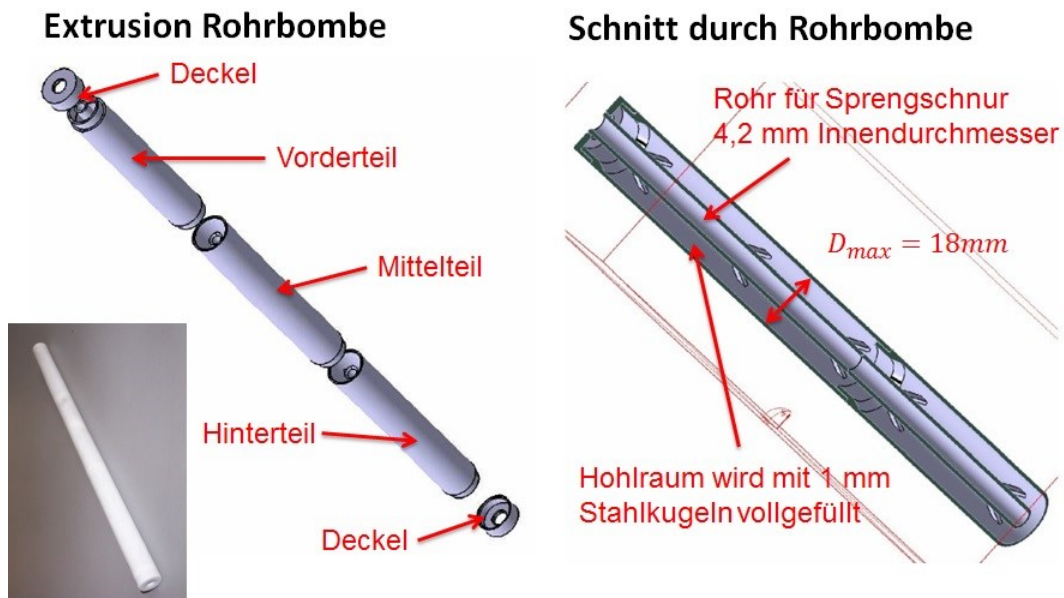


Bild 41: Extrusion der Einzelteile der Rohrbombe (links) und Schnitt durch die zusammengebauten Einzelteile (rechts)

Als Versuchsträger werden Getriebewellen verwendet, die für 3 Stunden bei einer Temperatur von 900 °C im Ofen gelagert werden und anschließend an der Luft langsam abkühlen. Zusätzlich werden an definierten Stellen Querbohrungen mit 2,2 mm Durchmesser eingebracht. Anschließend erfolgt das Schleifen der Lagerstellen 1 bis 5 und die Dokumentation der Lagerdurchmesser (Bild 42).

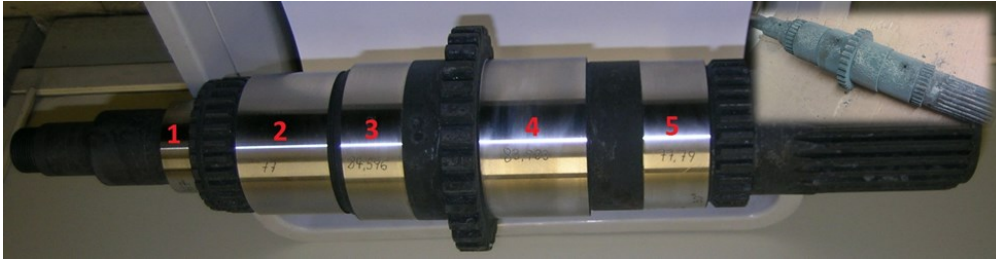


Bild 42: Getriebewelle für Versuch verzündert, vermessen, Lagerstellen geschliffen und Durchmesser dokumentiert

Der Versuch wird im Steinbruch der Firma Kanzel Steinbruch Denning in Gratkorn durchgeführt. Da bei der Sprengung die Gefahr besteht, dass die Welle beschädigt wird und es dabei zu einem Splitterflug kommt, werden die Erprobungsträger für den Versuch eingegraben (Bild 43). Als zweite Schutzmaßnahme wird die Baggerschaufel über die eingegrabenen Wellen gelegt. Zum Nachweis, dass sich durch die Sprengung der Durchmesser der angeschliffenen Lagerstätze nicht ändert, werden diese vor und nach der Sprengung mit einer Bügelmessschraube gemessen. Diese Messflächen sind zum Schutz vor Beschädigungen mit Panzertape abgeklebt.



Bild 43: Eingelegte Hohlwellen im ausgehobenen Sandhaufen (links) und eingegrabene Hohlwellen mit Baggerschaufel abgedeckt (rechts)

Nach dem Sprengversuch wird zuerst kontrolliert, ob sich die Durchmesser der Lagerstätze 1 bis 5 durch den Sprengversuch geändert haben. Wie in der Tabelle 3 ersichtlich, kommt es durch die Sprengung zu keiner Aufweitung der Welle. Alle Lagerstätze weisen keine Durchmesseränderung auf.

Durchmesser D Nr.	Durchmesser D					
	Welle 1			Welle 2		
	vorher	nachher	Änderung ΔD	vorher	nachher	Änderung ΔD
-	in mm	in mm	in mm	in mm	in mm	in mm
1	51,806	51,806	0	51,867	51,867	0
2	77,505	77,505	0	77,000	77,000	0
3	84,597	84,597	0	84,596	84,596	0
4	84,49	84,49	0	83,983	83,983	0
5	77,493	77,493	0	77,790	77,790	0

Tabelle 3: Messung der Wellendurchmesser 1 bis 5 vor und nach dem Sprengversuch

Das Bild 44 zeigt das Bearbeitungsergebnis der Welle 1 mit der Rohrbombe. Dort ersichtlich ist eine Gegenüberstellung von ausgewählten Oberflächen vor (a, d) und nach (b, c, e, f) dem Sprengversuch. Darin wird ersichtlich, dass mit diesem Verfahren nur ein sehr geringer Oberflächenbereich (ca. 5 %) von den Kugeln abgedeckt und getroffen wird (b). Dabei entstehen kleine, kalottenförmige Abdrücke (b) an der Wandoberfläche, in denen durchaus der Zunder abgeschlagen ist. Die Wahl eines alternativen Herstellverfahrens für den Körper der Rohrbombe führt dazu, dass ein Teil des Materials entweder die Querbohrung verstopft (f) oder auf einem Teil der Oberfläche zusammen mit Stahlkugeln (c) liegen bleibt. Des Weiteren bleibt dabei auch der Bohrungsgrat stehen, der auch teilweise von Material des Rohrkörpers bedeckt wird (e, f).

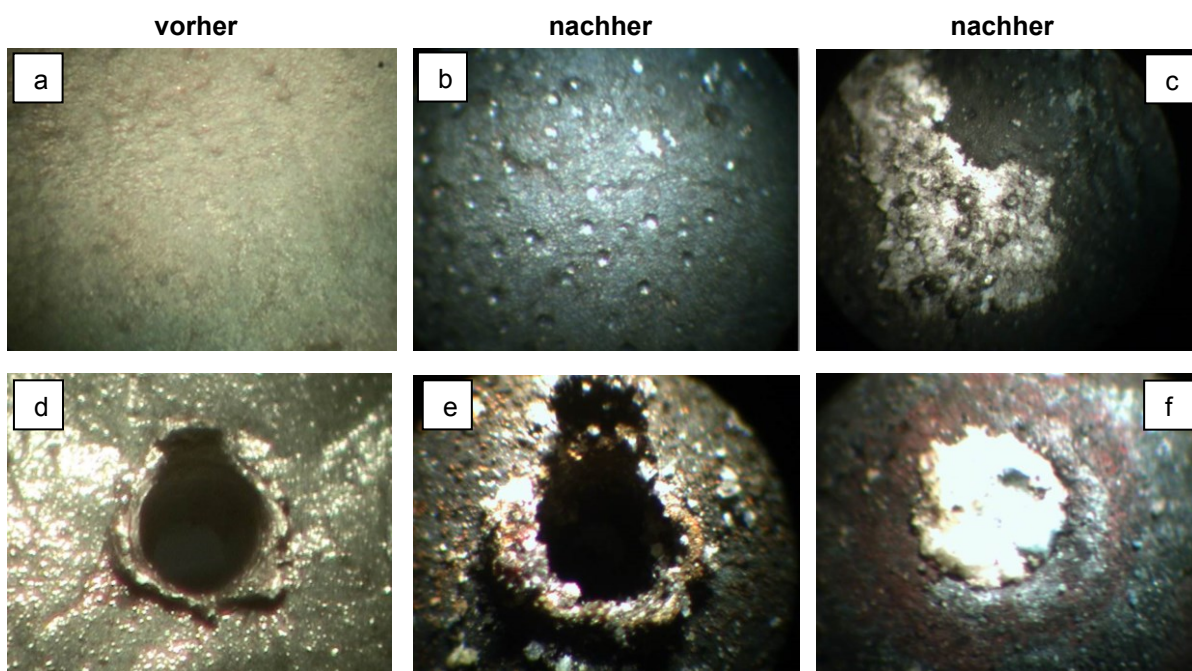


Bild 44: Vergleich ausgewählter Bereiche der Welle 1 vor (Bilder links) und nach (Bilder rechts) dem Sprengversuch mit der Rohrbombe

Bei der zweiten Variante, bei der die Welle 2 mit Stahlkugeln vollgefüllt ist, zeigt sich eine dichtere Verteilung der kugelkalottenförmigen Eindrücke an der Oberfläche (vgl. Bild 45 a-b). Dabei sind diese Verformungen nicht so tief wie bei der vorherigen Variante. Da auch hier nicht die komplette Wellenoberfläche abgedeckt wird, ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend. Die vollständige Gratentfernung ist somit fehlgeschlagen, da immer noch ein Gratrest stehen bleibt (vgl. Bild 45 c-d). Da mit beiden Varianten nicht der komplette Oberflächenbereich bearbeitet werden kann, sind beide Verfahrensvarianten nicht für das Entzundern und Entgraten anwendbar.

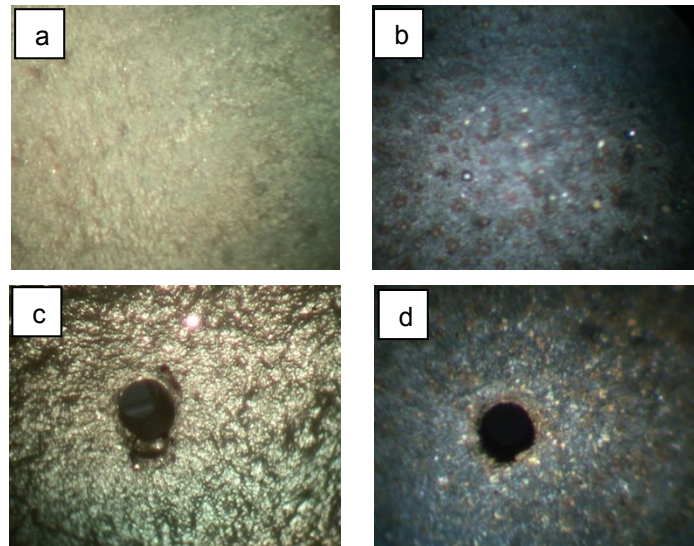


Bild 45: Vergleich von ausgewählten Bereichen der Welle 2 vor (Bilder links) und nach (Bilder rechts) dem Sprengversuch mit der Kugelvollfüllung

3.4. Seilwerkzeug

Nach den unbefriedigenden Ergebnissen des Sprengversuchs wird ein neuartiges Entzunderungswerkzeug entwickelt, welches trotz seiner kompakten Abmessungen auch die größten Bereiche des zylindrischen Hohlraumes erreichen kann. Hierfür wird zuerst ein einfaches Werkzeug angefertigt, das auf einem verdrehten Stahlseil aufgebaut wird. In der Mitte dieses Drahtes ist das eigentliche Bearbeitungswerkzeug befestigt. Zur flächigen Bearbeitung soll das Stahlseil rotieren. Hierfür ist ein Ende des Seils in die Spindel der Drehmaschine eingespannt und wird darüber rotatorisch angetrieben (siehe Bild 46 links). Das andere Seilende ist drehbar gelagert, im gegenüberliegenden Reitstock eingespannt (Bild 46 rechts).

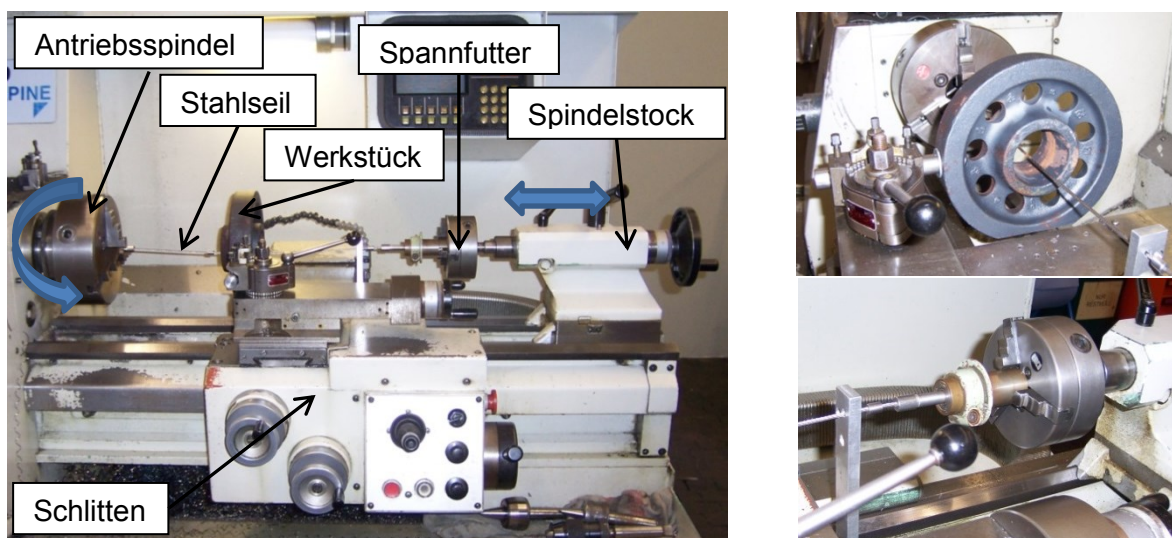


Bild 46: Prinzipieller Versuchsaufbau mit dem Seilwerkzeug zur Innenbearbeitung einer Zahnradnabe

Diese frei mitdrehende Seite lässt sich in Richtung der Arbeitsspindel achsparallel verschieben. Wird bei drehender Spindel die Seilspannung gelockert, so vergrößert sich der Rota-

tionsradius dieses Werkzeuges. Wird dagegen die Seilspannung erhöht, so verringert sich der Rotationsradius theoretisch bis auf $r \approx 0$ mm. Als Schneidwerkzeuge werden drei verschiedene Konzepte getestet:

- Werkzeughalter mit Schneidplatten (s. Abschnitt 3.4.1)
- zylindrische Schleifstifte (s. Abschnitt 3.4.2)
- tonnenförmiger Metallkörper mit Schleifstiften besetzt (s. Abschnitt 3.4.3)

Für die Prinzipversuche werden zwecks besserer Zugänglichkeit unbearbeitete, jedoch wärmebehandelte Zahnräder als Erprobungsträger herangezogen. Der Werkstoff der Zahnräder entspricht dem Werkstoff der Getriebehohlwelle.

3.4.1. Seilwerkzeug mit Schneidplatten

Im Bild 47 ist das auf dem Stahlseil montierte Werkzeug dargestellt. Die auf das Stahlseil befestigte Baugruppe besteht aus dem Werkzeughalter, auf den um 180° versetzt jeweils eine Schneidplatte montiert ist. Dieser Halter ist über die dort gezeigten Federn mit den beiden Klemmhülsen verbunden. Über die in den Klemmhülsen eingeschraubten Wurmschrauben erfolgt die Klemmung und Fixierung dieser Baugruppe auf dem Seil. Die Bearbeitungsversuche mit diesem Werkzeug zeigen, dass eine Entfernung des Zunders mit dieser Anordnung nicht möglich ist. Es wird zwar Material von der Oberfläche abgetragen (Bild 48), jedoch muss hierfür die Auslenkung sehr genau geregelt werden.



Bild 47: Stahlseil mit Werkzeughalter, bestückt mit zwei Hartmetallschneidplatten



Bild 48: Bearbeitungsergebnis am Erprobungsträger

Wird das Werkzeug zu stark ausgelenkt, so kommt es durch die dabei auftretenden, höheren Schnittkräfte zu einem Verdrehen des Werkzeuges um die Seilachse und gleichzeitig zu einer Ablenkung in radialer Richtung. Dies bewirkt Drehschwingungen im Seil. Die ungleichmäßige Schnittführung ist während des Bearbeitungsversuches durch unregelmäßig auftretende, klirrende Geräusche begleitet.

3.4.2. Seilwerkzeug mit drei zylinderförmigen Schleifstiften

Die entwickelte Baugruppe besteht aus drei zylinderförmigen Schleifstiften (Bild 49 links). Zwischen den Schleifstiften, wie auch den äußeren Schleifstiften und den Klemmhülsen, sind Schraubenfedern angebracht. Dieses Federn-Schleifstift-Paket wird von außen über zwei Klemmhülsen zusammengehalten und axial vorgespannt. Die Klemmhülsen sind über jeweils

einen Gewindestift mit dem Seil verbunden. Durch diese Federbauweise soll eine kleine Beweglichkeit des Seiles im Bereich außerhalb der Schleifstifte erhalten bleiben. Ab einer Drehzahl von 440 U/min kommt es zu einer gleichförmigen Rotationsbewegung dieses Werkzeuges. Bei diesem Versuch steht immer nur der mittlere der Schleifstifte im Eingriff. Ab einer Drehzahl von 660 U/min dreht sich der Schleifstift leicht um seine eigene Achse. Eine Erhöhung der Drehzahl auf 840 U/min bringt keine Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses, da dabei sogar weniger Material abgetragen wird (Bild 49 rechts).

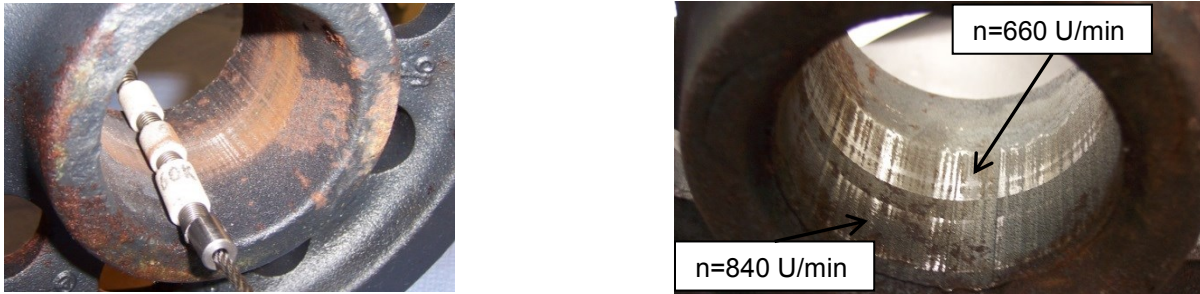


Bild 49: Aufbau des Werkzeuges (links) und Bearbeitungsergebnisse mit zwei verschiedenen Drehzahlen

3.4.3. Seil mit schleifmittelbesetzter Trommel

Mit der dritten Seilwerkzeugvariante (Bild 50 links) wird angestrebt, die Schnittleistung durch ein höheres Eigengewicht der Werkzeugaufnahme zu erhöhen. Damit sich das Werkzeug besser an die Werkstückkontur anpasst, wird es tonnenförmig ausgeführt. Auf die Mantelfläche dieser Tonne werden mit Superkleber Schleifkörner geklebt. Dieses Werkzeug wird, wie schon zuvor, mit vorgespannten Spiralfedern, Klemmhülsen und Wurm-schrauben auf das Seil gespannt. Ein mit einer Drehzahl von 1200 U/min durchgeführter Versuch zeigt, dass damit nur sehr wenig Material abgetragen wird (Bild 50 rechts).



Bild 50: Schleifmittelbesetzte Schleiftonne (links) und unbearbeiteter Flächenbereich (roter Pfeil); Bearbeitungsergebnis mit einer Drehzahl $n=1200$ U/min (rechts)

3.5. Versuche mit Bürsten

3.5.1. XEBEC Entgratbürste

Für diese Versuche werden zwei verschiedene Bürstengrößen von der Firma XEBEC verwendet (A31-CB25M mit 25 mm Durchmesser & A31-CB40M mit 40 mm Durchmesser). Die Borsten bestehen aus Nylonfasern, die mit Schleifkörnern aus einer speziellen Al_2O_3 -Keramik durchsetzt sind.¹⁹⁰ Zuerst wird ein Test durchgeführt um herauszufinden, ab welcher Drehzahl die Bürstenfasern eine Spreizung von 60 mm haben. Dafür wird als Testobjekt ein Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser von 60 mm verwendet. Die Bürsten werden zentrisch zum Rohr ausgerichtet und bis in die Mitte des Schaurohres einsenkt. Die Startdrehzahl liegt bei 500 U/min und wird in 500er Schritten gesteigert. Den Versuchsaufbau mit der größeren Bürste zeigt das Bild 51 links. Die Untersuchungen ergeben, dass bei der größeren Bürste (CB40m) bei Drehzahlen ≥ 2500 U/min (Bild 51 rechts) und bei der kleineren Bürste (CB25M) bei Drehzahlen ≥ 3500 U/min ein Kontakt der Borsten mit der Oberfläche auftritt.

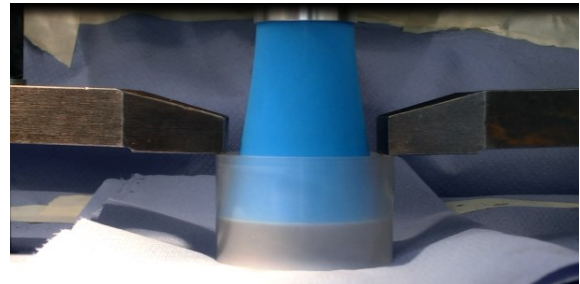
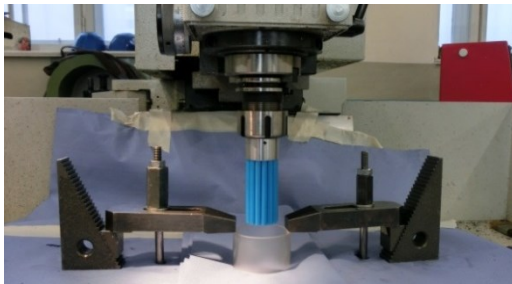


Bild 51: Versuchsaufbau mit XEBEC A31-CB40M (links) und Kontakt der Bürste mit dem Plexiglasrohr bei einer Drehzahl von 2500 U/min (rechts)

Beim Entzunderungsversuch der Oberfläche des Versuchsträgers, einem Zahnrad, wird die Bohrung des Zahnrades zweimal hintereinander von unten nach oben mit der Spindeldrehzahl von 4000 U/min und der Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min mit der Bürste bearbeitet. Dazu wird der Versuchsträger, gleich wie das Schaurohr (siehe Bild 51 links), auf den Fräsmaschinentisch aufgespannt. Die Entgratbürste wird zentrisch zur Bohrung des Werkstückes ausgerichtet und 50 mm tief in diese eingesenkt. Anschließend erfolgt die Bearbeitung von unten nach oben über eine Länge von 40 mm. Durch das um 10 mm tiefere Einsenken des Werkzeuges in die Bohrung wird verhindert, dass sich die Borsten aus der Bohrung herausbewegen. Das Bild 52 zeigt das jeweilige Bearbeitungsergebnis mit den beiden Entgratbürsten. Mit beiden konnte ein großer Teil der Oberfläche entzundert werden. Da dieses Werkzeug aber nur eine polierende Wirkung hat, kann es den Zunder aus den Riefen nicht entfernen.

¹⁹⁰ Kempf GmbH, 2014

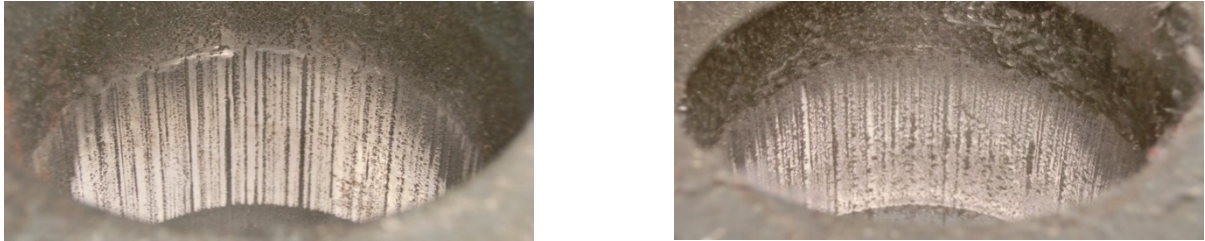


Bild 52: Bearbeitungsergebnis nach 2 Durchläufen mit XEBEC A31-CB25M (links) und XEBEC A31-CB40M (rechts); Spindeldrehzahl 4000 U/min, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/min

3.6. Fliehkräftauslenkungswerkzeuge

Die Überlegung ist, ein Werkzeug zu entwickeln, welches trotz seiner kompakten Abmessungen in der Lage ist, das Innere einer Hohlwelle zu bearbeiten. Es muss durch eine Bohrung mit dem Durchmesser $D=18,5$ mm passen und soll trotzdem in der Lage sein, das Innere des Hohlkörpers bis zu einem Durchmesser von 65 mm zu bearbeiten. Die Auslenkung des Werkzeuges muss durch die Zentrifugalkraft erfolgen, die durch den Antrieb einer Arbeitspindel entsteht. Die Drehachse dieses Werkzeuges soll in senkrechter Richtung liegen, damit die Gewichtskraft keinen Einfluss auf die Bearbeitung ausübt. Die Fliehkraft soll nicht nur das Werkzeug auslenken. Sie muss zusätzlich eine Kraft erzeugen, die das Werkzeug auf die Oberfläche drückt, um die Zunderschicht abzuschaben. Das Werkzeug soll dabei nur „schabend“ wirken, da die Zunderschichtdicke, die abgetragen werden soll, im 1/10 mm-Bereich liegt.

3.6.1. Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Stahlborsten

Für die ersten Versuche wird ein einfaches (Bild 53 links) Werkzeug angefertigt. Dieses wird aus einem Rundmaterial und einem Flacheisen hergestellt. Der dort gezeigte Werkzeugarm wird aus einem Flachstahl (Baustahl) hergestellt. An einem Ende des Hebels werden mit einer Platte Stahlborsten, die von einer Flexscheibe geschnitten sind, eingespannt. Dieses Werkzeug wird für den Bearbeitungsversuch in die Spindel einer Kunzmann-Fräsmaschine eingespannt. Das beim Bearbeitungsversuch verwendete Rohteil ist, wie vorhin, ein gesenkgeschmiedetes Zahnrad, welches auf den Maschinentisch aufgespannt wird (Bild 53 rechts).

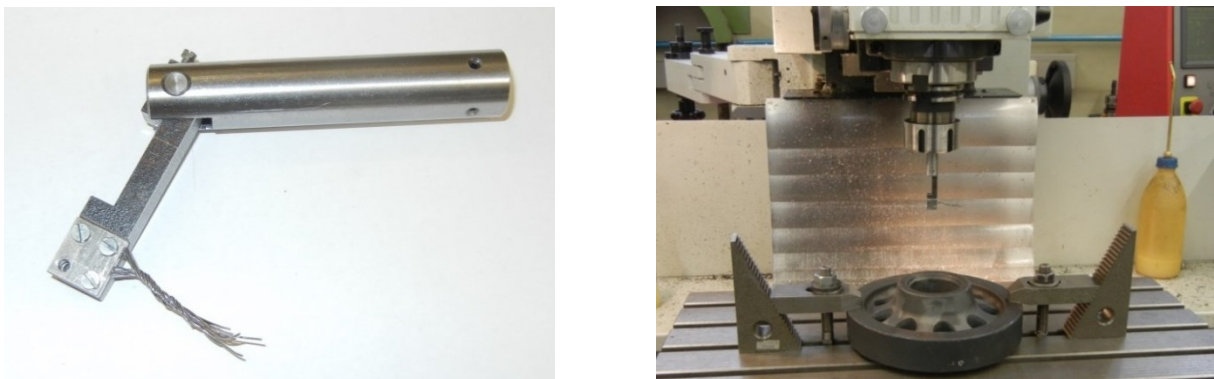


Bild 53: Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Stahlborsten (links); Werkzeug eingespannt in Frässpindel und Werkstück auf Fräsmaschinentisch aufgespannt

Es werden drei verschiedene Bearbeitungsversuche mit unterschiedlichen Drehzahlen (2x 2000 U/min; 1x 3000 U/min) mit einer Bearbeitungszeit von jeweils 25 Sekunden durchgeführt. Das Bearbeitungsergebnis zeigt das Bild 54. Darin ist ersichtlich, dass zwar ein Teil des Zunders abgekratzt wird, jedoch bleiben Bereiche, in denen Längsriefen vorhanden sind, unbearbeitet. Des Weiteren wird damit kein konstanter Materialabtrag erreicht, weshalb dieses Verfahren zur Entzunderung nicht geeignet ist.



Bild 54: Bearbeitungsergebnis des Fliehkraftauslenkungswerkzeuges mit Borsten

3.6.2. Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Schneidplatten V1

Die Untersuchungen werden auf einer Kunzmann Fräsmaschine WF 4/3 durchgeführt. Dabei wird das Werkzeug in die Maschinenspindel eingespannt und der Erprobungsträger auf den Maschinentisch aufgespannt (Bild 55).

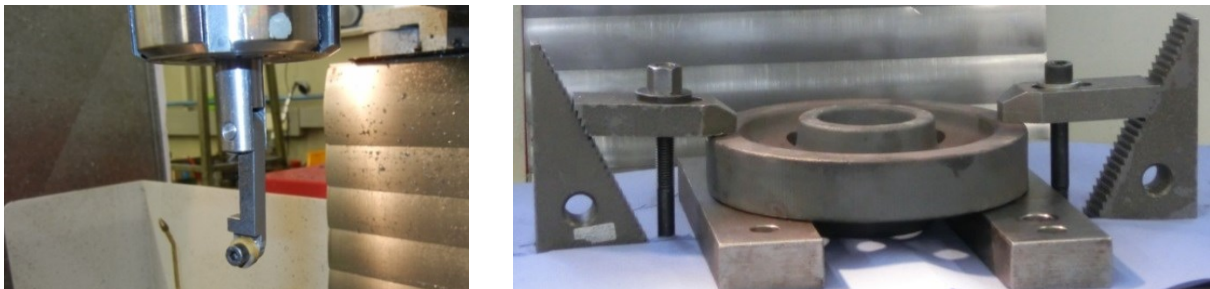


Bild 55: Eingespanntes Werkzeug in der Maschinenspindel (links) und aufgespannter Versuchsträger auf dem Maschinentisch (rechts)

3.6.2.1. Versuchsdurchführung

Beim ersten Durchlauf wird das Werkzeug im nicht ausgelenkten Zustand zentrisch zur Bohrung des Zahnrades ausgerichtet und anschließend 40 mm tief in die Bohrung eingesenkt. Anschließend wird die für den jeweiligen Durchgang definierte Spindeldrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit eingestellt. Wenn die Frässpindel die volle Drehzahl erreicht hat, wird der Vorschub aktiviert. Dann bewegt sich das Werkzeug zunächst von der Ausgangslage in die Richtung weg vom Aufspanntisch (Werkzeug wird auf einer Strecke von 20 mm „gezogen“). Anschließend bewegt es sich wieder in Richtung des Aufspanntisches (Werkzeug wird „geschoben“), bis die Startposition erreicht ist. Beim Erreichen der Ausgangsposition wird der Antrieb der Arbeitsspindel ausgeschaltet. Die dabei verwendeten Bearbeitungsparameter sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Durchlauf Nr.	Spindeldrehzahl [s in min ⁻¹]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1	2000	50
2	3000	50

Tabelle 4: Gewählte Bearbeitungsparameter mit dem Fliehkräftauslenkungswerkzeuges mit Schneidplatten

Für den anschließend durchgeführten, zweiten Durchlauf wird die Spindeldrehzahl auf $n=3000$ U/min erhöht und ein neues Versuchsrohteil eingespannt. Da das Werkzeug nur eine schabende und keine schneidende Wirkung haben soll, wird die Schneidkante durch Abnützung stumpfgeschliffen (Bild 56).



Bild 56: Verschlissene Wendeschneidplatte des Auslenkungswerkzeuges

Die zweite Bearbeitung erfolgt nach dem beim ersten Durchgang verwendeten Muster, jedoch wird diesmal nach dem Einsenken des Werkzeuges (in 40 mm Tiefe) die gesamte Oberfläche bis kurz vor dem Bohrungsende bearbeitet.

3.6.2.2. Versuchsergebnisse

Auf der linken Seite im Bild 57 ist eine zu 99 % glänzende Oberfläche zu sehen, die vom Zunder befreit ist. Diese ist jedoch nicht glatt, sondern besteht aus kleinen schalenförmigen Vertiefungen. Sie entstehen durch kurzzeitige Abdrängungen des Bearbeitungswerkzeuges durch die auftretenden Schnittkräfte. Die im Bild 57 links ersichtlichen grauen, noch verzun-derte Stellen (mehrere davon sind mit einem roten Pfeil markiert) können mit dieser Bearbeitungsfolge noch nicht komplett abgetragen wurden. Diese tiefen Riefen sind bei der Herstellung des Zahnradrohteils entstanden. Das Werkzeug bleibt bei diesem Versuch unbeschädigt (Bild 57 rechts).

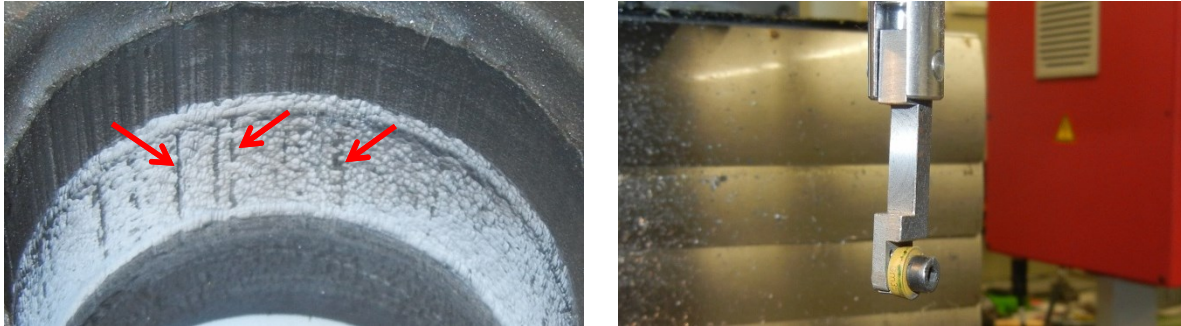


Bild 57: Versuchsergebnisse nach dem 1. Durchlauf: Bearbeitungsergebnis des Versuchsträgers (linkes Bild) und Zustand des Werkzeuges (rechtes Bild)

Beim zweiten Durchlauf mit einem neuen Zahnradrohteil wird die Spindeldrehzahl auf 3000 min^{-1} erhöht, wodurch auch die vorhin beobachteten Riefen nicht entstehen. Dadurch wird im gesamten bearbeiteten Bereich die Zunderschicht komplett abgetragen. Jedoch ist die Werkstückoberfläche nach der Bearbeitung sehr rau. Zudem kommt es zu einer plastischen Verformung des Werkzeuges (Bild 58 rechts). Da das Werkzeug im obersten Bereich zu lange stehen bleibt, wird es kurzzeitig zu stark in das zu bearbeitende Material hineingezogen und dabei stark plastisch verformt.



Bild 58: Ergebnisse des 2. Durchlaufes: Oberfläche des Versuchsträgers nach dem Versuch (links) und Zustand des Werkzeuges nach dem Bearbeitungsversuch (rechts)

3.6.3. Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Schneidplatten V2

Der vorherige Versuch hat gezeigt, dass diese Bearbeitungsmethode Potenzial zum Abtragen der Zunderschicht hat. Da die vorherige Ausführung des Werkzeuges nur aus einem Baustahl (C60) hergestellt und zudem der Ausleger zu filigran dimensioniert ist, wird eine optimierte Variante hergestellt (siehe Bild 59).



Bild 59: Optimiertes Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Schneidplatten (Version 2)

Diesmal wird für die Herstellung ein Werkzeugstahl verwendet und die Konstruktion steifer ausgebildet. Um ein erneutes „Fangen“ und dadurch hervorgerufene Beschädigungen zu vermeiden, wird für diesen Versuch das Werkzeug in die Bohrung eingefahren und anschließend nur mit einer ziehenden Bewegung der Span abgenommen. Für den Versuch wird eine Hartmetallplatte von Ceratizit (Modell: Ceratizit RCGT 0602MOEN-SM) verwendet.

3.6.3.1. Versuchsdurchführung

Für jeden Versuch wird jeweils ein neues Rohteil als Erprobungsträger verwendet, dessen Innenseite bearbeitet wird. Dabei wird die Bearbeitung mehrmals hintereinander durchgeführt, um eine komplett zunderfreie Oberfläche herzustellen. Um ein erneutes Fangen des Werkzeuges zu verhindern, wird hier mit einer geringeren Spindeldrehzahl gearbeitet.

3.6.3.2. Versuchsergebnisse

Das Bild 60a stellt die Ausgangssituation der verzunderten Oberfläche vor der Bearbeitung dar. Nach dem ersten Durchlauf mit dieser Bearbeitungsmethode ist ein Teil der Zunderschicht von der Oberfläche abgetragen. Das Bild 60b bis Bild 60e zeigt, wie die Oberfläche schrittweise durch mehrmaliges Anwenden vom Zunder befreit wird. Jedoch gibt es auch nach der 4. Anwendung immer noch Bereiche, auf denen die Oberfläche mit Zunder bedeckt ist. Auch mit diesen optimierten Parametern kann keine glatte Oberfläche erreicht werden.

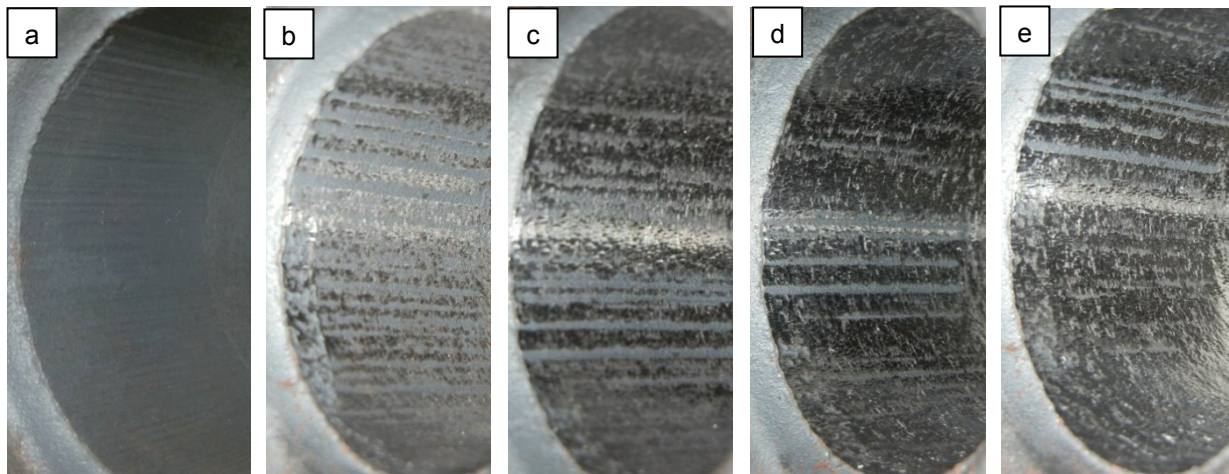


Bild 60: Aussehen des unbearbeiteten Versuchsrohteils (a) sowie Bearbeitungsergebnisse mit $S=1500$ U/min, $v=200$ mm/min nach einem (b), zwei (c), drei (d) und vier (e) Durchläufen

Beim zweiten Versuch wird lediglich die Vorschubgeschwindigkeit auf den Wert von 150 mm/min verringert. Dadurch wird, im Vergleich zu den Ergebnissen im Bild 60, nur eine geringfügige Verbesserung erzielt. Jedoch verbleibt auch hier, nach 4-facher Bearbeitung (Bild 61e), immer noch ein Zunderrest auf der Oberfläche. Die Oberfläche ist auch hier, wegen der nicht konstanten Schnittkraft, nicht ganz glatt. In Achsrichtung weist diese eine mittlere Rauheit von $R_a=4,69$ μm auf. Da damit auch die Oberfläche eine Rauigkeit aufweist

und nicht die komplette Zunderschicht entfernt werden kann, ist dieses Werkzeug zur Lösung der Aufgabenstellung nicht geeignet.

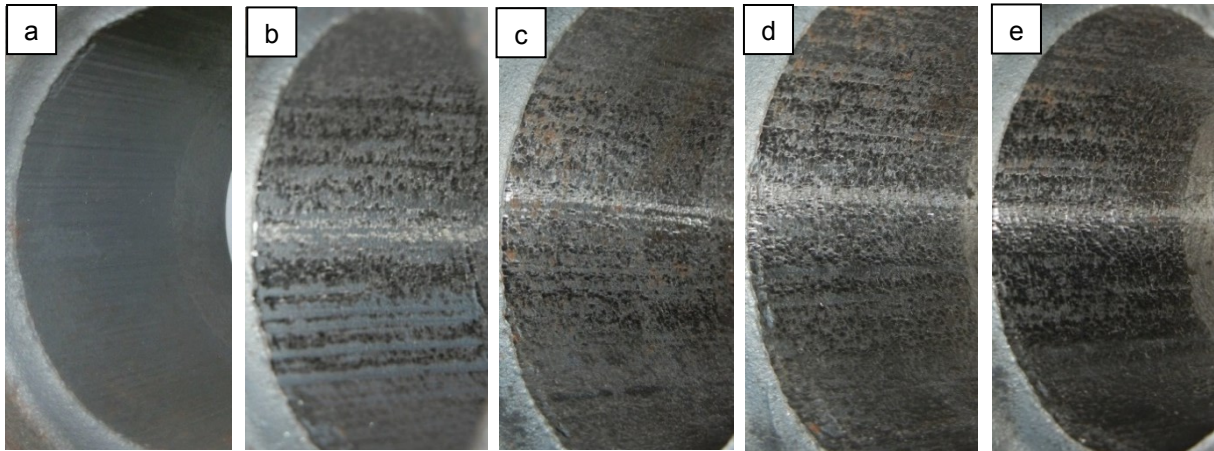


Bild 61: Aussehen des Versuchsröhlings und Ergebnisse der Bearbeitungsversuche mit $S=1500$ U/min, $v=150$ mm/min nach einem (b), zwei (c), drei (d) und vier (e) Durchläufen

3.7. Fliehkraftauslenkungswerkzeug mit Schleifstiften

3.7.1. Schleifstift zylindrisch

3.7.1.1. Versuchsaufbau

Mit den zuvor beschriebenen Werkzeugen ist es nicht möglich, die Zunderschicht vollständig zu entfernen und dabei gleichzeitig eine glatte Oberfläche zu erzielen. Deshalb wird untersucht, ob ein Werkzeug mit Schleifstiften dazu in der Lage ist. Dafür wird ein entsprechendes Versuchswerkzeug konstruiert und gefertigt, welches wieder durch die Fliehkraft ausgelenkt wird. Anstelle der Schneidplatten wird hier ein Schleifstift zur Spanabnahme vorgesehen (Bild 62 rechts). Das Werkzeug besteht aus einer Welle, in die eine Längsnut und eine Querbohrung eingearbeitet sind. Die Nut nimmt einen auslenkbaren „Schlägel“ auf, an dessen Ende ein zylindrischer Schleifstift aufgeklebt ist. Der Schlägel ist über einen Bolzen mit der Welle derart verbunden, dass er sich bei entsprechender Drehzahl auslenken kann. Die Drehachse wird in vertikaler Richtung gewählt, damit die Gravitationskräfte konstant auf die Werkzeugschneide wirken bzw. dass sich beim Stillsetzen der Arbeitsspindel das Werkzeug selbsttätig in seine Ruhelage begibt. Bei diesem Versuch wird ein zylindrischer Schleifstift aus Edelmetall (Aluminiumoxid) mit einer Länge von 14 mm und einem Außendurchmesser von 10 mm verwendet.

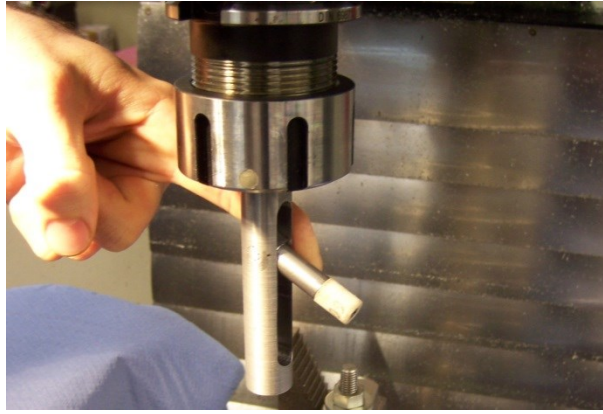
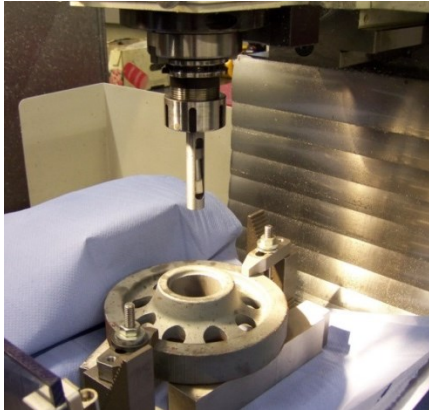


Bild 62: Versuchsaufbau (links) und mit Werkzeug mit zylindrischem Schleifstift eingespannt in die Werkzeugspindel (rechts)

3.7.1.2. Versuchsergebnisse

Das Bild 63a zeigt die Ausgangslage. Es werden hintereinander mit dem gleichen Schleifstift Bearbeitungsversuche mit den in Tabelle 5 dargestellten Werten für Spindeldrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt. Nach dem ersten Durchgang ist der bearbeitete Bereich, wie in Bild 63b ersichtlich, zu 20% vom Zunder befreit. Für den darauffolgenden Durchgang wird die Drehzahl der Spindel auf 2000 U/min gesteigert und gleichzeitig die Vorschubgeschwindigkeit auf 50 mm/min verringert. Dies führt zu der im Bild 63c dargestellten Oberfläche, auf der bereits 50% des Zunders abgetragen worden ist. Beim dritten Durchgang wird die Spindeldrehzahl auf 3000 U/min erhöht. Dadurch wird eine höhere Abtragsleistung erreicht, wodurch es auch zu einem höheren Verschleiß des Schleifkörpers kommt. Das Bild 63d zeigt das Ergebnis nach dem 3. Durchlauf. Durch die Bearbeitung mit diesem Bearbeitungsverfahren wird die Oberfläche zu 95 % vom Zunder befreit. Probleme bereiten die Längsriefen, die vom Schleifkörper nicht erreicht werden. Da der Schleifstift relativ weich ist und zwischen den einzelnen Durchgängen nicht gewechselt wird, hat aufgrund seiner starken Abnutzung teilweise der Schlägel anstatt des Schleifstiftes Kontakt mit der Oberfläche. Dadurch kommt es während der Bearbeitung zeitweise zur Funkenbildung und zur Ausbildung von umlaufenden Riefen auf der Oberfläche des Versuchsträgers (Bild 63e). Die ersichtlichen Längsriefen sind nicht das Ergebnis des Bearbeitungsversuches, sondern waren bei der Fertigung des Versuchsrohteils entstanden.

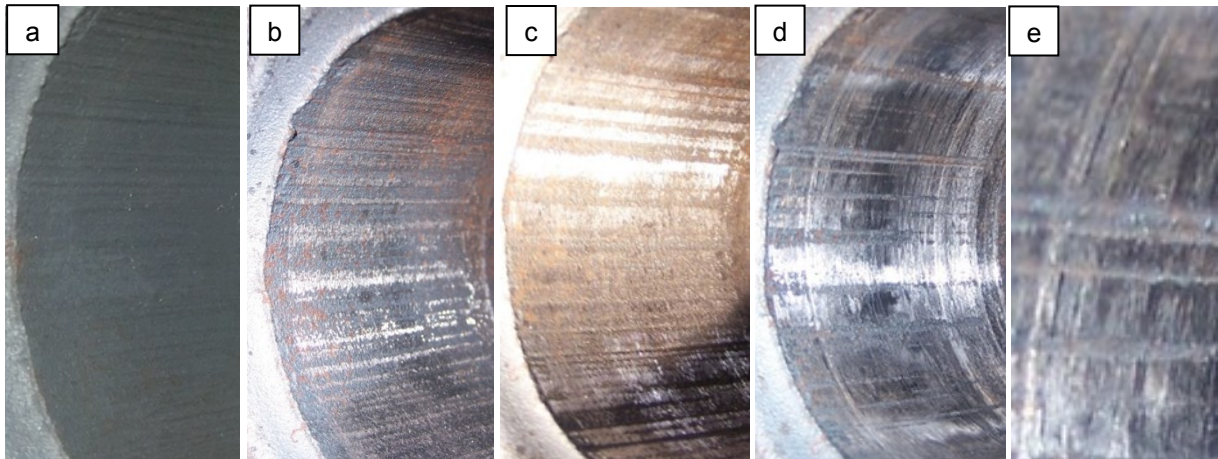


Bild 63: Aussehen des Versuchsrohlings (a) und Ergebnisse der Bearbeitungsversuche mit $S=1500 \text{ U/min}$, $v=150 \text{ mm/min}$ nach einem (b), zwei (c) und drei (d) Durchgängen; Detailaufnahme der Längs und Querrillen auf der Oberfläche nach drei Bearbeitungsvorgängen (e)

Da sich bei dieser Konstruktion der Schleifstift nicht um seine eigene Achse drehen kann, hat er nur in einem relativ kleinen Oberflächenbereich Kontakt mit der zu bearbeitenden Fläche und verschleißt deshalb sehr schnell. Bereits nach dem 2. Durchlauf (Bild 64 und Bild 65) ist er schon so stark verschlissen, dass er für keinen weiteren Versuch mehr verwendbar ist. Im Bereich der Stirnseite hat der Schleifstift nur noch eine Wandstärke von 2 mm. Nach der dritten Bearbeitung mit dem gleichen Schleifstift ist dieser schon so stark verschlissen, dass ein Teil des Schleifstifthalters bei einer weiteren Anwendung an der Oberfläche des Werkstückes scheuern würde (Bild 66 & Bild 67) und kein Materialabtrag mehr stattfinden würde.



Bild 64: Verschleißzustand nach dem 2. Durchlauf Seitenansicht



Bild 65: Verschleißzustand nach dem 2. Durchlauf Frontalansicht



Bild 66: Verschleißzustand nach dem 3. Durchlauf Seitenansicht



Bild 67: Verschleißzustand nach dem 3. Durchlauf Frontalansicht

Durchlauf Nr.	Spindeldrehzahl [S in min^{-1}]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1	1000	100
2	2000	50
3	3000	50

Tabelle 5: Versuchsparameter für die Bearbeitungsversuche mit dem zylindrischen Schleifstift

3.7.2. Schleifstift kugelförmig

Da sich ein kugelförmiger Schleifstift besser an räumlich gekrümmte Oberflächen anpasst, wird für das nächste Werkzeug ein kugelförmiger Schleifstift gewählt. Dafür wird der in Abschnitt 3.7.1 beschriebene Werkzeughalter verwendet, in den der im Bild 68 dargestellte Schleifstift eingespannt wird. Auf die Versenkbarkeit des Schleifstiftes in den Grundkörper des Werkzeuges wird bei diesem Versuch verzichtet.

3.7.2.1. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Das hier verwendete Werkzeug besteht (siehe Bild 68) aus einer Welle, in die – wie bereits beschrieben – eine Längsnut und eine Querbohrung eingearbeitet sind. Der in die Bohrung eingepresste Bolzen dient als Schwenkachse für den Ausleger, in dessen Längsbohrung der Schleifstift eingelegt und mit drei Schrauben fixiert ist. Als Schleifstift wird ein Halbedelkorund-Schleifstift (Korundgemisch, keramische Bindung, KU 16 6 ADW 60 M 5 V) mit einem Kugeldurchmesser von $D=16$ mm und einen Schaftdurchmesser von 6 mm verwendet. Durch die gewählte, runde Form des Schleifkörpers passt sich dieser an die sich ändernden Konturen besser an. Es werden vier Versuche mit demselben Versuchsträger und Schleifstift gefahren, jedoch mit unterschiedlichen Spindeldrehzahlen. Die Tabelle 6 zeigt die bei diesem Versuch gewählten Parameter für die Durchläufe 1 bis 4.



Bild 68: Flihkraftauslenkungswerkzeug mit kugelförmigem Schleifstift

Durchlauf Nr.	Spindeldrehzahl [S in min^{-1}]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1	1000	100
2	2000	100
3	3000	100
4	4000	100

Tabelle 6: Gewählte Versuchsparameter für den kugelförmigen Schleifstift

3.7.2.2. Versuchsergebnisse

Ausgangspunkt ist die, im Bild 69a dargestellte, verzünderte Oberfläche der Bohrung des Zahnrades als Versuchsträger. Nach dem ersten Durchlauf wird ein kleiner Teil der Oberfläche vom Zunder befreit (silberner Bereiche in Bild 69b). Durch die mehrmalige Anwendung dieses Verfahrens wird eine in Bild 69b bis Bild 69d ersichtliche, schrittweise Verbesserung der Oberfläche erreicht. Dabei wird bis zu 95% des Zunders abgetragen. Problematisch sind jedoch nach wie vor die tieferen Rillen. Sie werden vom Werkzeug nur dann erreicht, wenn von den bereits zunderfreien Bereichen noch weiteres Material abgetragen wird.

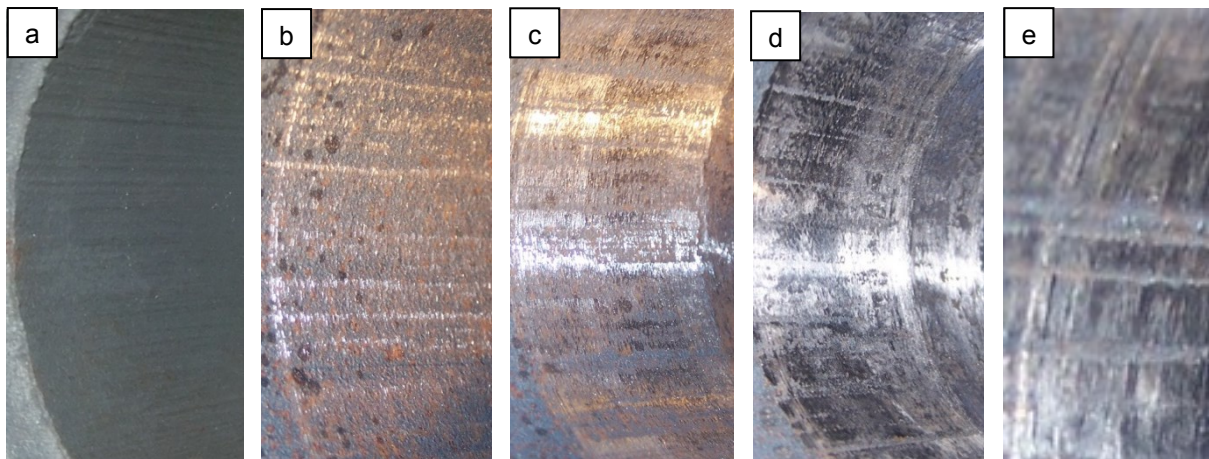


Bild 69: Aussehen des Versuchsrohteils (a) und Ergebnisse der Bearbeitungsversuche (gewählte Versuchsparameter siehe Tabelle 6) nach einem (b), zwei (c) und drei (d) Durchgängen; Detailaufnahmen der Oberfläche nach dem vierten Bearbeitungsvorgang (e)

Der bei diesen Versuchen verwendete Schleifstift hat zwar eine große Oberfläche, es wird aber nur ein kleiner Bereich seiner Oberfläche zum Abtragen des Materials verwendet (Bild 70a&c). Entsprechend ist der Schleifmittelverschleiß lokal begrenzt. Da der für diesen Versuch gewählte Schleifstift zu hart, ohne Kühlschmierstoffzuführung gearbeitet wird und zudem immer nur im gleichen Bereich beansprucht wird, ist die Bindung des Schleifkörpers bereits nach dem dritten Durchgang verschlossen (Bild 70b). Es sammelt sich abgetragenes Material auf der Oberfläche des Schleifstiftes an, wodurch sich seine Schnittleistung stark verringert. Nach dem vierten Durchgang hat sich noch mehr Material auf dem Schleifstift angelegt (Bild 70d).

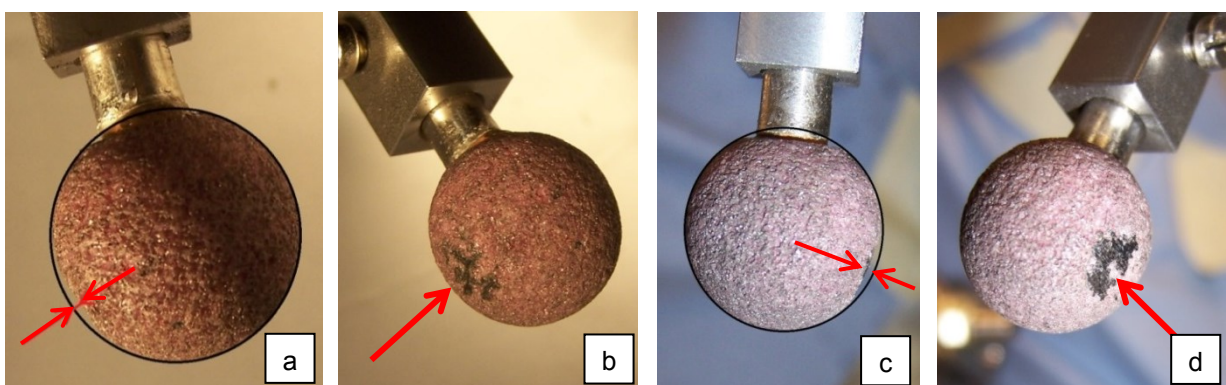


Bild 70: Verschleißbilder des Schleifstiftes nach dem dritten Durchlauf mit Abnützung (a) und aufgetragenes Material auf Schleifstift (b); Verschleißbild nach dem vierten Durchlauf mit Abnützung (c) und aufgetragenes Material auf Schleifstift (d)

3.7.3. Schleifstift zylindrisch und drehbar

Die durchgeführten Versuche belegen, dass der Schleifkörper nur einen sehr kleinen Oberflächenbereich bei der Bearbeitung ausnützt und deshalb sehr schnell verschleißt. Das Werkzeug muss deshalb dahingehend optimiert werden, dass der Schleifkörper durch die auftretenden Bearbeitungskräfte langsam in Eigenrotation versetzt wird. Dadurch wird zur Bearbeitung ein größerer Teil seiner Oberfläche genutzt. Für diesen ersten Versuch wird

bewusst auf die Vorgabe verzichtet, dass das Werkzeug im eingeklappten Zustand durch eine Bohrung mit vorgegebenen Durchmesser $D=18,5$ mm passen muss. Zur Versuchsdurchführung wird ein „rosa“ Schleifstift aus Halbedelkorund in Zylinderform mit dem Außendurchmesser von 15 mm und der Länge von 20 mm gewählt (Bild 71).



Bild 71: Vorderer Teil des Werkzeuges mit eingespanntem Schleifstift und Feder für die Einstellung des Verdrehwiderstandes

Das Bild 72 zeigt die Einzelteile des bei diesem Versuch verwendeten Werkzeuges, das in den Werkzeughalter eingespannt wird. Um den Aufbau besser darzustellen werden die Komponenten teilweise übereinandergelegt und deren Lage zueinander mit einer roten Linie angedeutet. Das Bearbeitungswerkzeug besteht aus einem Bolzen mit Außengewinde, der auf einer Seite einen Bund als Anschlag hat. Auf diesen Bolzen wird zunächst der Schleifstift bis zum Anschlag aufgeschoben. Anschließend folgt eine Beilagscheibe. Sie verhindert, dass sich der Schleifkörper während des Bearbeitungsvorganges, bei dem er sich auch um seine eigene Achse langsam dreht, an der Stirnseite durch die auftretende Relativgeschwindigkeit zwischen Feder und Schleifkörper zu stark abnutzt. In einem Bereich des Bolzens ist ein Außengewinde vorhanden. Über dieses wird durch Verdrehen einer Sechskantmutter (Einstellmutter) die Vorspannkraft der Feder eingestellt. Die im Bild 72 ersichtliche zweite Mutter dient als Kontermutter, die verhindert, dass sich die Einstellmutter während der Bearbeitung löst. Am Ende des Bolzens ist eine Passung angebracht, die zur Aufnahme der geschlitzten Hülse dient. Über diese wird die vorher beschriebene Einheit mit drei Wurmschrauben im schwenkbaren Schlägel fixiert.

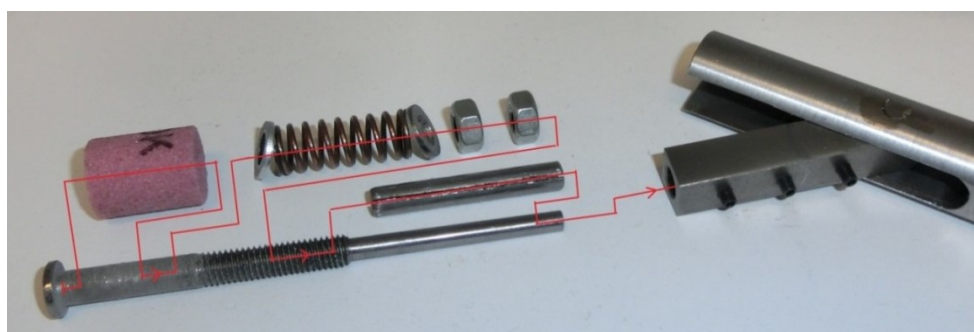


Bild 72: In Einzelteile zerlegtes Werkzeug

Durchlauf Nr.	Spindeldrehzahl [S in min ⁻¹]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1	1000	100

Tabelle 7: Gewählte Bearbeitungsparameter für den Versuch mit dem Werkzeug mit dem verdrehbaren Schleifstift.

Beim Vergleich des unbearbeiteten Versuchsträgers (Bild 73a) mit dem bearbeiteten (Bild 73c) ist zu erkennen, dass nach dem ersten Durchgang 50% des Zunders abgetragen ist. Da die jetzige Konstruktion eine leichte Drehung des Schleifkörpers zulässt, weist dieser auf einem großen Bereich ein gleichmäßiges Verschleißbild auf. Aus der anfänglich zylindrischen Geometrie (Bild 73b) ist in gewissen Oberflächenbereichen ein Kegelstumpfprofil (Bild 73d) entstanden. Für einen weiteren Versuch muss der Schleifkörper ausgewechselt werden. Da dies für die großindustrielle Fertigung nicht wirtschaftlich wäre, wird hier kein weiterer Versuch mit diesem Schleifstift durchgeführt.

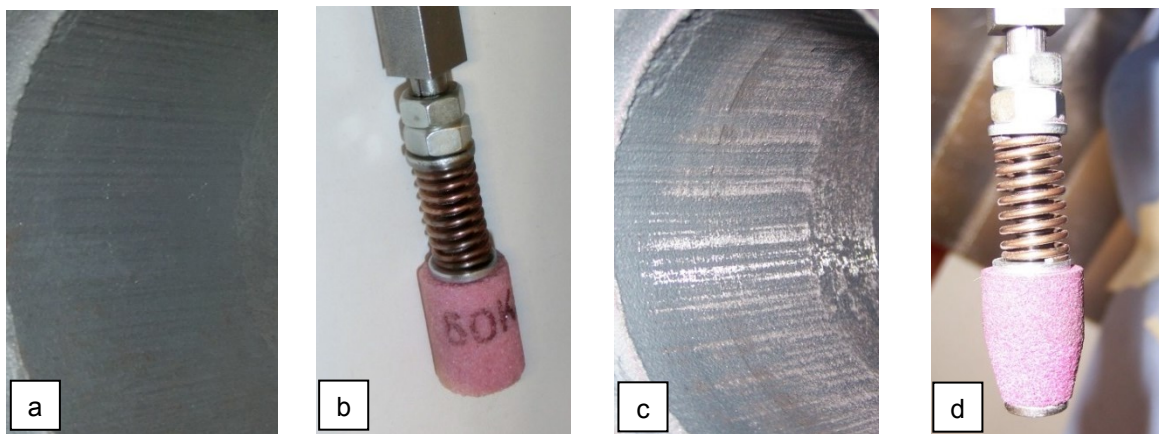


Bild 73: Versuchsträger vor der Bearbeitung (a) und nach der Bearbeitung mit dem Schleifstiftwerkzeug (c); Schleifstift vor dem Bearbeitungsversuch (b) und Verschleißzustand nach der Bearbeitung (d)

3.7.4. Schleifstift kugelförmig und drehbar

Die vorherigen Versuche zeigen, dass die Art des verwendeten Schleifstiftes einen sehr starken Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis hat. Um den optimalen Schleifstiftwerkstoff für die spezielle Bearbeitungsaufgabe zu evaluieren, werden mit dem in Abschnitt 3.7.2.1 beschriebenen kugelförmigen Werkzeug weitere Versuche durchgeführt. Dabei wird das Schleifmittel in seiner Zusammensetzung variiert. Die Tabelle 8 gibt hierüber eine Übersicht. Nicht alle Schneidstoffe sind in der gleichen Dimension auf dem Markt erhältlich.

3.7.4.1. Auswahl des optimalen Schleifstiftes

Die Tabelle 8 zeigt die wichtigsten Daten der Schleifstifte, mit denen eine Testbearbeitung durchgeführt wird. Sie unterscheiden sich in der Korngröße, dem Schleifkornmisch, der Härte, der Art der Bindung und im Kugeldurchmesser.

Versuch	Bezeichnung	Kopf-Ø	Korngröße	Härte (ISO 535)	Bindung	Schleifkorn-gemisch	Katalog	Seite
SSV1	KU 13 6 AWCO 60 J 5 V	Ø13mm	K60	J	keramisch	Korundgemisch	203	24
SSV2	KU 16 6 ADW 30 M 5 V	Ø16mm	K30	M	keramisch	Korundgemisch	203	9
SSV3	KU 16 6 AN 30 N 5 B	Ø16mm	K30	N	Kunstharz	Normalkorund	203	29
SSV4	KU 16 6 AR 60 O 5 V	Ø16mm	K60	O	keramisch	Edelkorund	203	14
SSV5	KU 16 6 AR 30 O 5 V	Ø16mm	K30	O	keramisch	Edelkorund	203	14
SSV6	KU 16 6 ADW 60 M 5 V	Ø16mm	K60	M	keramisch	Edelkorund	203	9
SSV7	KU 13 6 AWCO 46 J 5 V	Ø13mm	K46	J	keramisch	Edel- & Sinterkorund	203	24
SSV8	KU 13 6 AWCO 80 J 5 V	Ø13mm	K80	J	keramisch	Edel- & Sinterkorund	203	24

Tabelle 8: Kenndaten der verwendeten Schleifstifte.¹⁹¹

Die Versuche werden mit den in Tabelle 9 dargestellten Parametern durchgeführt. Die Nummern SSV1 bis SSV8 zeigen die beim Versuch verwendeten Schleifstifte. Jeder Schleifstift wird mehrmals hintereinander mit verschiedenen Spindeldrehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten getestet. Zwischen jedem Durchgang wird der Schleifstift so weit verdreht, dass der folgende Versuch mit einem unverbrauchten Oberflächenbereich des Stiftes durchgeführt wird. Da die getesteten Schleifstifte aufgrund ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung jeweils ein anderes Verschleißverhalten zeigen, welches sich im jeweiligen Schleifergebnis und Verschleißbild widerspiegelt, werden ab dem 4. Durchgang die Spindeldrehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit auf den jeweiligen Fall angepasst. Die Durchgänge D1 bis D3 werden immer mit den gleichen Zerspanungsparametern durchgeführt.

Durchgang	Versuch													
	SSV1		SSV2		SSV3		SSV4		SSV5		SSV6		SSV7	
	s	v	s	v	s	v	s	v	s	v	s	v	s	v
	1/min	mm/min	1/min	mm/min	1/min	mm/min	1/min	mm/min	1/min	mm/min	1/min	mm/min	1/min	mm/min
D1	2000	50	2000	50	2000	50	2000	50	2000	50	2000	50	2000	50
D2	2500	50	2500	50	2500	50	2500	50	2500	50	2500	50	2500	50
D3	3000	50	3000	50	3000	50	2000	50	3000	50	3000	50	3000	50
D4	3000	50	3000	50	3000	10	3000	10	3000	10	3000	10	3000	10
D5	3000	10	3000	10	-	-	4000	10	4000	10	4000	10	4000	10
D6	3000	10	4000	50	-	-	-	-	4000	10	4000	10	-	-
D7	-	-	4000	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Verfahrenweg 30mm/Durchlauf bei allen Durchgängen
s = Spindeldrehzahl
v = Vorschubgeschwindigkeit

Tabelle 9: Versuchsparameter für die Auswahl des optimalen Schleifstiftes

Das Bild 74 zeigt das Aussehen der Oberflächen nach den hintereinander folgenden Durchgängen der Bearbeitung mit den in der Tabelle 9 gezeigten Parametern. Nach dem 5. Bearbeitungsvorgang ist mit Schleifstift SSV2 eine komplett zunderfreie Oberfläche entstanden. Dafür hat sich aber, im Vergleich zur erzeugten Oberfläche beim 4. Durchlaufes, die Oberflächentopografie verschlechtert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die zu langsam gewählte Vorschubgeschwindigkeit zu hohe Zerspanungstemperaturen aufgetreten sind.

¹⁹¹ PFERD Werkzeuge, 2015

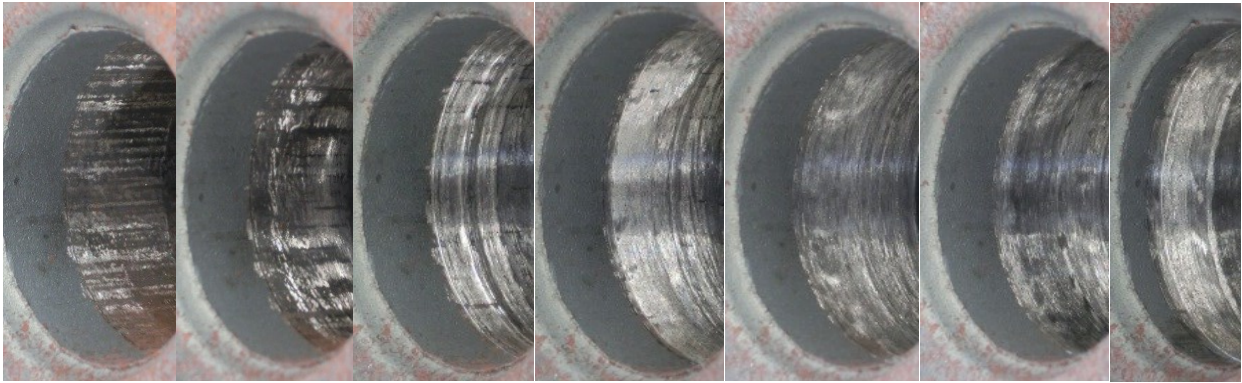


Bild 74: Bearbeitungsergebnis der Versuchsreihe SSV2 mit erster Bearbeitung (links) und fortlaufend dargestellter Veränderung der Oberfläche (von links nach rechts) mit schrittweiser weiterer Bearbeitung des gleichen Versuchsträgers mit den Parametern nach Tabelle 9; Zunderfreiheit nach der vierten Bearbeitung

Der verwendete Schleifstift SSV2 zeigt eine minimale Neigung zum Verkleben seiner Oberflächenporen und weist einen geringen Verschleiß auf (Bild 75). Im Vergleich zu den anderen untersuchten Schleifstiften stellt dieser die optimale Wahl für das Entzundern dar. (Aus Platzgründen wird auf die Ergebnisse der anderen Schleifstifte nicht genauer eingegangen.)

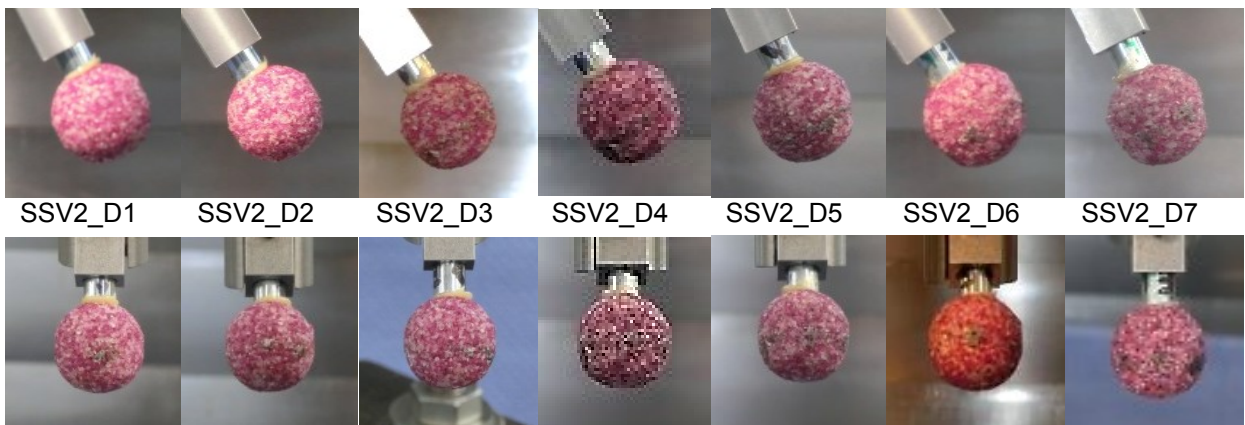


Bild 75: Verschleißverhalten des Schleifstiftes SSV2 in Seiten (oben) und Vorderansicht (unten) mit den in Tabelle 9 angegebenen Parametern

Für jeden Schleifstift wird nur ein einziges Versuchsteil verwendet, an dem direkt hintereinander die Schleifversuche durchgeführt werden. Die Versuchsergebnisse werden in Tabelle 10 bewertet.

	SSV1	SSV2	SSV3	SSV4	SSV5	SSV6	SSV7	SSV8
Schleifleistung D1-D3	2	1	1	2	1	1	2	2
Verschleißneigung D1-D3	3	1	5	1	1	2	2	2
Verpickneigung D1-D3	2	2	1	4	2	3	2	3
Teilsumme	7	4	7	7	4	6	6	7
Zunderfreiheit nach 1 DG	5	1	5	5	2	3	5	5
Ergebnis	12	5	12	12	6	9	11	12
Skala (1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, 4 = ausreichend, 5 = nicht ausreichend)								

Tabelle 10: Beurteilung der Bearbeitungsergebnisse der Schleifstifte und Markierung des Testsiegers (grün unterlegt, da Schleifstift mit den geringsten Punkten)

3.8. Drehbares Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Spannfutter

Hier wird zum ersten Mal der Schleifstift mit einem Spannfutter aufgenommen (Bild 76).

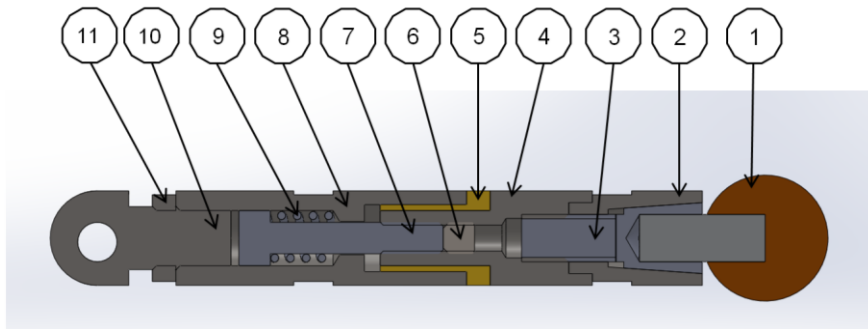


Bild 76: Aufbau des Schleifstiftes mit Spannfutter: (1) Schleifstift, (2) Spannkonus, (3) Spannfutter, (4) vorderes Gleitlager, (5) Gleitlagerhülse, (6) Wurmschraube M4, (7) Schraube M4 mit Innensechskant, (8) hinteres Gleitlager, (9) Spiralfeder, (10) Anbindungsstück, (11) Kontermutter

Über die Vorspannung der Spiralfeder (9), die über die Schraube (7) reguliert wird, wird zwischen den Lagern (4 und 8) ein Verdrehwiderstand eingestellt. Die Wurmschraube (6) verhindert das Aufdrehen der Schraube. Zwischen diesen Lagern ist eine Hülse aus Bronze, die als austauschbares Verschleißteil konzipiert ist. Damit wird die Drehbewegung des Schleifstiftes während der Bearbeitung eingestellt. Der Schaft des Schleifstiftes (1) wird durch das Hineinziehen des Spannfutters (3) in den Spannkonus (2) geklemmt.

Die Innenfläche wird einmal mit den in Tabelle 11 gezeigten Parametern bearbeitet. Hierzu wird ein Schleifstift in Kugelform wie beim Versuch SSV2 mit den in der Tabelle 8 angegebenen Abmessungen und Zusammensetzung verwendet. Mit den bei diesem Versuch ausgewählten Versuchsparametern lässt sich die Oberfläche auf eine Länge von 40 mm in einem Durchgang komplett entzundern (Bild 77c). Durch seine langsame Drehung um seine eigene Achse nutzt der Schleifstift gleichmäßig abgenutzt (Bild 77d).

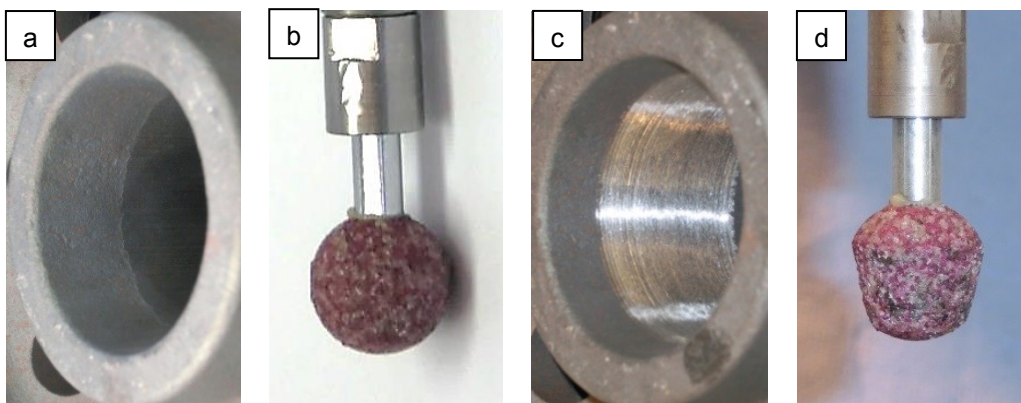


Bild 77: Zustand der Oberfläche des Versuchsteils und Zustand des Schleifstifts vor (a, b) und nach der Bearbeitung (c, d)

Durchlauf Nr.	Spindeldrehzahl [S in min ⁻¹]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1	4000	40

Tabelle 11: Bearbeitungsparameter beim Versuch mit dem Schleifstiftwerkzeug mit Spannfutter

3.9. Fliehkräftauslenkungswerkzeug mit Kugelfräser

Um die Standzeit des Werkzeuges zu erhöhen, wird anstelle eines Schleifstiftes ein Hartmetallkugelfräser in den Werkzeughalter eingespannt. Dabei wird gleichzeitig das im vorherigen Versuch verwendete Werkzeug weiterentwickelt. Das Bild 78 zeigt den neu konstruierten und hergestellten Werkzeughalter. Der Schaft des Frässtiftes wird bis zum Anschlag in die Bohrung der Spannhülse (1) gesteckt. Diese beiden Teile werden in die Hülse A (2) eingefädelt, um in der Folge das Gewinde des Frässtiftes in die Hülse B (3) einzuschrauben. Über die Nuten am Umfang der Teile (2) und (3) wird diese Baugruppe mit einem Gabelschlüssel fest angezogen. Bei jedem Kugelfräserwechsel muss sie zerlegt werden. Die zweite Hauptbaugruppe besteht aus dem Stift (5), der an seinem Ende einen Reibkegel hat, welcher wiederum auf dem Innenkegel der Hülse C (4) aufliegt. Das Bremsmoment, das über diese Reibkegelpaarung erzeugt wird, wird über die Feder (6) eingestellt. Durch das Einschrauben des Stiftes (5) in den Schaft (7) wird die Federvorspannkraft eingestellt und somit das Reibmoment reguliert. Als Verdrehsicherung wird der Stift (5) über vier radial eingeschraubte Gewindestifte gesichert. Die Verbindung dieser mit der vorhin erwähnten Baugruppe erfolgt durch Anziehen des auf den Teilen (4) und (6) befindlichen Gewindes. Damit sich diese Bauteile über die Drehzahl ausschwenken lassen, sind der Schaft (7) und die Welle (8) mit einem Passstift verbunden. In der Kontaktzone der Welle und des Stiftes ist eine Spielpassung vorgesehen, damit ein Schwenken möglich ist. In der Kontaktzone des Stiftes mit dem Schaft ist eine Presspassung ausgeführt. Dieses Werkzeug hat einen Außendurchmesser von 16 mm. An allen drei beschriebenen Hülsen ist am Umfang die gleiche Schlüsselweite angebracht, wodurch die Teile angezogen oder auch wieder für das Zerlegen aufgeschraubt werden können. Der im Schaft der Spannhülse (1) angebrachte Schlitz dient als Hilfe beim Ausschrauben der Spannhülse beim Wechseln des Frässtiftes.

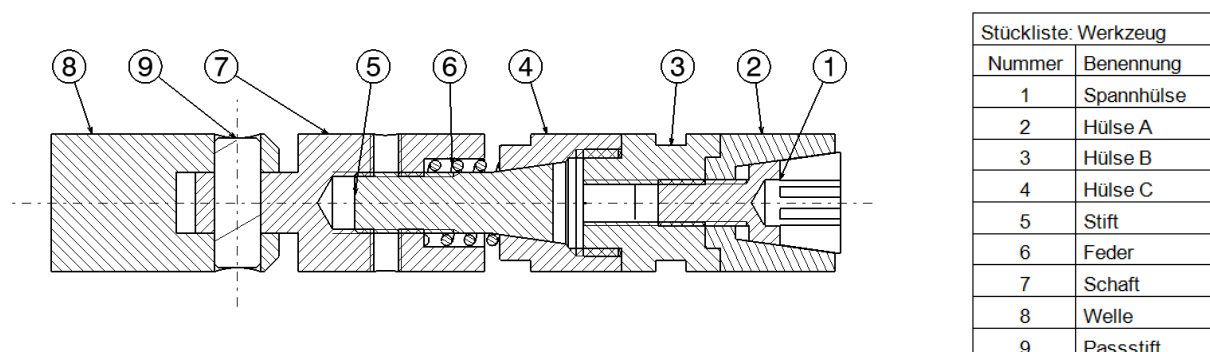


Bild 78: Aufbau des Werkzeuges mit Kugelfräser

Die Bearbeitung wird, wie schon vorhin, an einer Zahnradnabe als Versuchsträger durchgeführt. Die dabei verwendeten Parameter für die Spindeldrehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit zeigt die Tabelle 12. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Bearbeitungsversuche ist im Bild 79 dargestellt. Mit den Versuchsparametern 1 (siehe Tabelle 12) lässt sich mit einem Bearbeitungsdurchlauf nicht die komplette Zunderschicht abtragen (Bild 79a). Zudem zeigt die dabei entstehende raue Oberflächenstruktur, dass das Werkzeug keine konstante Schnittkraft während des Werkzeugeingriffs hat. Dagegen zeigt die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit auf 3000 U/min, bei unveränderter Vorschubgeschwindigkeit, dass dadurch mit einem einzigen Bearbeitungsdurchlauf die Oberfläche komplett von der Zunderschicht entfernt werden kann (Bild 79b). Aber auch hier wird keine vollständig glatte Oberfläche erreicht. Wird die Spindeldrehzahl auf den Wert von 2500 U/min gesenkt und zusätzlich noch ein Kühlschmierstoff verwendet, so wird dadurch ebenfalls die komplette Zunderschicht entfernt (Bild 79c). Im Vergleich mit den Parametern Nr. 2 ist die hier entstehende Oberflächenstruktur etwas glatter. Jedoch kann auch mit dieser Prozessführung keine komplett glatte Oberfläche erreicht werden. Nach drei Bearbeitungsversuchen tritt beim Kugelfräser kein optisch erkennbarer Verschleiß auf (Bild 79d).

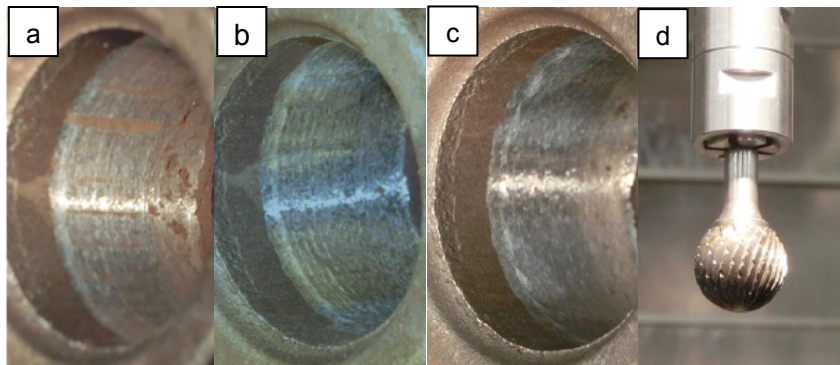


Bild 79: Ergebnisse der Bearbeitungsversuche: Bild a: Zunderreste noch auf der Oberfläche vorhanden (Bearbeitungsparameter 1); Bild b: zunderfreie, aber raue Oberfläche (Bearbeitungsparameter 2); Bild c: zunderfreie, aber raue Oberfläche (Bearbeitungsparameter 3 mit Kühlmittel); Bild d: Fräser nach drei Versuche ohne Verschleiß

Nummer	Spindeldrehzahl	Vorschub	Kühlmittel
	s in U/min	v in mm/min	ja/nein
1	2000	200	nein
2	3000	200	nein
3	2500	200	ja

Tabelle 12: Gewählte Bearbeitungsparameter für die Bearbeitungsversuche mit dem Kugelfräser

3.10. Hydraulisch ausgelenktes Werkzeug mit Schneidplatte

Bei den vorhin durchgeführten Versuchen besteht stets ein direkter Zusammenhang zwischen der Spindeldrehzahl, der Schnittgeschwindigkeit und der Anpresskraft des Werkzeuges an die Werkstückoberfläche. Da diese Parameter nicht unabhängig voneinander regel-

bar sind, tritt bei den Versuchen eine schwankende Schnittkraft auf. Diese ist die Ursache für die Ausbildung einer rauen Oberflächenstruktur. Um diese Parameter unabhängig voneinander zu regeln, wird die Auslenkung des Werkzeuges über einen einfachen Hydraulikkolben realisiert. Das dafür konstruierte Werkzeug ist im Bild 80 dargestellt. Es besteht aus einer Welle, in der eine Bohrung für den Hydraulikkolben (3) und eine Querbohrung mit Gewinde für den Anschluss der Hydraulikleitung eingearbeitet ist. Die Welle ist zur Führung der Stange (2) geschlitzt und über den Stift (5) schwenkbar mit dieser verbunden. Die in der Stange und Welle eingearbeiteten Führungsbohrungen für den Stift (5) sind so angebracht, dass der Hydraulikkolben unter dem Arbeitsdruck auf eine schiefe Fläche drückt. Dadurch wird das erforderliche Schwenkmoment für das Auslenken der Stange (2), und die damit einhergehende erforderliche Andrückkraft für die Spanbildung erzeugt. Am Ende der Stange ist eine Hartmetallplatte von Ceratizit (RCMT 1003MOSN) montiert. Die Abdichtung zwischen dem Hydraulikkolben und der Kolbenbohrung wird durch einen O-Ring bewerkstelligt. Als Versuchsobjekte werden Schleudergussrohrsegmente mit den Abmessungen $D_i=36$ mm und $D_a=76$ mm sowie auch Segmente der Getriebewelle verwendet.

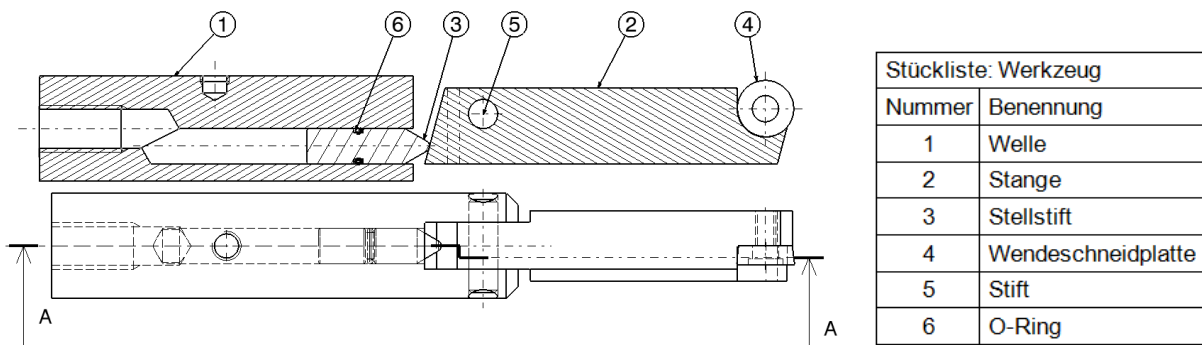


Bild 80: Werkzeug mit hydraulischer Auslenkung und Schneidplatte

Für die Bearbeitungsversuche wird das Werkzeug, wie im Bild 81 rechts dargestellt, im Werkzeughalter eingespannt. Das Werkzeug ist mit einer Hydraulikleitung an das blaue Hydraulikaggregat (Bild 81 links) angeschlossen.

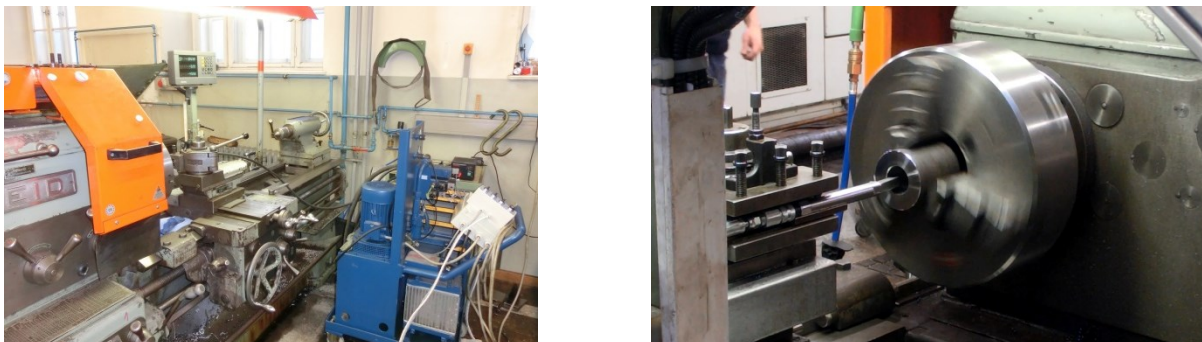


Bild 81: Versuchsaufbau von vorne mit Hydraulikaggregat (links) und von hinten mit eingespanntem Werkzeug im Eingriff (rechts)

Die Ergebnisse, die bei den Versuchen mit den in der Tabelle 13 angegebenen Parametern erreicht werden, sind im Bild 83 dargestellt. Um das Ergebnis besser beurteilen zu können, sind die Versuchsträger nach dem Bearbeitungsversuch in der Mitte in zwei Hälften geteilt und mit den Indizes „a“ und „b“ zusätzlich markiert worden. Als Versuchsobjekte werden sowohl Schleudergussrohre mit dem Innendurchmesser von $D_i=36$ mm und dem Außendurchmesser von $D_a=76$ mm (Versuche 1-2 sowie 5-8) als auch Segmente von Getriebewellen (Versuche 3 und 4) verwendet. Es zeigt sich, dass ein Druck von 80 bar zu gering für die komplette Spanabnahme ist. Es tritt, wie in (1) gezeigt, eine ungleichmäßige Spanabnahme auf. Dies ist am unterschiedlichen Zunderentfernungsgrad an der Oberfläche ablesbar. Wird jedoch der Druck auf 100 bar gesteigert, so tritt eine gleichmäßige Spanabnahme (2) auf. Um zu untersuchen, ob dies auch bei größeren Durchmessern möglich ist, wird für den Versuch 3 und 4 eine Getriebewelle entlang ihrer Längsachse halbiert und deren Hälften innen mit dem Werkzeug bearbeitet. Dieser Versuch zeigt, dass nach einem Bearbeitungsvorgang mit 100 bar Druck an der bearbeiteten Oberfläche 90% des Zunders abgetragen wird. Da hierbei das Werkzeug auf einen größeren Durchmesser (bis zu 60 mm) ausschwenken muss, wird es durch die entstehende Vergrößerung des Hebelarms stärker belastet. Dies führt während der Bearbeitung zu einer stärkeren, spiralförmigen Riefenbildung. Ob eine Drucksteigerung bei den kleineren Probestücken sinnvoll ist, wird mit den Versuchen 5 bis 8 untersucht. Das charakteristische Aussehen der Oberfläche der Versuche 5 (100 bar) und 6 (150 bar) ist im Ergebnis vergleichbar. Beim Versuch 7 kommt es infolge des höheren Drucks von 200 bar zu einer stärkeren Riefenbildung. Diese ist bei 250 bar (Versuch 8) nochmals etwas stärker ausgeprägt. Das Bild 82 zeigt, dass die Wendeschneidplatte nach den durchgeführten Versuchen keinerlei Verschleißerscheinungen aufweist.

Nummer	Spindel-	Vorschub-	Druck
	drehzahl	geschwindigkeit	
-	U/min	mm/U	bar
1	456	2	80
2	456	2	100
3	456	2	100
4	456	2	100
5	456	2	80
6	456	2	150
7	456	2	200
8	456	2	250

Tabelle 13: Gewählte Parameter für Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Hydraulikdruck



Bild 82: Kein Verschleiß der Wendeschneidplatte nach den Bearbeitungsversuchen 1 bis 8

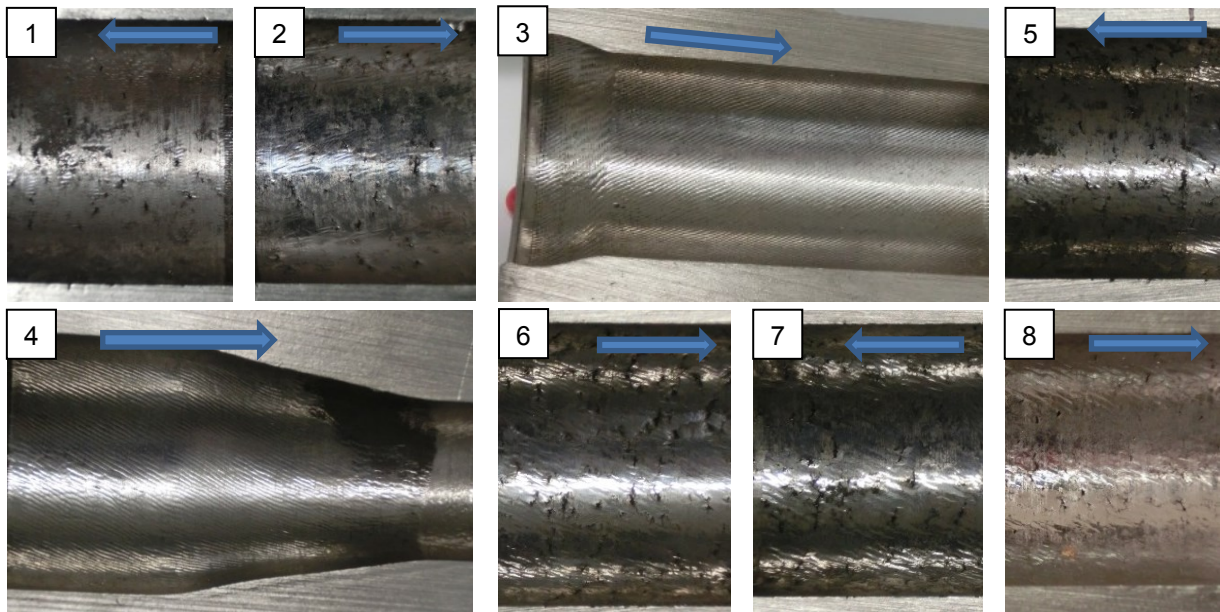


Bild 83: Bearbeitungsergebnisse der Versuche mit dem Hydraulikwerkzeug mit zwei verschiedenen Versuchsträgern; Versuche 1-2 und 5-8 mit Schleudergussrohr; Versuche 3-4 mit Getriebewellensegmenten

Diese Versuchsreihe belegt, dass die Bearbeitung mit einem derartigen Werkzeug qualitativ einwandfreie Ergebnisse liefert. Jedoch ist das Werkzeug für den speziellen Bearbeitungsfall noch weiter zu optimieren. Zudem sind die verwendeten Parameter (Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit) auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen und zu optimieren. Bei den vorhin gezeigten Versuchen war es nicht möglich, die Spindeldrehzahl zu verändern, wodurch sich bei änderndem Durchmesser auch die Schnittgeschwindigkeit geändert hat. Anzustreben ist, über die Steuerung der Drehzahl in Abhängigkeit zum aktuell bearbeiteten Durchmesser die Schnittgeschwindigkeit konstant zu halten. Dadurch ist ein besseres Bearbeitungsergebnis zu erwarten. An der zur Verfügung stehenden Versuchsmaschine war es nicht möglich, diesen Ansatz experimentell zu untersuchen.

3.11. Versuche mit Hochdruckwasserstrahlen (Fa. Hammelmann)

Eine andere Technologie zum Abtragen der Zunderschicht von der Bauteilinnenfläche ist das Hochdruckwasserstrahlen. Als Versuchsträger dienen Segmente von Schleudergussrohren, die einen Innendurchmesser von $D_i=36$ mm und einen Außendurchmesser von $D_a=76$ mm aufweisen. Die Versuchsträger werden auf einer Versuchseinrichtung der Firma Hammelmann, Oelde, aufgespannt (siehe Bild 84). Die drehbar gelagerte Lanze wird von einem Knickarmroboter geführt. Dieser führt sie in einem Durchlauf einmal in das Bauteil ein und zieht sie anschließend sofort wieder aus dem Bauteil heraus. Während der konstanten linearen Vorschubbewegung führt die Lanze gleichzeitig auch eine Drehung um ihre eigene Achse durch. Die für diese Versuchsreihe gewählten Parameter sind in Tabelle 14 dargestellt. Die hier verwendete Lanze hat sechs Düsen, von denen zwei um 45° nach vorne, zwei um 90° , und zwei um 45° nach hinten gerichtet sind. Die Winkel sind dabei von der Düsen-

symmetrieachse aus gemessen. Die Zuführung des Arbeitsmediums Wasser erfolgt über einen Hochdruckwasserschlauch von der Pumpe zur Lanze. Dem Wasser wird kein Abrasivmedium zugesetzt. In dieser Versuchsreihe werden der Systemdruck, die Vorschubgeschwindigkeit und die Drehzahl der Lanze variiert.



Bild 84: Versuchsstand bei Firma Hammelmann für Bearbeitungsversuche mit dem Hochdruckwasserstrahlen. Ein Versuchsträger ist am Aufspanntisch im Schraubstock eingespannt. Die Führung der rotierenden Lanze erfolgt mit Hilfe eines Knickarmroboters.

Das beste Bearbeitungsergebnis (Bild 85) wird im sechsten Versuch mit den in der Tabelle 14 angegebenen Parametern erzielt. Der mit einem roten Pfeil markierte Bereich ist nach wie vor mit Zunder bedeckt; der mit dem grünen Pfeil markierte Bereich ist dagegen bereits zunderfrei. Mit diesem Versuch wird für das Rohrsegment ein Entzunderungsgrad von ca. 40% erreicht. Die Drucksteigerung von 3000 bar auf 4000 bar ist mit der Anlage technisch möglich, würde jedoch aus energetischer Sicht einen unverhältnismäßigen Mehraufwand bedeuten der in der industriellen Großserienfertigung nicht zu vertreten ist. Hinzu kommen Aspekte der Anlagen- und Arbeitssicherheit beim Umgang mit derart hohen Drücken. Deshalb wird auf Bearbeitungsversuche mit gesteigerten Arbeitsdrücken verzichtet.

Versuch	Druck	Volumen-	Vor-	Dreh-	Abstand	Zunder-
Nr.	p	strom	schub	zahl	zentrisch	freiheit
-	bar	Q	v	n	zentrisch	%
1	500	9,2	20	1500	zentrisch	5
2	1000	13	20	1500	zentrisch	10
3	2000	18,4	20	1500	zentrisch	20
4	3000	22,5	20	1500	zentrisch	30
5	3000	22,5	10	750	zentrisch	35
6	3000	22,5	2,5	375	zentrisch	40

Tabelle 14: Versuchsparameter bei den Entzunderungsversuchen von Schleudergussrohrsegmenten bei Firma Hammelmann

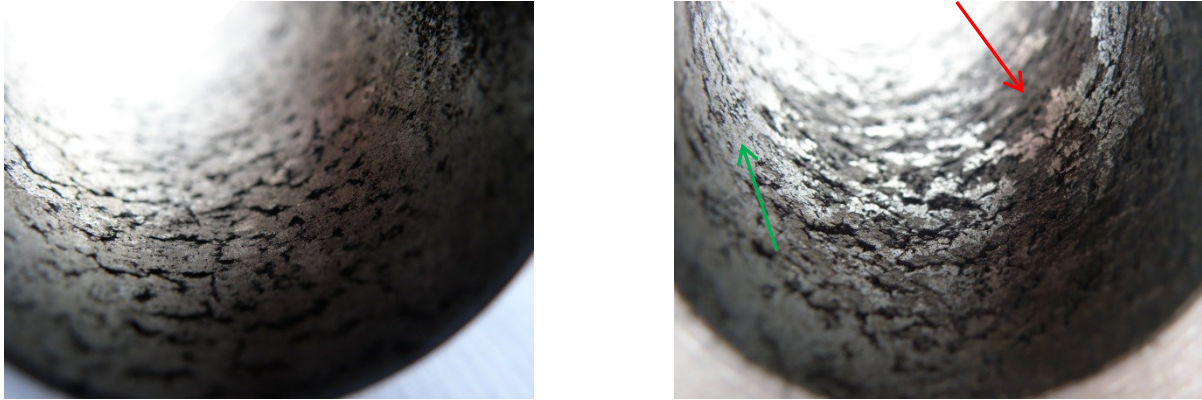


Bild 85: Schleudergussrohr vor der Bearbeitung (links) und nach der besten Bearbeitung (rechts) durch Hochdruckwasserstrahlen. Ein zunderfreier Oberflächenbereich ist mit einem grünen Pfeil markiert, ein zunderbehafteter Bereich mit einem roten Pfeil.

3.12. Versuche mit dem Kolene-Verfahren

Die bei den Versuchen verwendete Beize besteht zum überwiegenden Teil aus Salzsäure (HCL <33%). Weitere Inhaltsstoffe können Schwefelsäure (H₂SO₄) und Salpetersäure (HNO₃) sein. Über das genaue Mischungsverhältnis der Säuren erteilt aus Geheimhaltungsgründen die Herstellerfirma Durferrit keine Auskunft. Es kann aber abgeschätzt werden, dass zum überwiegenden Teil, ca. 70 %, die Beize aus Salzsäure besteht. Der pH-Wert der verwendeten Säuremischung liegt bei 3,8.

Die Versuchsreihe wird in den folgender Schrittfolge ausgeführt:

1. Behandeln in Salzsäure mit oder ohne Gleichstromquelle
2. Abschrecken in Behälter mit Stadtwasser (25 – 38 °C Wassertemperatur)
3. Waschen mit Stadtwasser (damit keine Salzreste in die Beize gelangen)
4. Beizen (Temperatur ca. 31 °C)
5. Waschen mit Stadtwasser
6. Konservieren oder Schritte 1-5 wiederholen

Die dabei verwendeten Versuchsparameter sind in der Tabelle 15 aufgelistet. Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zeigt das Bild 86.

Versuch	Bauteil	Salzbadparameter					Nachbearbeitung			
		Chargierkorb	Badtemperatur	elektrische Größen		Behandlungszeit	Abschrecken	Beizdauer	Waschen	Ergänzungen
Nr.	Nr.		T	Spannung U	Stromstärke I	t	(Stadtwasser)		(Stadtwasser)	
1	10	ja	415 °C	0 V	0 A	3 min	✓	10 min	✓	
		ja		1 V	23,8 A	7 min		11 min		
		ja		1 V	50 A	8 min		12 min		
2	11	ja	415 °C	2,3 V	85 A	20 min	✓	10 min	✓	gestrahlt
3	12	ja	480 °C	1,9 V	93 A	20 min	✓	3 min	✓	
4	13	ja	480 °C	2,6 V	95 A	40 min	✓	7 min	✓	
	14	ja	480 °C							
5	29	ja	460 - 480 °C	0 V	0 A	55 min	✓	10 min	✓	
Halbschalle		ja	Verfahrensablauf wie bei Versuch 1+2+3+4				Verfahrensablauf wie Versuch 1+2+3+4			
Getriebewelle	ja	ja	480 °C	4 V	50 A	20 min	✓	3 min	✓	
	ja	ja	480 °C	4 V	50 A	20 min	✓	3 min	✓	

Tabelle 15: Ausgewählte Versuchsparameter für die Entzunderungsversuche mit dem Kolene 4-Verfahren

Als Erprobungsträger dienen hier Schleudergussrohrabschnitte und fertig geschmiedete Getriebehauptwellen, die aus Schleuderguss gefertigt sind.

Versuch 1: Versuchsteil Nr. 10

Das Reinigungsergebnis des Hohlraumes des Versuchsteiles 10 (VT10) ist im Bild 86 dargestellt. Ein Großteil der Oberfläche ist bereits zunderfrei (graue und helle Bereiche). Nur auf den dunklen Oberflächenbereichen ist noch eine Zunderschicht vorhanden.

Versuch 2: Versuchsteil Nr. 11

Um die Reinigungswirkung dieses Entzunderungsverfahrens noch besser darzustellen, wird das Versuchsteil 11 (VT11) nach der Behandlung mit dem Kolene 4-Verfahren noch zusätzlich mit Glasperlen gestrahlt. Aufgrund der geringen Dichte des dabei verwendeten Abrasivmedium wird damit die Oberfläche nur poliert und effektiv kein Zunder abgetragen. Durch die Wahl einer höheren Stromstärke ($I=85\text{ A}$) und der längeren Behandlungszeit von 20 Minuten im Kolene-Salzbad verbessert sich die Reinigungswirkung. Es gibt aber immer noch vereinzelt kleine, dunkle Bereiche, an denen Zunder erkennbar ist.

Versuch 3: Versuchsteil Nr. 12

Hier wird, im Vergleich zum Versuch davor, das Bauteil (VT12) für eine Zeit von 20 Minuten bei der höheren Temperatur von 480 °C mit einer ebenfalls höheren Stromstärke ($I=93\text{ A}$) bearbeitet. Dabei zeigt sich, dass es bei hoch gewählter Stromstärke zu keiner Verbesserung der Reinigungswirkung kommt. Stattdessen führt dies zu einem teilweisen Einbrennen des Zunders in die Oberfläche. Die Beizdauer liegt hier bei 10 Minuten.

Versuch 4: Versuchsteil Nr. 13 und 14

Hier werden zwei Stücke (VT13 und VT14) gleichzeitig behandelt. Die Bearbeitungszeit wird auf 40 Minuten erhöht. Das Ergebnis zeigt, dass auch hier die Stromstärke zu hoch gewählt ist. Es kommt wieder zu einem teilweisen Einbrennen des Zunders in die Oberfläche. Deshalb führt dieser Versuch, trotz der verdoppelten Behandlungszeit im Salzbad und der hohen Salzbadtemperatur von 480 °C , zu einer Verschlechterung des Bearbeitungsergebnisses.

Versuch 5: Versuchsteil Nr. 29

Dieser Versuch wird bei einer Salzbadtemperatur von 480 °C und einer Liegezeit im Bad von 50 min durchgeführt. Die Beizdauer entspricht wieder 10 Minuten. Dabei zeigt sich, dass ohne Strom eine sehr schlechte Reinigungswirkung erzielt wird. Es ist noch auf der gesamten Oberfläche ein Zunderrest vorhanden.

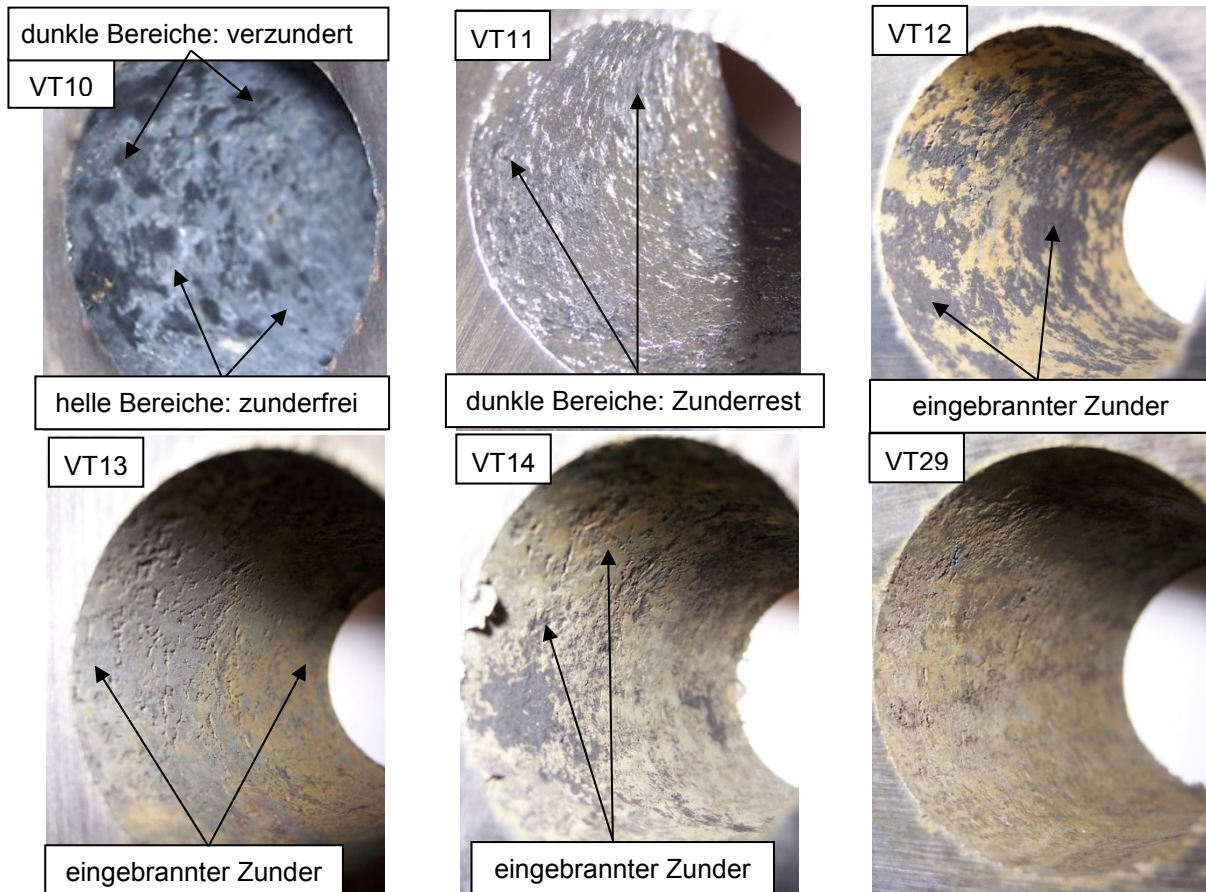


Bild 86: Ergebnisse der Entzündungsversuche mit dem Kolene-Verfahren (Versuchsteile VT10, VT11, VT12, VT13, VT14, VT29).

Versuch 6: Halbschale

Die Halbschale (längs geschnittener Abschnitt eines Schleudergussrohres) durchläuft hintereinander mehrere Bearbeitungsdurchgänge (1, 2, 3, 4) gemeinsam mit den zuvor beschriebenen Versuchsteilen. Dabei zeigt sich, dass bei mehrmaliger, sequenziell hintereinander folgender Bearbeitung mit dem Kolene-Verfahren nahezu der komplette Zunder entfernt wird (Bild 87). Jedoch ist hier anzumerken, dass bei mehreren der oben beschriebenen Versuchsabläufe die Versuchsparameter nicht optimal gewählt worden sind.

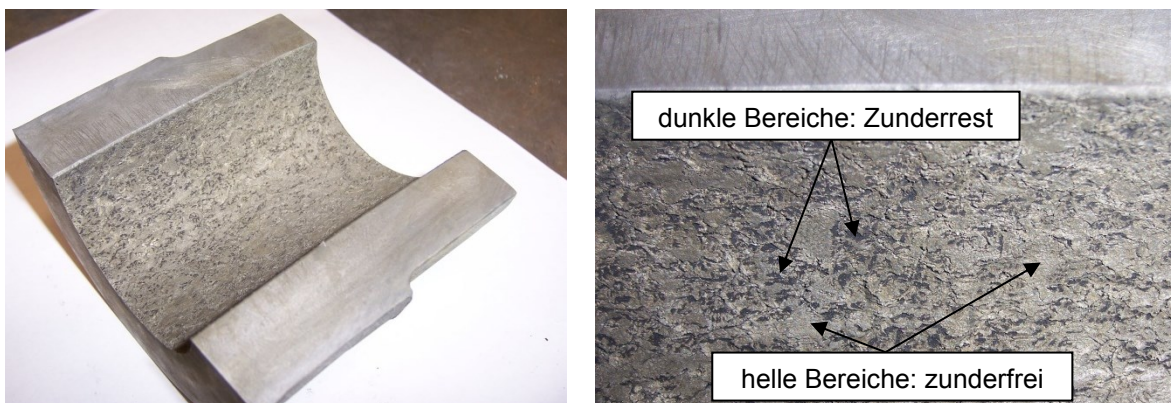


Bild 87: Ergebnis des Entzündungsversuchs einer Halbschale nach mehrmaliger Anwendung des Kolene 4-Verfahren mit dem bei den Versuchen 1, 2, 3, 4 verwendeten Versuchsparametern

Die bei diesen Versuchen verwendeten Versuchsteile stellen den schwierigsten zu bearbeitenden Fall dar. Zur genaueren Untersuchung wird im nächsten Schritt als Versuchsträger eine Getriebehohlwelle verwendet, die aus einem Schleudergussrohrabschnitt geschmiedet ist.

Versuch 7: Getriebewelle

Der letzte Versuch dieser Versuchsreihe wird mit einer Getriebewelle durchgeführt. Diese ist längs aufgeschnitten und zweigeteilt, um das Bearbeitungsergebnis besser begutachten zu können. Die Wellenhälfte wird in das Kolene-Bad eingesenkt (Bild 89) und mit den in der Tabelle 15 angegebenen Parametern bearbeitet. Im Bild 88 ist die unbearbeitete Getriebewellenhälfte (links) und die behandelte Hälfte (rechts) einander gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass mit diesem Verfahren der Zunder komplett entfernt werden kann. Da das Kolene-Verfahren erst bei höheren Temperaturen (≥ 480 °C Badtemperatur) gut arbeitet, muss untersucht werden, ob sich diese Wärmeeinbringung in das Bauteil negativ auf das Werkstoffgefüge an den bereits gehärteten Flächen auswirkt. Dies wird in einem späteren Versuch überprüft. Dafür wird eine komplett fertigbearbeitete Getriebewelle vorbereitet, die bereits mit der neuesten, optimierten Prozesskette hergestellt worden ist.

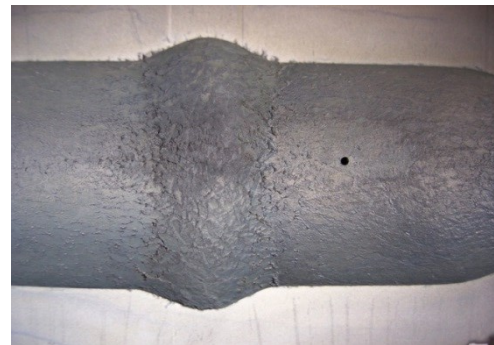


Bild 88: Ergebnis der Kolene 4-Behandlung einer Getriebehohlwelle: Bild links zeigt den Zustand vor der Behandlung mit Zunder und Rost auf der Oberfläche; Bild rechts zeigt die mit der Behandlung erzielte, komplett zunder- sowie rostfreie Oberfläche



Bild 89: Einsenken der Getriebehohlwelle zur Kolene 4-Behandlung in das flüssige Salzbad (480°C).

3.13. Schmiedeversuche Serie 4

Die folgenden Schmiedeversuche der Serie 4 werden bei der Firma GFM in Steyr an einer im dortigen Technikum vorhandenen Radialschmiedemaschine SKK-14 durchgeführt. Die Serien 1–3 wurden dort bereits im Rahmen einer anderen Dissertation¹⁹² angefertigt. Damit wird zur Prozesskettenoptimierung auf die Ergebnisse der zurückliegenden Grundlagenentwicklung aufgesetzt. Das Bild 90 zeigt als Übersicht die dort im Technikum stehende Anlage. In der Bildmitte ist die für die folgenden Untersuchungen verwendete Schmiedemaschine SKK-14 zu sehen. Im rechten Bildbereich ist der für die Erwärmung verwendete Elektroofen des Fabrikats Hoffmann abgebildet. Zwischen der Radialschmiedemaschine und dem Elektroofen befindet sich der Handhabungsroboter für das Ein- bzw. Ablegen der glühenden Schmiedeteile.



Bild 90: Gesamtübersicht des Technikums der Firma GFM in Steyr

Die erste Umformstufe der Getriebewelle wird über den Dorn (D) geschmiedet, die zweite Stufe über den Dorn (DB) (siehe Bild 91). Die Temperatur an der Mantelfläche der Schmiedeteile während des Schmiedevorganges wird über ein Pyrometer (Modell MI16, Fa. Sensitherm) auf Höhe der Außenkante der Schmiedehämmer gemessen.

¹⁹² Kluge, 2010

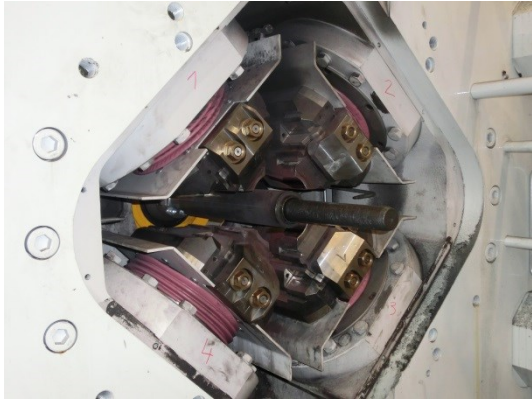


Bild 91: Schmiedehämmer und einstufige Dornstange DB (links), Manipulator mit Dornstange D (rechts)

Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die niedrigste Temperatur zu ermitteln, bei der die Wellen noch geschmiedet werden können, um dadurch die Zunderbildung so gering wie möglich zu halten. Dazu werden immer vier Schmiedeteile gleichzeitig in den Ofen zum Erwärmen gelegt. Nach der Erwärm- bzw. Liegezeit von 90 Minuten wird das erste Rohteil aus dem Ofen geholt und beide Seiten des Schmiedeteils werden ohne Zwischenerwärmung, hintereinander fertig geschmiedet. Dazwischen muss der Schmiedeprozess zum automatisierten Wenden des Werkstücks kurzzeitig unterbrochen werden. Die weiteren drei im Ofen liegenden Versuchsteile werden im Abstand von jeweils 10 Minuten nacheinander aus dem Ofen geholt. Das Herausheben der Rohteile und das Ablegen auf die Ablagevorrichtung erfolgt mit Hilfe einer Schmiedezange manuell. Die folgenden Handhabungsoperationen, einschließlich des Ablegens der fertig geschmiedeten Getriebewelle, werden von dem Handhabungsroboter durchgeführt.

Versuchsablauf (siehe Bild 92)

1. Vorwärmen des Ofens auf die für den jeweiligen Versuch gewählte Schmiedetemperatur (950 °C, 850 °C, 800 °C, 750 °C)
2. Einlegen der Versuchsteile in stehender Lage und Abdecken der jeweiligen oberen Hohlraumöffnung mit einer Blechplatte
3. Manuelles Entnehmen des durchgewärmten Schmiedeteils und Ablegen auf den Ladetisch
4. Starten des Schmiedeprogrammes
5. Laden vom Ladetisch in den Spannkopf der Schmiedemaschine mit dem Roboter
6. Schmieden der ersten Schmiedestufe über den Dorn (D) der Spannkopfseite
7. Wenden des Schmiedeteils mit dem Roboter
8. Schmieden der zweiten Stufe über den Dorn (DB) der Gegenhalterseite
9. Entladen des Manipulators mit Hilfe des Handhabungsroboters
10. Ablegen des geschmiedeten Teils auf die Ablagevorrichtung mit Hilfe des Roboters

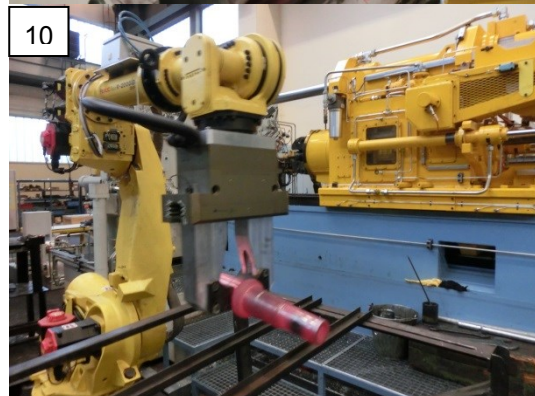
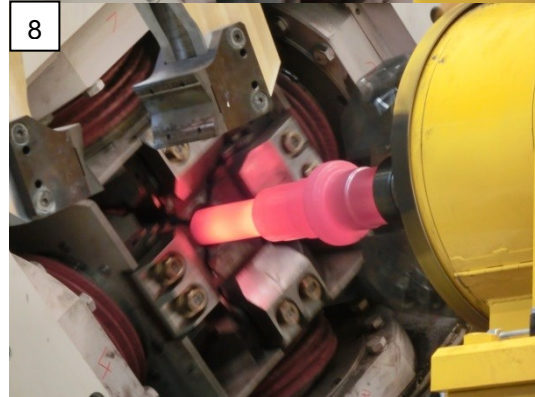
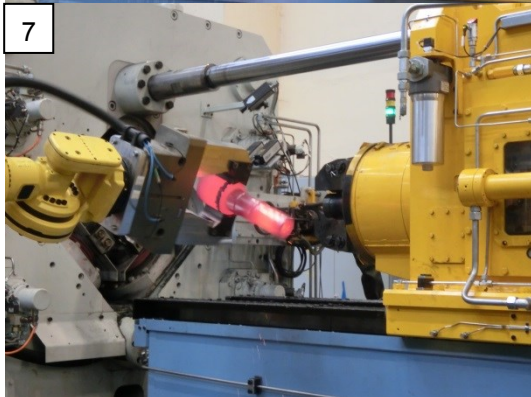
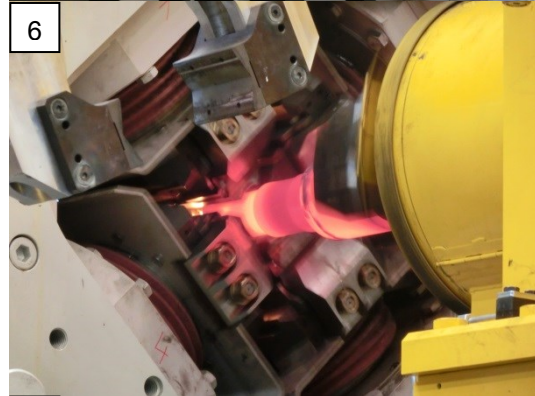
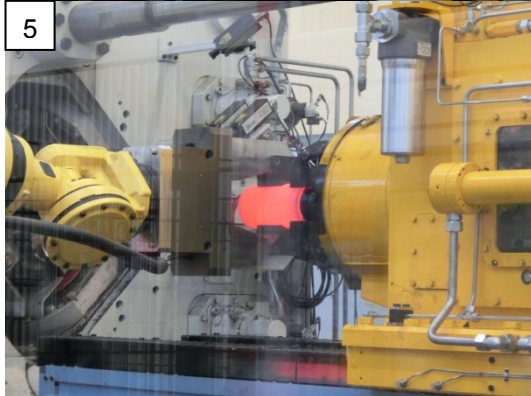
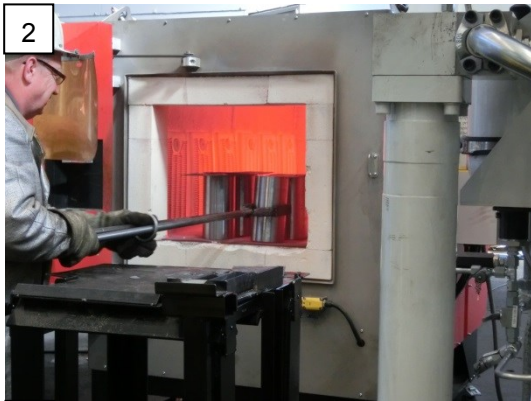


Bild 92: Versuchsablauf beim Schmieden der Hohlwellen der Serie 4

3.13.1. Metallografische Untersuchungen der Versuchsserie 4

Zur Detektion von eventuell vorhandenen Rissen, Falten oder anderen Fehlstellen in kritischen Wellenabschnitten werden den geschmiedeten Werkstücken Proben entnommen und daraus metallografische Schliffe hergestellt. Das Bild 93 zeigt die Bereiche der Probenentnahme.

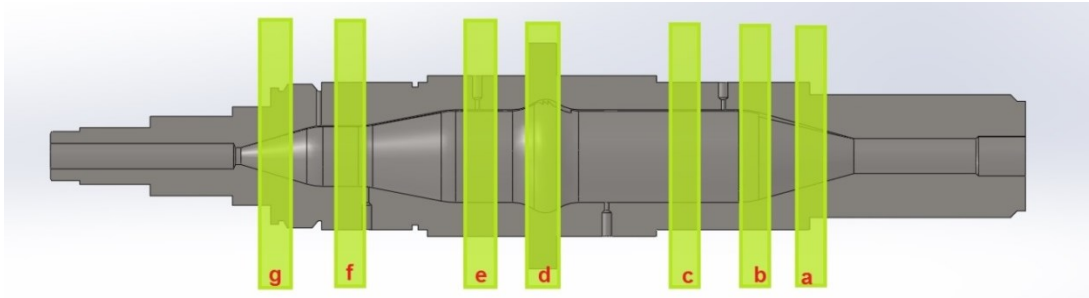


Bild 93: Bereiche der Schliffbilder für die Wellen der Versuchsserie 4

3.13.2. Welle Nr. 388 mit 950 °C Schmiedetemperatur und Innenseite nicht ausgedreht

Bei dieser Welle wird als Ausgangsmaterial ein Schleudergussrohr verwendet. Nach dem Absägen der Rohrabschnitte werden diese nur an den Schnittflächen durch Drehen bearbeitet, dass sich die Länge von 240 mm ergibt. Die Innen- und Außenflächen des Rohranschnitts bleiben im gussrauen Rohzustand und somit unbearbeitet. Die Schliffbilder (Anhang 1) zeigen, dass dabei im Bereich (a) ein Riss mit einer Länge von bis zu 2 mm Länge auftritt. Dabei durchdringt dieser an bestimmten Stellen im Werkstoff eingeschlossene Lunker, von denen weitere Risse abzweigen. Auch von kleineren, dort ersichtlichen Lunkerblasen gehen kleine Risse aus. Während im Bereich (b) auf den Schliffbildern kein Riss erkennbar ist, so werden im Bereich (c) bis in eine Tiefe von 1 mm kleine Risse und Lunker nachgewiesen. Durch das Nichtausdrehen des Rohres im Inneren treten an der Oberfläche (siehe Bereich e und d) unerwünschte Vertiefungen auf. Die in diesen Vertiefungen angelagerte Zunderschicht ist mechanisch nur schwer zu entfernen. Auch der in Bereich (e) befindliche oberflächennahe Lunker ist Ausgangspunkt eines Risses. In den Bereichen (f) und (g) zeigen sich bis zu 100 µm lange Risse. Die im Inneren des Schleudergussrohres festgestellte Zunderschicht ist bis zu 47 µm (Anhang 1h) dick.

3.13.3. Welle 335 mit 950 °C Schmiedetemperatur (unlackiert)

Durch das Ausdrehen des Rohteils im Inneren wird ein besseres Schmiedeergebnis hinsichtlich Zunderbildung als bei der Welle 388 erreicht. Allerdings treten Risse in den Bereichen (a) und (f) auf mit einer Länge von bis zu 200 µm. Im Bereich (c) zweigen von einer Lunkerblase, die einen Durchmesser von ca. 100 µm hat, Risse mit einer Länge von bis zu 100 µm ab. Trotz des Ausdrehens des Schleudergussrohres im Inneren sind noch teilweise Lunkerblasen an der Oberfläche des Hohlraumes vorhanden. Von diesen nehmen wiederum Risse

ihren Anlauf. Sie haben eine maximale Länge von 200 µm. Auch im Bereich (g) sind Risse mit einer Länge von bis 100 µm vorhanden. Dabei tritt im Inneren des Schleudergussrohres eine Zunderschicht von bis zu 29 µm (Anhang 2h) auf.

3.13.4. Welle 350 mit 950 °C Schmiedetemperatur und Schutzlackbeschichtung

Bei der Welle 350 wird die Innenbohrung nach dem Ausdrehen mit einem Zunderschutzlack versehen. Damit wird die Minimierung der Zunderbildung angestrebt. Das Ergebnis zeigt, dass mit dieser Maßnahme sich die Zunderbildung nicht vollständig unterbinden lässt. Wie in Anhang 3 (Bild h) dargestellt, bildet sich hier trotz der Innenbeschichtung eine Zunderschicht mit einer Dicke von bis zu 25 µm aus. Auch hier zeigt sich, wie bei der Welle 350, dass die innere Bohrung zu wenig tief vorbearbeitet ist. In den Bereichen (a, b, c, e, f, g) sind an der Oberfläche nach dem Schmieden noch Lunkerblasen vorhanden (Anhang 3). Die festgestellten Risse gehen nicht nur von den Lunkern aus, sondern auch von lunkerfreien Oberflächenregionen. Diese Risse erreichen im Bereich (a) und (f) Längen von bis zu 1 mm, im Bereich (b) und (c) bis zu 0,5 mm. Nur im Bereich (d) wird kein Fehler gefunden. Im Bereich (e) sind Lunker vorhanden, von denen ebenfalls Risse ihren Ausgang nehmen. Diese dringen bis in eine Tiefe von 400 µm vor. Der Zunderschutzlack wird vor dem Schmieden manuell auf die trockene, entfettete Innenoberfläche des Schleudergussrohrabschnittes aufgetragen. Er trocknet, bei Raumtemperatur, innerhalb von 10 Minuten. Er hat die Bezeichnung „x-tec® Zunderschutz RT“ des Herstellers Nano-X GmbH, Saarbrücken.

3.13.5. Welle 343 mit 850 °C Schmiedetemperatur (unlackiert)

Mit der Verringerung der Schmiedetemperatur geht auch eine verminderte Zunderbildung einher. Die Zunderschichtdicke verringert sich, ohne die Anwendung eines Zunderschutzlackes, auf die Dicke von 13 µm (Anhang 4h). Jedoch treten auch bei diesem Versuch wieder Oberflächenrisse auf. Während diese im Bereich (a) eine Länge von bis zu 400 µm erreichen, finden sich im Bereich (f) und (g) bis zu 1000 µm lange Risse. Im Bereich (c) zeigt sich, dass Risse teilweise auch von Lunkern ausgehen, die unter der Oberfläche bereits vor dem Schmieden vorhanden waren. Im Vergleich zur Welle 350 finden sich hier weniger Lunker auf bzw. unter der Wellenoberfläche.

3.13.6. Welle 352 mit 850 °C Schmiedetemperatur und Schutzlackbeschichtung

Bei dieser Welle wird versucht, zusätzlich zur Senkung der Schmiedetemperatur (Ofentemperatur: 850 °C) und der gleichzeitigen Verwendung eines Zunderschutzlackes die Zunderbildung zu vermindern. Dabei werden Schichtdicken von bis zu 7 µm ermittelt (Anhang 5). Hier treten Risse mit einer Länge von bis zu 200 µm im Bereich (g) auf. Des Weiteren finden sich Risse im Bereich (c), die hier sogar in Längsrichtung der Welle verlaufen. Im Bereich (g) der Welle zeigen sich Schmiedefalten, die sich durch lokalen Materialüberschuss erklären.

3.13.7. Welle 382 mit 800 °C Schmiedetemperatur (unlackiert)

Hier wird eine weitere Temperatursenkung vorgenommen, ohne dabei einen Zunderschutzlack zu verwenden. Dabei wird eine Schichtdicke von bis zu 6 µm ermittelt (Anhang 6h). Auch hier treten wieder Risse auf (siehe Anhang 6). Diese haben im Bereich (a) und (c) eine Länge von 400 µm und im Bereich (b) eine Länge von 300 µm. Des Weiteren finden sich im Bereich (c) und (e) an der Oberfläche Lunker. Im Bereich (d) finden sich kleine Lunker unterhalb der Oberfläche, von denen Risse ausgehen. Somit wird nachgewiesen, dass durch die Absenkung der Schmiedetemperatur sich die Zunderbildung signifikant verringert. Die Problematik der Rissbildung bleibt auch hier bestehen.

3.13.8. Welle 385 mit 800 °C Schmiedetemperatur mit Schutzlackbeschichtung

Ob sich die Zunderbildung noch weiter durch die Anwendung des Zunderschutzlackes verringern lässt, wird mit diesem Versuch eruiert. Die hier ermittelte Zunderschichtdicke liegt mit einer Dicke von 6 µm im Bereich der vorher betrachteten Welle 382. Somit ist durch die Anwendung des Zunderschutzlackes, unter Berücksichtigung der bei der Welle 382 verwendeten Prozessparameter, eine Verbesserung des Verzunderungsverhaltens nicht zu belegen. Auch hier treten wieder Risse auf (siehe Anhang 7). Diese haben im Bereich (a) und (c) eine Länge von 400 µm. Des Weiteren finden sich in den Bereichen (c), (d) und (e) unter der Oberfläche Lunker. Der Bereich (b) stellt sich rissfrei dar. Wie bereits oben festgestellt, wird durch die Temperatursenkung die Zunderbildung verringert. Unzulässige oberflächennahe Risse finden sich jedoch nach wie vor.

3.13.9. Welle 353 mit 750 °C Schmiedetemperatur (unlackiert)

Hier wird die Möglichkeit untersucht, zwecks Zundervermeidung die Getriebewelle bei der relativ niedrigen Temperatur von 750 °C zu schmieden. Die maximal zulässige Schmiedekraft der Radialschmiedemaschine beträgt lt. Herstellerangabe $F=2500$ kN. Das Bild 94 zeigt einen Auszug der wichtigsten gemessenen Prozessdaten für diesen Versuch. Daraus ist ersichtlich, dass die Schmiedehämmer bei einem Durchmesser von 125 mm zum ersten Mal Kontakt mit dem Schmiedeteil haben. Zu diesem Zeitpunkt weist die Mantelfläche des Werkstückes die mit dem Pyrometer gemessene Temperatur von 680 °C auf. Beim Radialschmieden des Schmiedeteils auf den Durchmesser von $D=96,15$ mm erreicht die Schmiedekraft den sehr hohen Maximalwert von $F=2750$ kN. Da hier die maximal zulässige Schmiedekraft von 2500 kN kurzzeitig überschritten wird, führt das Programm der Maschinensteuerung einen Notstopp aus, um eine Überlastung der Schmiedemaschine zu vermeiden. Die Motorantriebsleistung erreicht kurzzeitig den Spitzenwert von $P=140$ kW.

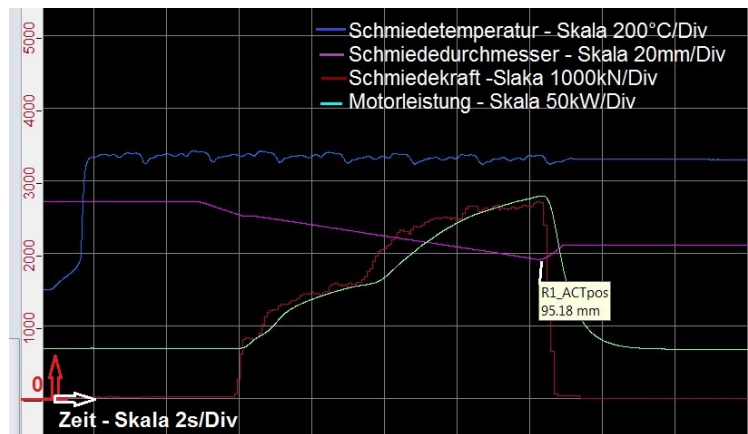


Bild 94: Zeitlicher Verlauf der effektiven Prozessparameter Schmiedetemperatur, Schmiededurchmesser, Schmiedekraft und Motorleistung

3.13.10. Optische Untersuchung der Getriebewellen der Schmiedeserie 4

Das Bild 95 zeigt im direkten Vergleich die Verzunderung der Wellen, die jeweils beim Radialschmieden entstanden ist. Die Untersuchung wird mit einem Endoskop durchgeführt, an dessen Ende ein selbst konstruierter Adapter (Bild 96) zur Aufnahme der Endoskopkamera angebracht ist. Bei den mit einem * gekennzeichneten Wellennummern ist vor dem Schmieden der innere Hohlraum mit einem Zunderschutzlack behandelt worden. Die Wellen 382 und 385* sind bei der Temperatur von 800 °C geschmiedet worden. Der direkte Vergleich der entstandenen Aufnahmen (Bild 95) zeigt, dass die Zunderbildung durch den Schutzlack nicht verringert wird. Das Schmieden der Wellen 343 und 352* erfolgt bei einer Temperatur von 850 °C. Diese weisen temperaturbedingt eine stärkere Verzunderung auf, wobei hier die Zunderschicht poröser ist. Auch hier wird durch den Zunderschutzlack keine signifikante Verbesserung erzielt. Beim Schmieden der Wellen 335 und 352* (950 °C) entsteht eine dickere Zunderschicht, die nicht porös ist.

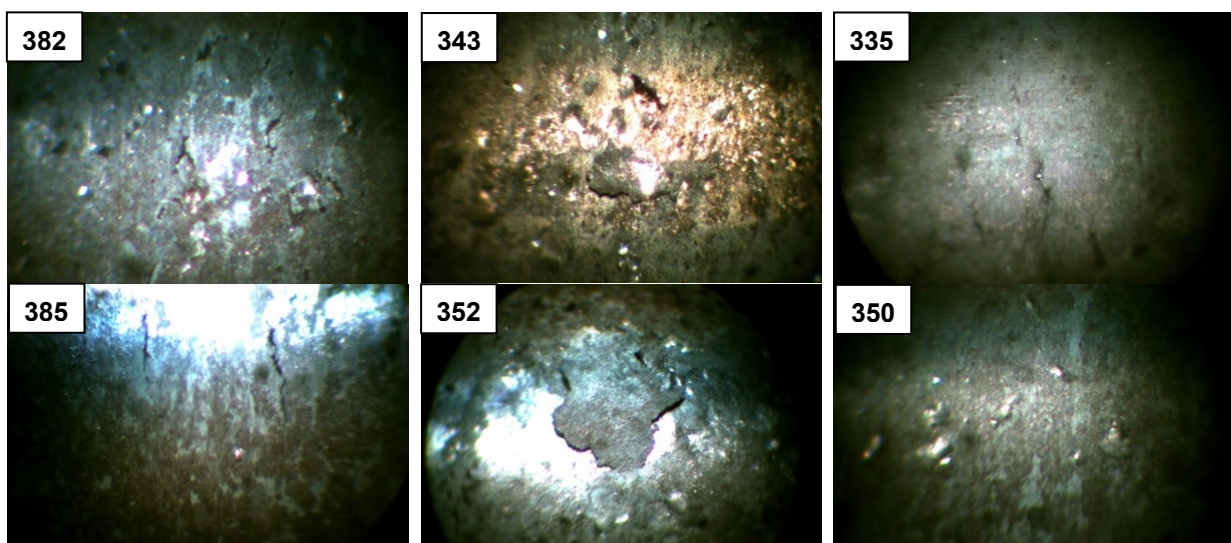


Bild 95: Verzunderung des inneren Hohlraumes der geschmiedeten Wellen 382, 385, 343, 352, 335, 350

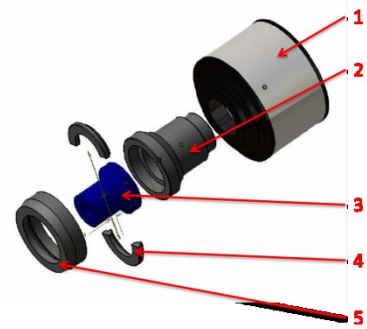
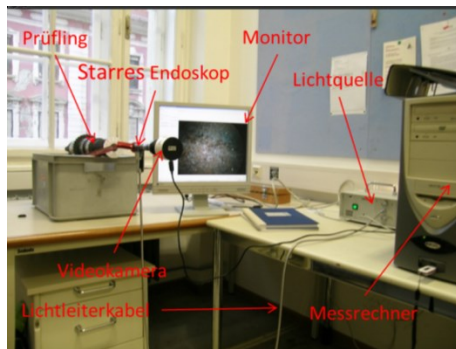


Bild 96: Untersuchung der Welle mit einem Endoskop (Bild links); Verbinden des Endoskops (3) mit der Kamera über den Adapter (Bild rechts): Verschrauben der Endoskopkamera (1) mit dem Einschraubadapter (2) und Verbinden des Endoskopokulars (3) über den geteilten Zwischenring (4) und der Mutter (5) mit dem Einschraubadapter (2).

3.14. Radialschmiederversuche der Serie 5

Die Radialschmiederversuche der Serie 5 werden mit einem optimierten, zweistufigen Dorn DB durchgeführt. Mit diesem, im Bild 97 links gezeigten, Dorn DB soll die Falten- und Rissbildung im Einzugsbereich der schlankeren Wellenseite unterbunden werden. Mit seinem kleineren Durchmesserbereich ist es möglich auch die Hohlräumebereiche der schlankeren Wellenseite über den Dorn zu schmieden, die bei den zuvor beschriebenen Schmiederversuche der Serie 4 ohne Dornunterstützung geschmiedet worden sind. Die in diesem Bereich in den vorangegangenen Schmiederversuche festgestellten Falten sollen durch die die kleine Dornstufe geglättet werden. Die erste Stufe des Dornes DB hat einen Durchmesser von 40 mm, die zweiten Stufe einen Durchmesser von 25 mm. Dieser beinhaltet auch Kühlkanäle für eine optionale, zuschaltbare Innenkühlung. Der D-Dorn (Bild 97 rechts) hat für die erste Schmiedestufe einen Durchmesser von 50 mm und besitzt keine Innenkühlung.

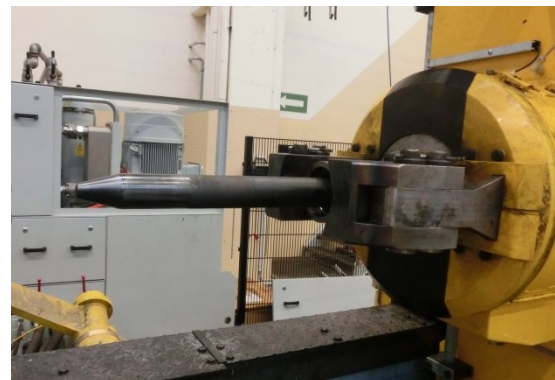
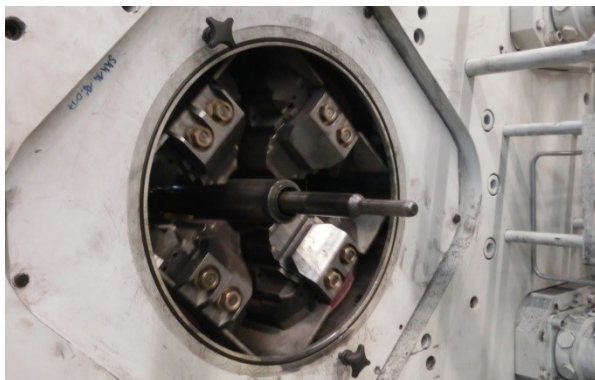


Bild 97: Zweistufiger Dorn DB (40/25 mm) mit Innenkühlung (links) und einstufiger Dorn D (50 mm) ohne Innenkühlung (rechts)

Das Rohteil (Abschnitt eines Schleudergussrohres) wird zunächst von Hand, mit Hilfe einer Schmiedezange aus dem Ofen herausgehoben (Bild 98 links) und auf eine dafür angefertigte Ablagevorrichtung gelegt (Bild 98 rechts).

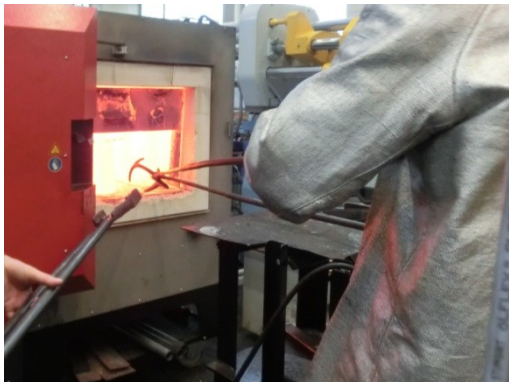


Bild 98: Herausheben des erwärmten Rohteils aus dem Ofen (links) und Ablegen auf den Tisch (rechts)

Alle benötigten nachfolgenden Handhabungsoperationen werden vollautomatisch von einem Industrieroboter durchgeführt. Dieser greift zunächst das erwärmte Rohteil mit seiner Greifeinrichtung und führt es dem Manipulator zu, in den es eingespannt wird (Bild 99 links). Im Vergleich zu den Versuchen der Serie 4 ist hier bei den Versuchen der Serie 5 zusätzlich noch ein Induktionsring an der Schmiedemaschine montiert (Bild 99 rechts, rot markiert). Dadurch wird eine Nacherwärmung des Rohteils auf die gewählte Schmiedetemperatur durchgeführt und der Wärmeverlust während der Bauteilhandhabung kompensiert. Zudem dient die Induktionserwärmung zur Nachwärmung vor der zweiten Umformstufe.

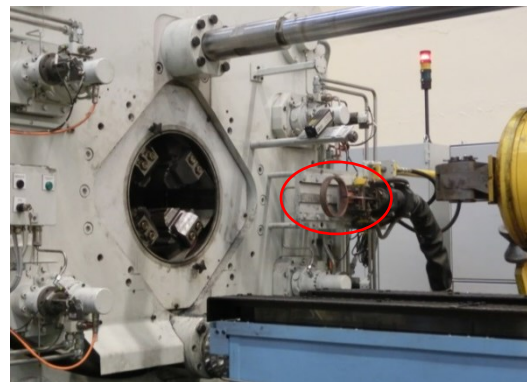
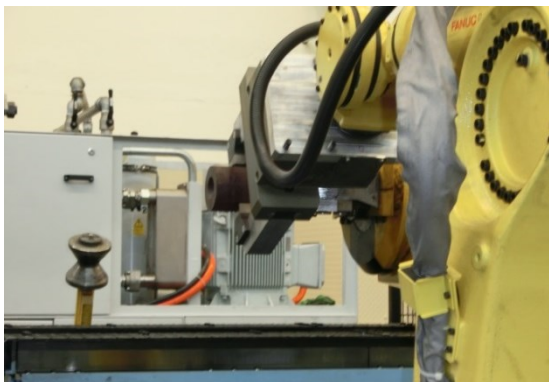


Bild 99: Handhabung des Schmiedeteils durch den Industrieroboter (links); Induktionsring für die Nacherwärmung des Schmiedeteils (rechts, rot markiert)

Das Schmieden der erste Umformstufe erfolgt direkt nach der Entnahme aus dem Elektroofen (Bild 100 rechts) oder nach einer vorgeschalteten, induktiven Nacherwärmung (Bild 100 links).

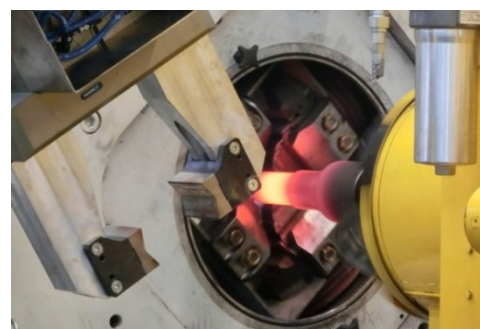
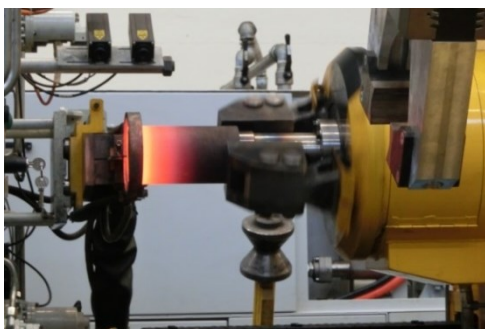


Bild 100: Induktive Erwärmung der ersten Stufe (links) und Schmieden mit dem D-Dorn (rechts)

Nachdem die erste Umformstufe fertig geschmiedet ist, erfolgt das Wenden bzw. Umspannen der fertig geschmiedeten ersten Stufe in den Manipulator durch den Roboter. Das Schmieden der zweiten Stufe erfolgt im Anschluss (Bild 101 rechts). Falls erforderlich wird nach dem Umspannen die zweite Schmiedestufe des Bauteiles induktiv Nacherwärmt (Bild 101 links).

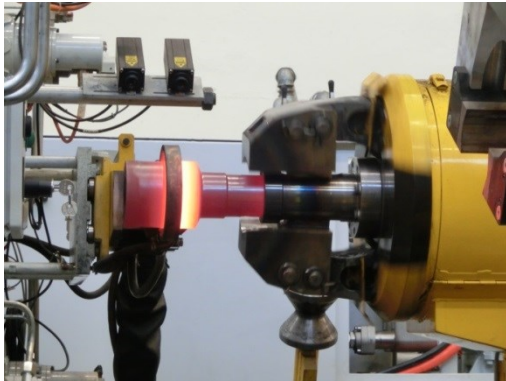


Bild 101: Induktive Erwärmung (links) und Schmieden der zweiten Stufe mit dem DB-Dorn (rechts)

Nach dem Fertigschmieden der zweiten Seite der Getriebewelle erfolgt, wie in Bild 102 dargestellt, das Herausnehmen des fertigen geschmiedeten Werkstücks aus dem Manipulator durch den Roboter, der es zum Abkühlen auf eine Ablagevorrichtung legt.

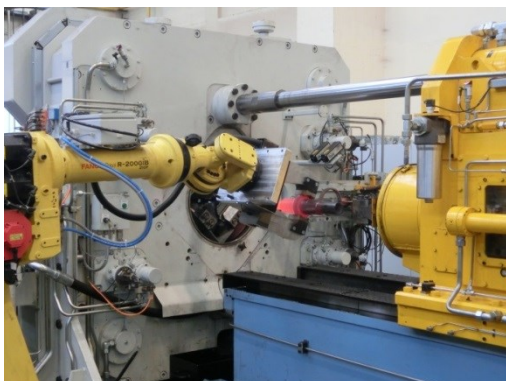


Bild 102: Greifen des fertigen Schmiedeteils durch den Roboter (links) und Ablegen auf die Ablagevorrichtung (rechts) zur Luftabkühlung

Mehrere Versuchsteile (fertig geschmiedete Hohlwellen) werden entlang ihrer Längsachse aufgefräst, um einen groben Überblick über die Qualität der inneren Oberfläche im Hohlraum, dem Wanddickenverlauf und das daraus abzuleitende Schmiedeergebnis zu erhalten. In den Übersichtsfotos sind die Bereiche, an denen Fehlstellen erkannt werden, mit Ellipsen markiert. Die Farbe der dort eingezeichneten Ellipse steht für die Art der dort festgestellten Auffälligkeit:

- Grün: Schmiedefalten
- Rot: Rissbildung
- Gelb: Schmiedefalten und Risse
- Orange: andere Oberflächenfehler

Das Bild 103 gibt einen groben Überblick über die festgestellten Auffälligkeiten, Fertigungsabweichungen bzw. Werkstofffehler und ordnet diesen den entsprechenden Werkstückbereichen zu. Offensichtlich kommt es zu einer Anhäufung von Fehlstellen im Bereich des Überganges vom Mittelring zum Durchmesser 40 mm (Bereich (e)) sowie im Verjüngungsbereich des Durchmessers 25 mm (Bereiche (g) bis (h)). Auf der linken Seite häufen sich die Fehlstellen in den Bereichen (a) bis (b). Zum Nachweis der Fehlstellen und genaueren Bewertungen der Auffälligkeiten werden an den entsprechenden Stellen kleine Segmente aus den Werkstücken herausgeschnitten. Damit werden metallografische Schläffe angefertigt. Anhand der optischen und der metallografischen Untersuchungsergebnisse werden im einem nachfolgenden Schritt die kritischen Wellenbereiche benannt. Die daraus resultierenden, kritischen Bereiche sind im Bild 104 dargestellt. Die Ergebnisse der gefundenen Fehlstellen durch die optische und metallografische Untersuchung werden in den Abschnitten 3.14.1 bis 3.14.9 näher betrachtet und analysiert.

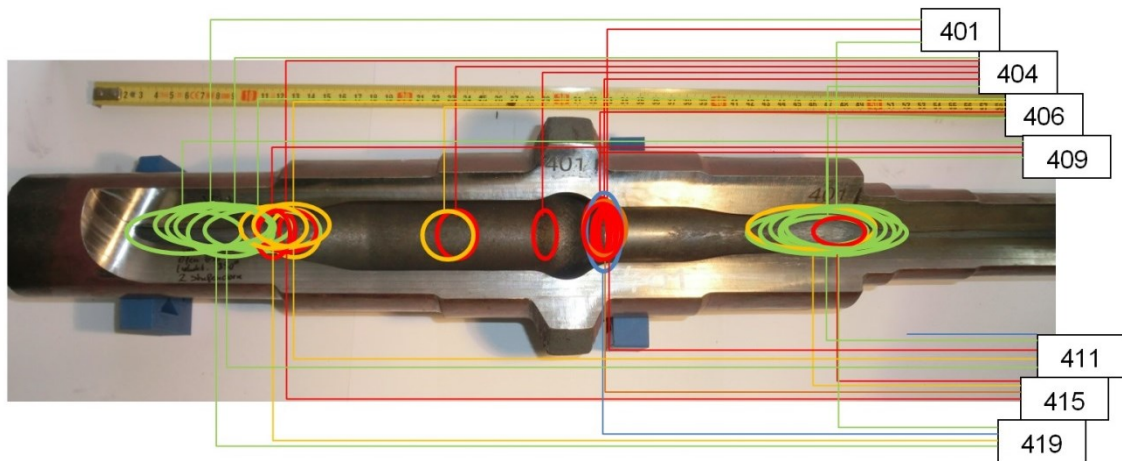


Bild 103: Übersicht über die festgestellten Auffälligkeiten an den Wellen 401, 404, 406, 409, 411, 415, 419 zur Eingrenzung der kritischen Werkstückzonen.

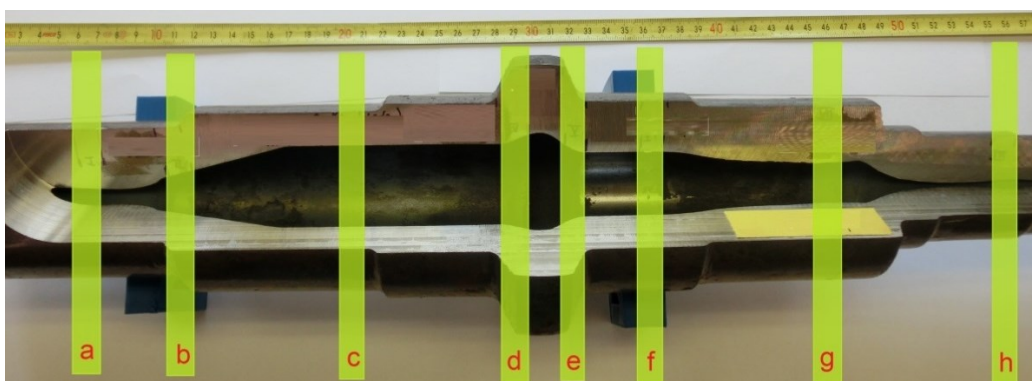


Bild 104: Definierte Wellenbereiche zur Probenentnahme für metallografische Untersuchungen, die auf Grund der Anhäufungen an Auffälligkeiten ausgewählt wurden.

3.14.1. Welle 401: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 850 °C unmittelbar vor dem Schmieden

Bild 105 gibt einen Überblick, Bild 106 zeigt Detailaufnahmen über die gefundenen Fehlstellen im Inneren der geschmiedeten Hohlwelle Nr. 401. Dabei kommt es im Bereich (a) zur Ausbildung von groben Schmiedefalten mit einer Tiefe von bis zu 400 µm (Anhang 8a). Risse mit einer Tiefe von bis zu 1 mm treten im Bereich (b) auf. Zusätzlich treten im rot markierten Bereich der Bild 105 und Bild 106 kleine Risse auf. Wird dieser Bereich in einem Schliff genauer angesehen (Anhang 8e), so werden dort Porositäten festgestellt, von denen Risse ausgehen. Obwohl der Bereich (g) über einen Dorn geschmiedet wurde, weist er eine raue Oberflächenstruktur und Faltenbildung auf. Diese Faltenbildung setzt sich auch noch im Bereich (h) weiter fort. In diesen beiden Bereichen erreichen die Falten eine Länge von bis zu 500 µm. Weitere Falten finden sich im Bereich (g) der Welle, der über der Dornstange DB geschmiedet wurde. Sie haben jeweils den gleichen Abstand zueinander (Bild 106 unten rechts).

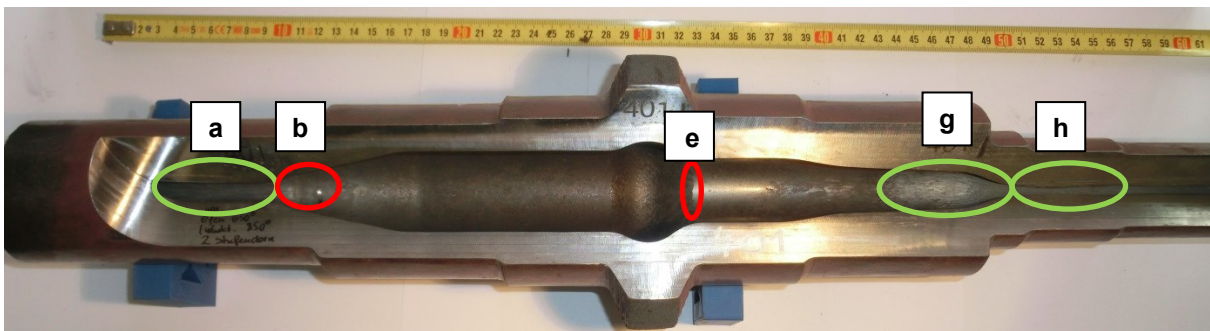


Bild 105: Übersicht über die Fehlstellen an der Welle 401

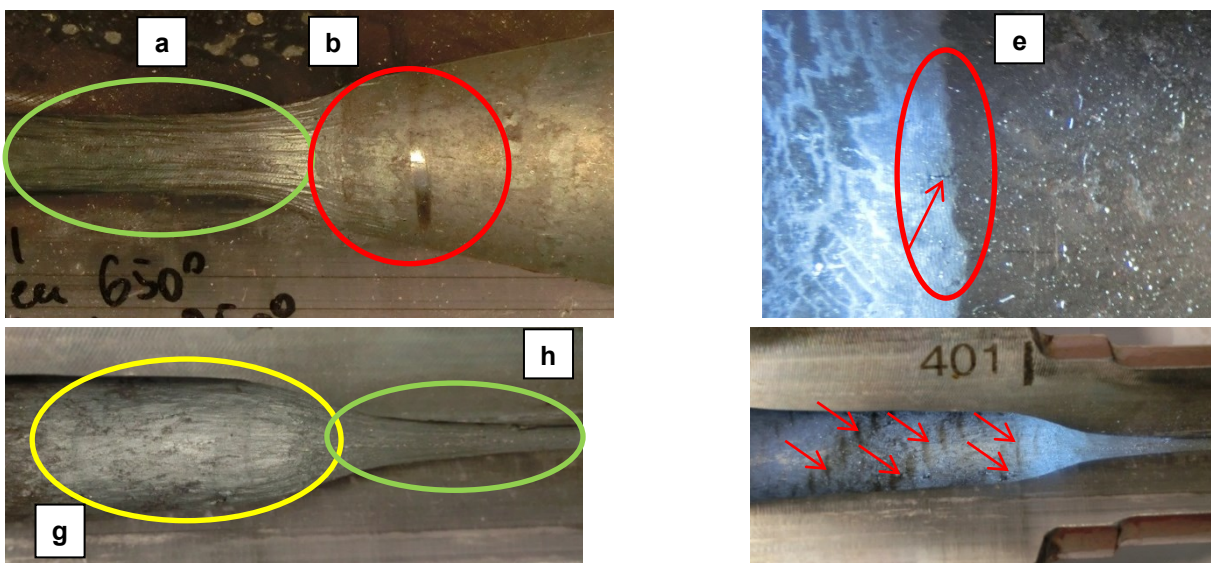


Bild 106: Detailaufnahmen der festgestellten Fehlstellen an der Welle 401 mit Schmiedefalten in den Bereichen (a) und (b), Rissbildung im Bereich (e), Schmiedefalten in den Bereichen (g) und (h) (Bild unten links), Abdrücke der Dornstange DB auf der Oberfläche der Welle 401 (rote Pfeile, Bild rechts unten).

3.14.2. Welle 404: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 850 °C

Im Gegensatz zur Welle 401 wird hier die zweite Werkstückseite nur einstufig über den Dorn DB (Dornbereich mit 40 mm Durchmesser) geschmiedet. Auch bei dieser Welle befinden sich über die ganze Oberfläche verteilt Risse und Falten (Bild 107). In den Bereichen (siehe Detailaufnahmen im Bild 108, sowie Schlibfbilder im Anhang 9) (g) und (h) treten Schmiedefalten auf. In den Bereichen (a) und (b) zeigen sich Lunker, in Verbindung mit Rissen. Des weiteren ist ein Lunker im Bereich (f) ersichtlich. In den Bereichen (c), (d) und (e) befindet sich Risse, die eine Länge bis zu 500 µm haben.

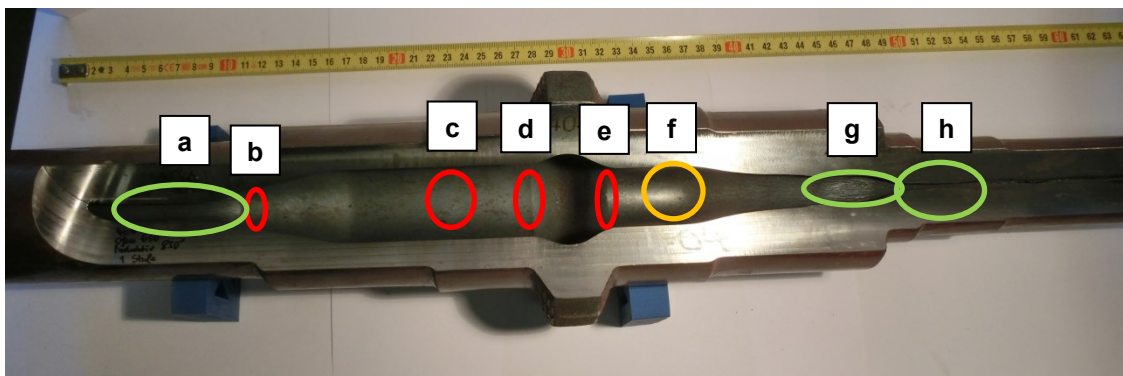


Bild 107: Übersicht der festgestellten Fehlstellen an der Welle 404 mit Schmiedefalten in den Bereichen (g), (h); Risse im Bereich (b) bis (h); Lunker in den Bereichen (a), (b), (f).

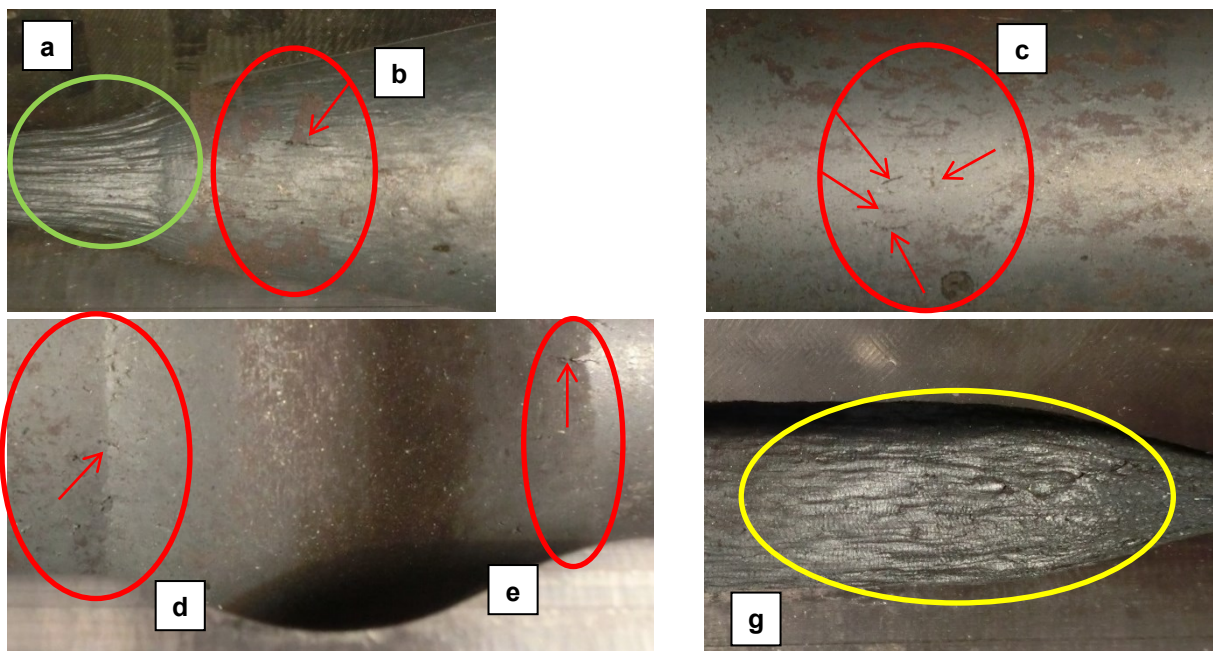


Bild 108: Detaillierte Darstellung der Fehlstellen an der Welle 404

3.14.2.1. Zunderbildung an der Welle 404

Mit der Vorwärmung der Welle im Ofen auf 650 °C und der anschließenden induktiven Nacherwärmung von beiden Schmiedestufen im Inneren auf die Schmiedetemperatur von ca. 850 °C wird die Zunderbildung nicht verhindert. Es bildet sich eine dünne Zunderschicht aus. In

Bereichen, die über den Dorn geschmiedet wurden, bildet sich eine dünne Schmiedeplatte aus. Diese unterscheiden sich gegenüber anderen Bereichen darin, dass Teile dieser Platten während des Schmiedevorganges flächig abplatzen, wodurch in diesen Bereichen das Vorhandensein einer Zunderschicht vergleichsweise einfach nachgewiesen werden kann. Bereiche mit abgeplatzten Zunderplatten (matte, hellgraue Bereiche) sind im Bild 109 (links), mit grünen Pfeilen markiert. Bereiche mit Schmiedeplatten (graue Bereiche) sind darin mit roten Pfeilen markiert (siehe Bild 109 links). Auch im zylindrischen Innenbereich im Bild 109 rechts ist eine Zunderschicht entstanden, deren Oberfläche jedoch glatter ist. Das Bild 110 zeigt die Verzunderung der rechten Wellenhälfte. Auch hier ist ein Teil der Zunderschicht während des Schmiedevorganges abgeplatzt. Hier bildet sich eine (glatte) Zunderplatte aus, die besser auf der Oberfläche haftet (Bild links). Im Bereich der Einschnürung des Durchmessers 25 mm befindet sich eine raue Oberfläche, die von Zunder bedeckt ist (Bild rechts). Da dieser Bereich ohne Dorn geschmiedet wurde, ist dort die Oberfläche rauer. Der Zunder ist hier an der hellgrauen, rauhen Oberfläche erkennbar.

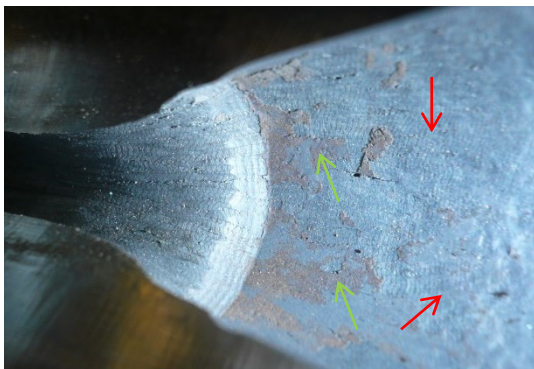


Bild 109: Verzunderung der linken Wellenseite (Welle Nr.404)

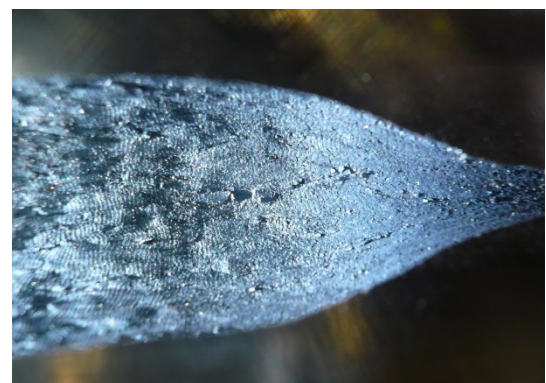


Bild 110: Verzunderung der rechten Wellenseite (Welle Nr.404)

3.14.3. Welle 406: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 950 °C jeweils unmittelbar vor dem Schmieden

Auch bei dieser Welle werden nach dem Umformen über die ganze Wellenoberfläche verteilt Fehlstellen gefunden. Das Bild 111 zeigt eine Übersicht der Lage, das Bild 112 Detailaufnahmen der dort festgestellten Auffälligkeiten. Risse finden sich (siehe Schliffbilder Anhang

10) im Bereich (b) mit einer Länge von bis zu 500 μm , wie auch einen oberflächennahen Lunker, von dem ein Riss ausgeht. Während im Bereich (c) nur ein kleiner Lunker an der Oberfläche ersichtlich ist, ist im Bereich (d) ein großer, oberflächennaher Lunker vorhanden. Im Bereich (e) zeigen sich bis zu 400 μm lange Risse bzw. Lunker und im Bereich (g) ist eine Schmiedefalte vorhanden. Des Weiteres ist ein oberflächennaher Lunker im Bereich (f) vorhanden. Durch die Erhöhung der Temperatur von 850 $^{\circ}\text{C}$ auf 950 $^{\circ}\text{C}$ wird im Bereich (h) die Faltenbildung verhindert. Auch hier konnte keine fehlerfreie Getriebewelle hergestellt werden.

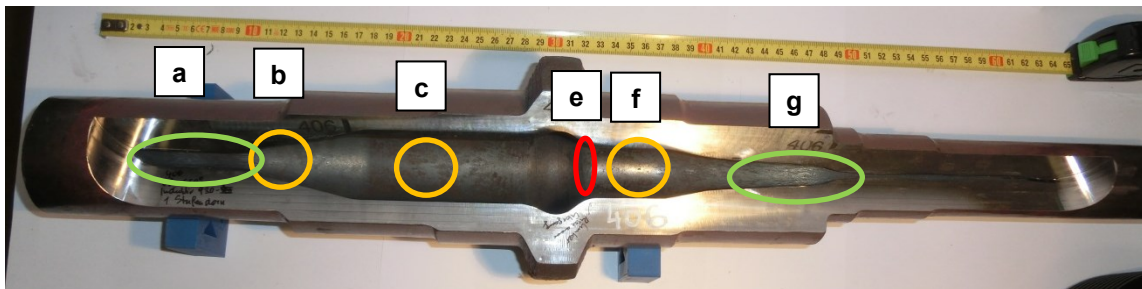


Bild 111: Übersicht der gefundenen Fehlstellen an der Welle 406 mit Faltenbildung in den Bereichen (a) und (g); Lunker in den Bereichen (b) bis (f)

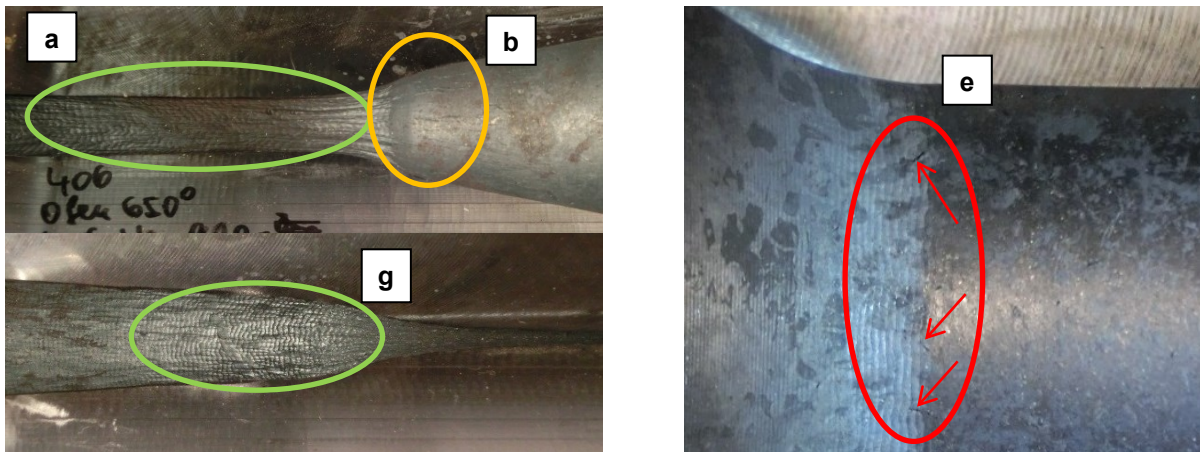


Bild 112: Detaillierte Übersicht der Fehlstellen an der Welle 406

3.14.4. Welle 409: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 $^{\circ}\text{C}$, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 950 $^{\circ}\text{C}$ jeweils unmittelbar vor dem Schmieden

Um die vorhin erwähnte Rissbildung zu unterbinden, wird diese Welle nach der Vorwärmung im Ofen (650 $^{\circ}\text{C}$) induktiv auf eine Innentemperatur von ca. 950 $^{\circ}\text{C}$ nacherwärmt. Hierbei kommt es, im Vergleich zur Nacherwärmung auf 850 $^{\circ}\text{C}$, durch die höheren Temperaturen zu einer stärkeren Zunderbildung. Ein Teil des dabei gebildeten Zunders blättert auch hier während des Schmiedevorganges wieder ab. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sind, dass bei höherer Temperatur Oberflächenfehler nicht verhindert werden (Bild 113 und Bild 114). Auch hier werden im Bereich (a) Schmiedefalten, im Bereich (e) Risse und im Bereich (g) Abdrücke der Dornstange gefunden. Die metallografischen Schriffe (siehe Anhang 11)

zeigen, dass im Bereich (a) neben den Schmiedefalten auch Risse mit einer Länge von bis zu 500 μm auftreten. Im Bereich (b) treten Risse auf, die eine Länge von bis zu 1 mm erreichen. Im Bereich (e) ist ein Riss in Umlaufrichtung vorhanden, der an der Oberfläche bei der Sichtprüfung mit freiem Auge leicht erkennbar ist. Dieser wird mit einem Schlibbild bis in eine Tiefe von 100 μm nachgewiesen. Ein oberflächennaher Lunker ist im Bereich (f) ersichtlich. Im Bereich (g) finden sich tiefere Teilabdrücke des Schmiededornes DB, aber auch Risse mit einer Länge von bis zu 200 μm . Risse mit einer Länge von bis zu 500 μm , wie auch Schmiedefalten, treten im Bereich (h) auf. Im weiteren Verlauf wird an der Radialschmiedemaschine die verantwortliche Fehlerquelle für die Abdrücke der Dornstange gefunden. Die Ursache dafür war, dass sich die Kontermuttern der Dornführungsstange des Dornes DB gelöst haben. Dadurch hatte der Dorn in axialer Richtung Spiel und er verstellte sich während des Schmiedevorganges selbstständig. Dadurch sind die Abdrücke entstanden.

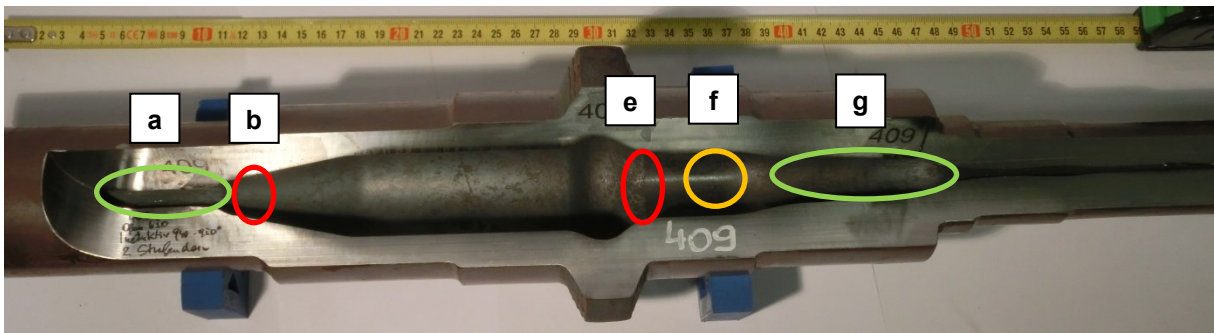


Bild 113: Übersicht der gefundenen Fehlstellen an der Welle 409

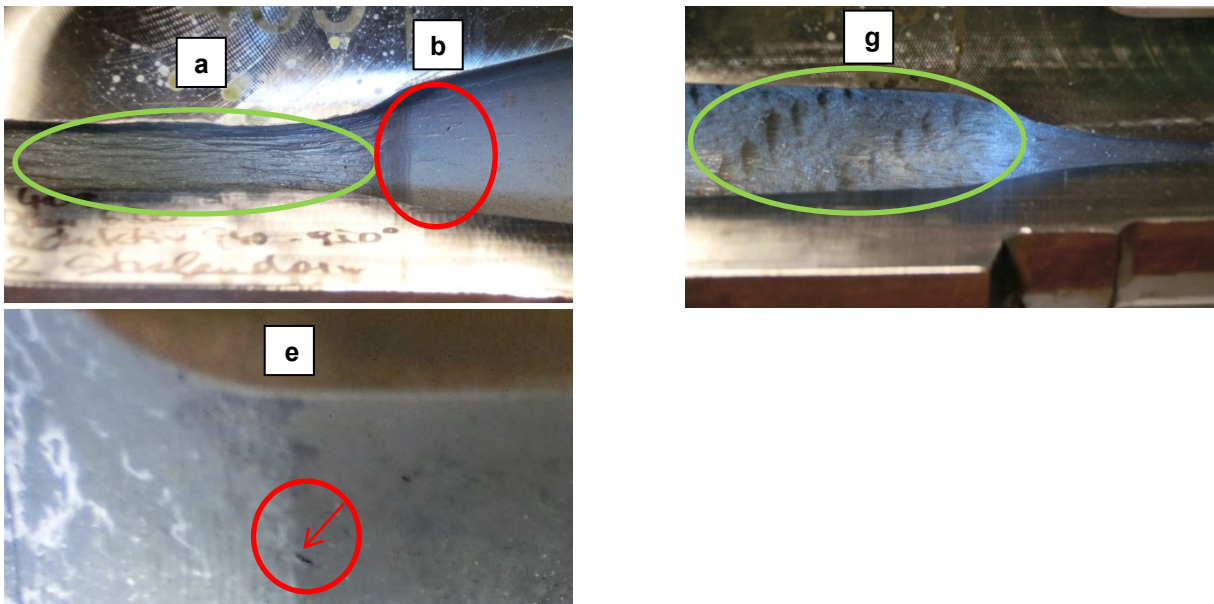


Bild 114: Detailaufnahmen der gefundenen Fehlstellen an Welle 409 mit Schmiedefalten (a), Risse (b) und (e), Abdrücke des Dornes (g)

3.14.5. Welle 411: einstufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 950 °C, ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten

Im Vergleich zu den vorhin gezeigten Wellen der Versuchsserie 5 wird diese Welle im Ofen auf 950 °C erwärmt und beide Wellenseiten direkt hintereinander aus einer Hitze ohne Nacherwärmung geschmiedet. Dabei kommt es zu einer starken Zunderbildung (Bild 115). Die zunächst durchgeführte Sichtprüfung zeigt, dass es in den Bereichen (a), (b), (e) und (g) zu Fehlstellen kommt. Während in den Bereichen (a) und (g) Schmiedefalten vorhanden sind, finden sich in den Bereichen (b) und (e) Risse (siehe Bild 116). Dicke, teilweise abgeplatzte Zunderplatten zeigen sich im Bereich (c). Im Bereich (f) ist eine durchgehende Zunderplatte vorhanden. Die Analyse mit Schlibbildern (siehe Anhang 12) zeigt, dass im Bereich (a) Schmiedefalten, wie auch ein Riss mit einer Länge von 700 µm vorhanden sind. Im Bereich (b) finden sich an der Oberfläche Lunker sowie Risse mit einer Länge von bis zu 200 µm. Während im Bereich (c) abgesehen vom Zunder keine Fehlstellen auffindbar sind, so sind im Bereich (d) wieder Lunker vorhanden. Hier befindet sich eine Aneinanderreihung von Rissen und Lunker, die eine Gesamtlänge von bis zu 500 µm erreichen. Im Bereich (e) sind in eine Tiefe von bis zu 200 µm Lunker vorhanden. Ein Riss, mit einer Länge von bis zu 100 µm, findet sich im Bereich (f). Im Bereich (g) treten die längsten bzw. tiefsten Risse auf, mit einer Länge von bis zu 1 mm, sowie eine wellige Oberfläche. Der Bereich (h) weist Risse mit einer Länge von bis zu 500 µm auf.

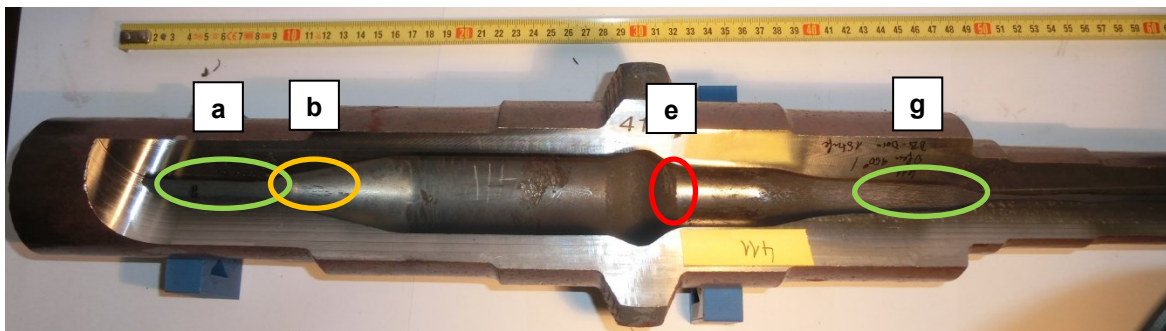


Bild 115: Übersicht der Fehlstellen an der Welle 411 mit starker Zunderbildung

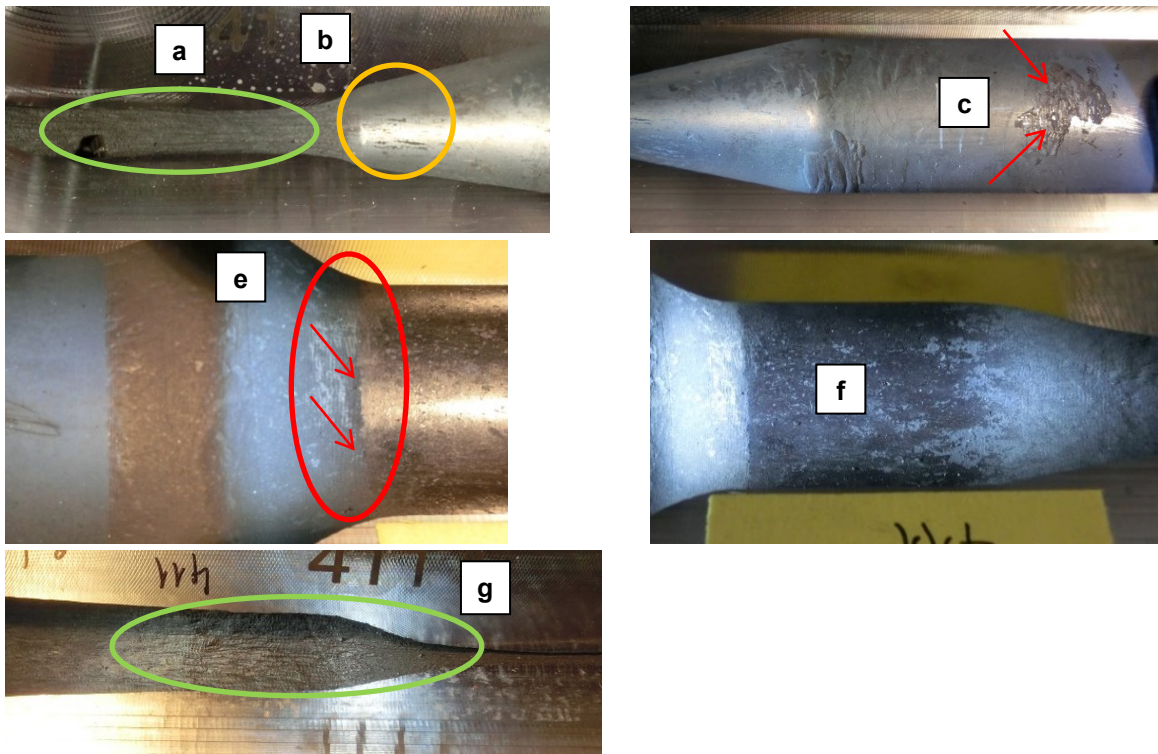


Bild 116: Detailaufnahmen der gefundenen Fehlstellen an der Welle 411

3.14.6. Welle 415: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 950 °C, ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten

Im Unterschied zur Welle 411 wird hier ein zweistufiger Dorn DB für die zweite Werkstückumformseite verwendet. Auch hier treten Risse an der Wellenoberfläche auf (Bild 117 & Bild 118). Diese haben (siehe Anhang 13) im Bereich (b) eine Länge von bis zu 0,4 mm. Bei den Auffälligkeiten im Bereich (e), die bei der optischen Untersuchung der aufgeschnittenen Welle zeigen, handelt es sich um Risse und Lunker. Diese treten auch im Bereich (f) auf. Im Bereich (g) und (h) der Welle zeigt sich eine leichte Faltenbildung. Im Bereich (g) zeigen sich starke Erhebungen, Lunker und Risse mit einer Länge von bis zu 0,3 mm. In diesem Bereich konnte der zweistufige Dorn DB die Oberfläche nicht glätten. Im Bereich (h) ist nur eine minimale Faltenbildung erkennbar.

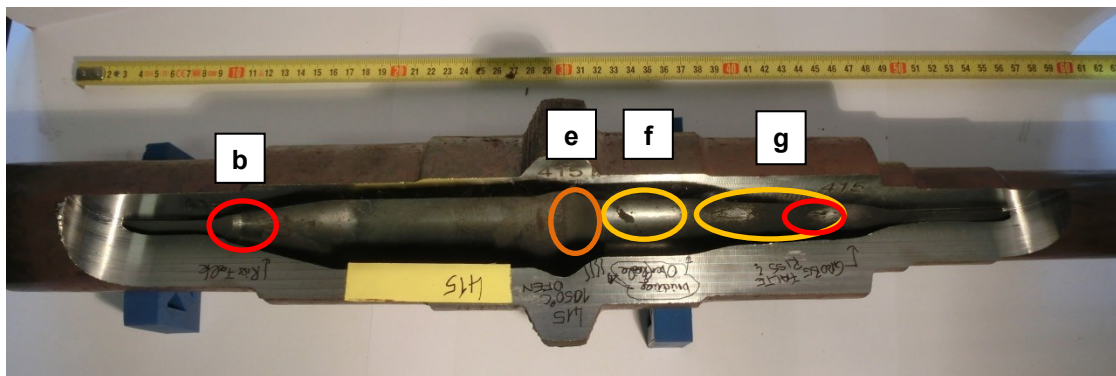


Bild 117: Übersicht der gefundenen Fehlstellen an der Welle 415

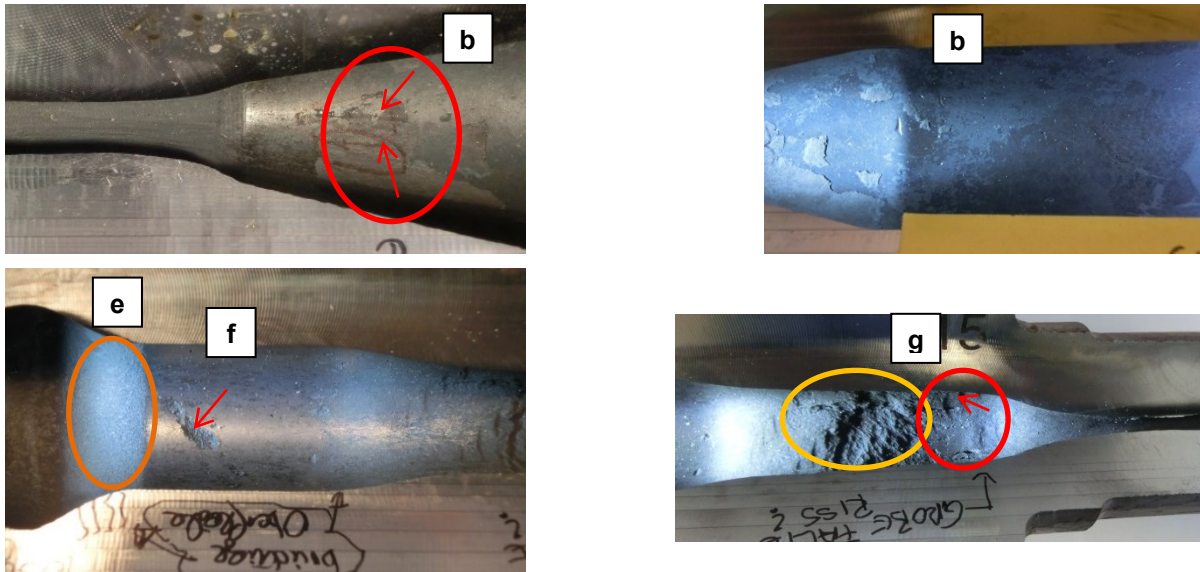


Bild 118: Detaillierte Darstellung der gefundenen Fehler an der Welle 415: Risse im Bereich (b) (links oben), teilweise abgeplatzte Zunderschicht im Bereich (b) (rechts oben), Oberflächenfehler im Bereich (f) (links unten), bergige Oberfläche und Risse im Bereich (g) (rechts unten)

Die Schlifffbilder im Anhang 13 belegen, dass im Bereich (a) und (b) Risse mit einer Länge von bis zu 700 μm auftreten. In den Bereichen (e) und (f) finden sich Lunker und Porositäten. Schmiedefalten und bis zu 300 μm lange Risse sind im Bereich (g) vorhanden. In den Bereichen (c) und (d) werden keine Oberflächenfehler festgestellt.

3.14.7. Welle 419: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung beider Werkstückseiten auf 1000 °C jeweils unmittelbar vor dem Schmieden

Hier wird untersucht, ob mit einer Ofenvorwärmtemperatur von 800 °C und der verhältnismäßig hohen, induktiven Nacherwärmung der Schmiedezonen auf die Temperatur von 1000 °C, die Falten- und Rissbildung zu verhindern ist. Das Bild 119 zeigt, dass wiederum in den kritischen Bereichen bereits die Sichtprüfung Fehler aufzeigt. In den Bereich (a), (g) und (h) (siehe Bild 120) kommt es zu einer Faltenbildung (grün). Zudem ist im Bereich (g) die Oberfläche sehr wellig. Im Bereich des Mittelringes (d↔e) sind Drehriefen vorhanden, die bereits leicht aufgerissen sind (blau). Im orange markierten Bereich sind Auffälligkeiten zu erkennen, die zunächst mit einer optischen Untersuchung nicht von Falten oder Rissen zu unterscheiden sind. Durch die hergestellten metallografischen Schlitze (Anhang 14) im Bereich (b) werden diese Auffälligkeiten als Risse identifiziert, die eine Länge von bis zu 300 μm haben (Anhang 14, Bild b). Im Bereich (e) finden sich Lunker und Porositäten (Anhang 14, Bild e). In den Bereichen (a) und (h) finden sich Schmiedefalten und Risse, die eine Länge von bis zu 600 μm erreichen (Anhang 14, Bilder a und h). Da diese beiden Bereiche in weiterer Folge im Zuge der Endenbearbeitung noch aufgebohrt werden, sind sie nicht als kritisch zu betrachten. Dagegen sind die Rissbildungen im Bereich (b), mit einer Länge von bis zu 490 μm (Anhang 14, Bild b), wie auch im Bereich (g), mit einer Länge von bis zu 500

µm (Anhang 14, Bild b und g) als problematisch zu bezeichnen. Durch das Schmieden des Bereiches (g) über einen Dorn ist die Riss- und Faltenbildung nicht zu unterdrücken.

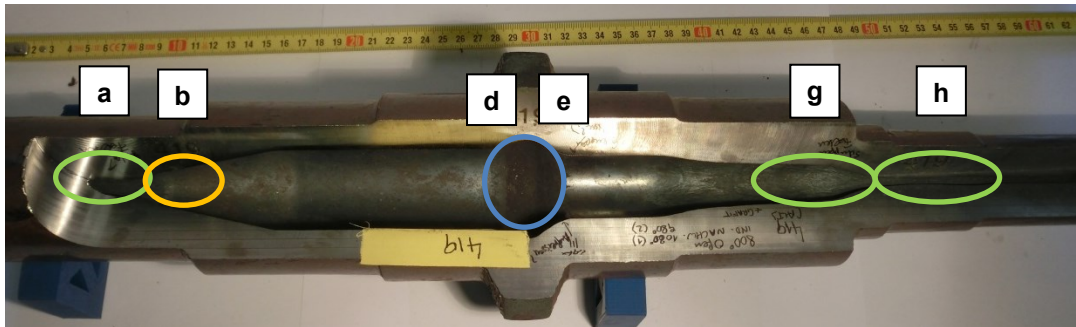


Bild 119: Übersicht der gefundenen Auffälligkeiten an der Welle 419 (DB zweistufig)

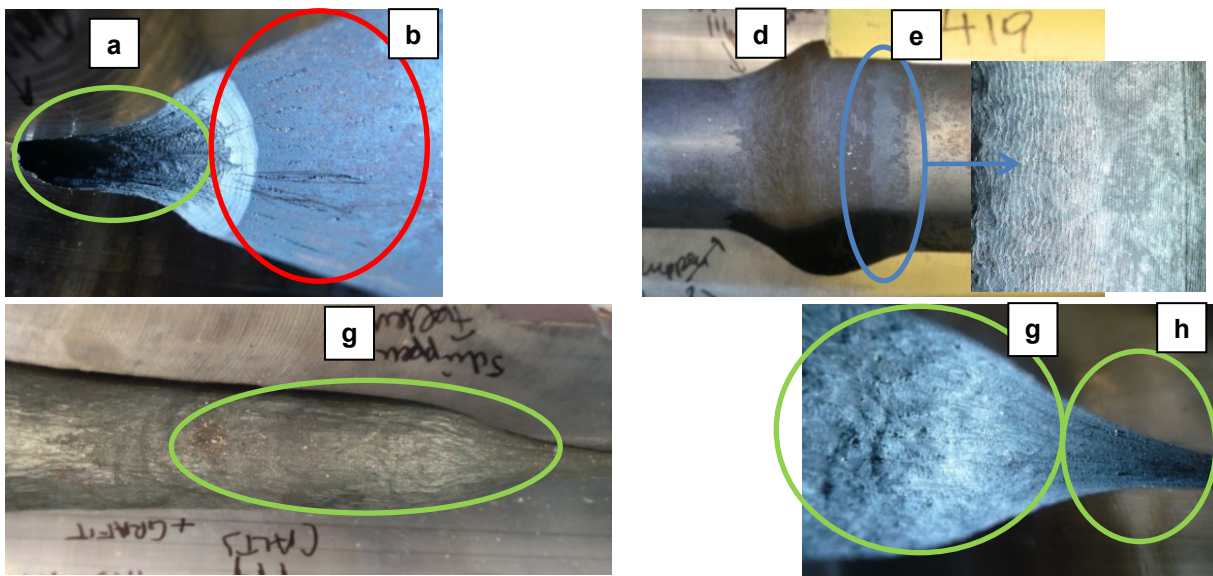


Bild 120: Detaillierte Übersicht der gefundenen Fehlstellen an der Welle 419 (DB zweistufig): Faltenbildung (grün) und Risse (rot) links oben; aufgerissene Drehriefen (blau) rechts oben; Faltenbildung und wellige Oberfläche links unten; Faltenbildung im Bereich (g) bis (h) rechts unten

3.14.8. Welle 422: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 1000 °C, induktive Nacherwärmung der zweiten Werkstückseite auf 1000 °C unmittelbar vor dem Schmieden

Hier wird, im Vergleich zur vorherigen Untersuchung, das Rohteil zunächst im Ofen auf 1000 °C erwärmt. Direkt nach der Ofenentnahme wird die erste Seite des Rohrabschnitts geschmiedet. Anschließend erfolgt das Wenden des Rohteils, um dessen zweite Seite nach der induktiven Zwischenerwärmung auf 1000 °C umzuformen. Das Schmieden des Bereiches (g) erfolgt hier wieder über den zweistufigen Dorn. Das Bild 121 zeigt, dass auch mit dieser Variante kein fehlerfreies Ergebnis zu erzielen ist und dass sich wieder in mehreren Bereichen Auffälligkeiten an der Innenoberfläche zeigen. Dabei werden im Bereich (c) (Bild 122 links oben) und im Bereich (e) (Bild 122 rechts oben) Risse gefunden. Zwischen den

Bereichen (f) und (g) zeigen sich Abdrücke des Dornes, da sich während des Versuches die Befestigungsmuttern der Dornstange gelockert haben (unten links: orange Markierung). Des Weiteren ist zu erkennen, dass im gelb markierten Bereich (g) die Innenkontur einen spitzen Verlauf hat. Dieser ist wegen der lockeren Dornstange entstanden und deshalb nicht zu bewerten.

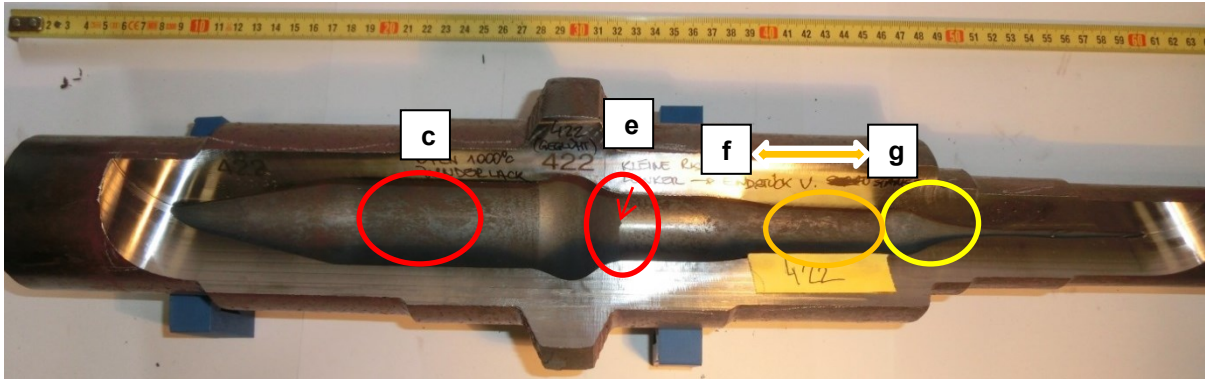


Bild 121: Übersicht über die Auffälligkeiten an der Welle 422 (DB zweistufig)

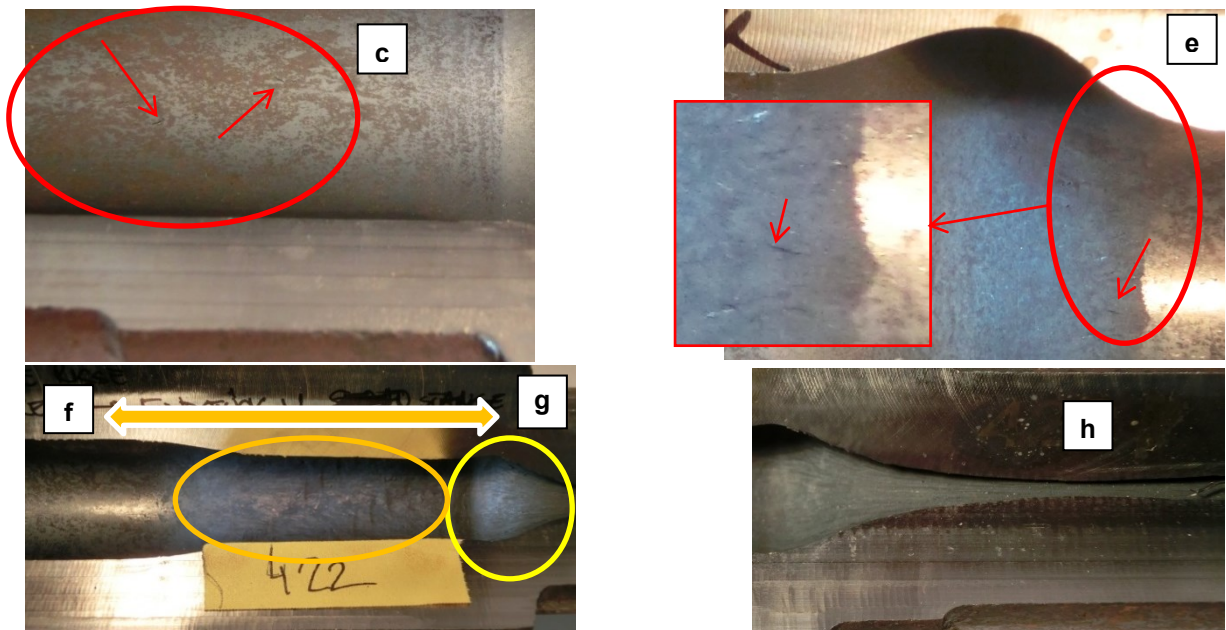


Bild 122: Übersicht der gefundenen Fehlstellen im Detail an der Welle 422

Die Schliffbilder im Anhang 15 belegen, dass mit der Erhöhung der Schmiedetemperatur auf 1000 °C die Riss- und Faltenbildung nicht zu verhindern ist. Im Bereich (a) sind Schmiedefalten vorhanden, die eine Länge von bis zu 400 µm aufweisen. Im Bereich (b) finden sich Risse mit einer Länge von bis zu 500 µm. In den Bereichen (c) und (e) sind Lunker vorhanden, an denen Risse ihren Ausgangspunkt nehmen. Dabei hat im Bereich (c) die Fehlstelle eine Gesamtlänge von 700 µm. Im Bereich (f) sind an der Oberfläche kleine Lunker ersichtlich. Während im Bereich (g) nichts Auffälliges gefunden wird, so zeigen sich im Bereich (h) Schmiedefalten und Risse, die eine Länge von bis zu 400 µm erreichen.

3.14.9. Welle 423: Halbzeug: Stahlrohr (Ck35), zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, induktive Nacherwärmung beider Werkstückseiten auf 1000 °C unmittelbar vor dem Schmieden

Die bisherigen Schmiedeversuche mit den Schleudergussrohren zeigen, dass es immer zu einer unerwünschten Falten- und Rissbildung kommt. Die Erhöhung der Schmiedetemperatur verhindert die Ausbildung von Fehlstellen nicht. Um den Einfluss des Werkstoffes auf das Schmiedeergebnis zu untersuchen, wird der Werkstoff des Ausgangsmaterials verändert. Für den nachfolgenden Schmiedeversuch wird ein dickwandiges, gewalztes Stahlrohr aus Ck35 herangezogen. Die Abmessungen des gewalzten Halbzeuges entsprechen den Abmessungen der zuvor verwendeten Schleudergussrohrabschnitten. Zunächst wird das Rohteil bei einer Temperatur von 800 °C für 90 Minuten in den Ofen gelegt. Nach dem Entnehmen erfolgt die induktive Erwärmung auf 1000°C. Nach dem Schmieden der ersten Wellenseite erfolgt für die zweite Rohteilseite ebenfalls eine induktive Nacherwärmung auf 1000 °C. Das erzielte Bearbeitungsergebnis ist im Bild 123 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass bei der Sichtprobe keine Auffälligkeit im Wellenhohlraum zu finden ist.



Bild 123: Übersicht des Hohlraumes der Welle Nr. 423 (aus Ck35 gefertigt). Die Sichtprüfung zeigt keine unzulässige Auffälligkeit

In den Schlibfbildern (siehe Anhang 16) sind in den Bereichen (a) und (h) eine minimale Faltenbildung mit einer maximalen Faltenlänge von 50 µm zu erkennen. Da diese Bereiche in einem späteren Bearbeitungsschritt aufgebohrt und damit komplett entfernt werden, stellen sie kein Problem dar. Im Vergleich zu den anderen zuvor gezeigten Schlibfbildern weist diese, aus einem anderen Werkstoff hergestellte, Getriebewelle eine sehr schöne, fehlerfreie Oberfläche auf. In den Bereichen (b) bis (g) kann keine Rissbildung nachgewiesen werden.

Das Fazit dieses Umformversuchs ist: Von der Verwendung eines Schleudergussrohrabschnittes als Schmiedeteil wird unbedingt abgeraten. Es ist für diese Anwendung ungeeig-

net. Als Ausgangsmaterial für die Getriebewelle muss ein anderes Halbzeug gewählt werden.

3.15. Schmiedeversuche Serie 6

Bei dieser Versuchsreihe wird nicht mehr ein Schleudergussrohr als Halbzeug, sondern ein Vollmaterial verwendet. Dieses wird innen aufgebohrt und ausgedreht, damit sich ein dickwandiger Rohrabschnitt ergibt.

Werkstoff: 25MoCr4mod (Stangenmaterial)

Abmessungen: D_a 125 mm, D_i 65 mm, $L=240$ mm ($R_{ai} = 2.672 \mu\text{m}$; $R_{max} = 10.1 \mu\text{m}$ $R_{zi} = 9.19 \mu\text{m}$; $l_m = 5.6$ mm)

Der Werkstoff selbst wird nicht verändert, da die Auslegung der Betriebsfestigkeit des Getriebes auf diesem beruht. Zudem wird angestrebt, die Parameter für die Wärmebehandlung sowie der Prozessfolge in der Zerspanung nach Möglichkeit beizubehalten. Die Abmessungen der Schmiededorne, wie auch der zur Erwärmung der umzuförmenden Werkstücke benötigte Ofen und dem optional verwendeten Induktor zur Zwischenerwärmung, entsprechen dem Aufbau der Versuche der Serie 5. Lediglich die Schale des Greifers wird optimiert, damit der Handhabungsroboter das Bauteil besser greift und es in hoher Wiederholgenauigkeit exakter in den Manipulator einspannt (siehe Bild 124).

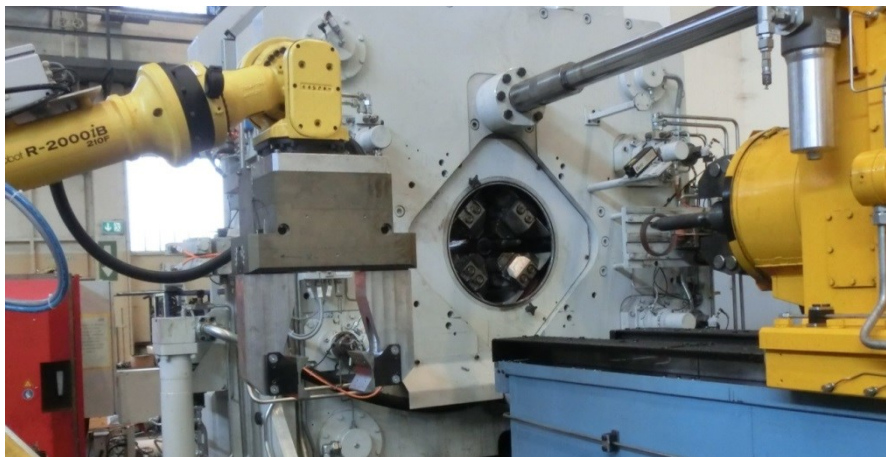


Bild 124: Versuchsaufbau für Serie 6: zweistufiger Dorn DB ($D=40\text{mm}$, $d=25$ mm) im Bereich der Schmiedehämmer; einstufiger Dorn D ($D=50$ mm) beim Manipulator; optimierte Schalen zum Greifen des Schmiedeteiles

Innerhalb der hier durchgeführten Versuchsreihe 6 werden die besten Ergebnisse mit den Wellen 438 und 439 erreicht. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten 3.15.1 und 3.15.2 näher untersucht.

3.15.1. Welle 438: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung Wellenseite 1 (935 °C) und 2 (950 °C) unmittelbar vor dem Schmieden

Bei der unmittelbar nach dem Schmieden durchgeführten Sichtüberprüfung der Welleninnenoberfläche kann keiner der bei den Versuchen zuvor häufig aufgetretenen Auffälligkeiten entdeckt werden (Bild 125). Auch die bei den Wellen der Serie 5 häufig aufgetretene Faltenbildung in den Bereichen (a) und (h) ist hier mit dem freien Auge nicht erkennbar. Im Bereich (a) der Welle, der später noch auf Durchmesser 18,5 mm aufgebohrt wird, sind Drehriefen vorhanden (Bild 126a), die beim Schmiedeprozess in die Länge gezogen wurden. Diese zeigen jedoch keine Neigung zum Aufreißen. Da dieser Bereich später in der Serienfertigung aufgebohrt wird, sind sie nicht qualitätsrelevant. Des Weiteren findet sich im Bereich des Mittelringes eine leichte Drehriefe (Bild 126d-e). Diese ist dadurch entstanden, dass nach dem zentrischen Bohren des Stangenmaterials dieses in einer Folgeaufspannung noch auf den gewünschten Durchmesser ausgedreht wurde. Da das Ausdrehen der zylindrischen Bohrung aufgrund der Gesamtlänge des Rohteils von 240 mm nicht von einer einzigen Seite aus möglich ist, wurde jeweils von jeder Wellenseite aus bis zur Werkstückmitte (jeweils 120 mm) ausgedreht. Da durch den Umspannfehler in den Mittenringbereich eine kleine Kerbe eingebracht wird, muss unter den Bedingungen der Serienfertigung das Ausdrehen von einer Seite aus in einem einzigen Durchgang erfolgen.



Bild 125: Gesamtübersicht des Hohlraumes für die Sichtprüfung der geschmiedeten Welle 438 der Serie 6

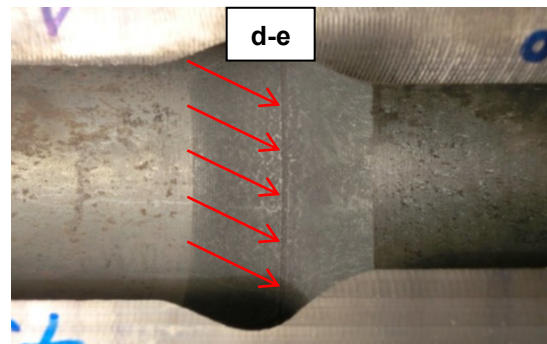
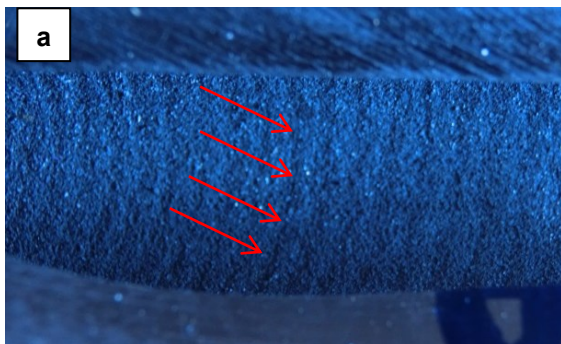


Bild 126: Detaillierte Übersicht der gefundenen Auffälligkeiten an der Innenoberfläche der Welle 438: Drehriefen im Bereich (a); Kerbe im Bereich (d - e)

Erst die hergestellten Schlitze, aus den im Bild 104 gezeigten kritischen Bereichen, zeigen, dass im Bereich (h) doch kleine Schmiedefalten mit einer maximalen Länge von 100 µm vorhanden sind. Da diese aber in einem Wellenabschnitt liegen, der später noch aufgebohrt wird, sind diese zu vernachlässigen und als unkritisch zu betrachten. In allen anderen Bereichen werden mit den angefertigten Schliffbildern keine Fehler festgestellt (Anhang 17).

3.15.2. Welle 439: zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 650 °C, Induktionserwärmung Wellenseite 1 (900 °C) und Seite 2 (870 °C) unmittelbar vor dem Schmieden

Das Schmieden der Welle 439 erfolgt von einer niedrigeren Ofentemperatur, von 650 °C, aus, wie auch mit einer gegenüber dem vorliegenden Versuch niedrigeren, induktiven Nacherwärmung auf 900 °C der Wellenseite 1 und 870 °C der 2. Seite. Auch hier können an der Oberfläche keine Fehlstellen gefunden werden (Bild 127). Jedoch weist diese Welle bei der Sichtprüfung eine nicht so schöne Oberfläche auf wie die Welle 438 (vgl. Bild 125).



Bild 127: Übersicht des Bearbeitungsergebnisses der Welle 439; mit der Sichtprüfung sind keine Fehlstellen erkennbar

Auch hier werden bei der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern (siehe Anhang 18) keine kritischen Fehlstellen gefunden (siehe Anhang 18 a-g). Nur im Bereich (h) finden sich wieder kleine Schmiedefalten (Anhang 18 h), die wie schon zuvor als unkritisch zu betrachten sind.

3.16. Fertig bearbeitete Wellen der Serie 6

Die Analyse der Wellen der Versuchsserie 6 ergibt, dass bei der durchgeführten Sichtprüfung sowie der Überprüfung mit Hilfe metallografischer Schlitze der Wellen 438 und 439 keine qualitätsrelevanten Fehlstellen gefunden werden. Da die Welle 438 die optisch schönere Oberfläche aufweist, stellt diese das beste Versuchsergebnis von allen durchgeführten Umformversuchen dar. Daraus leitet sich die Empfehlung ab, in der späteren Großserienfertigung die Getriebewellen mit den Parametern der Welle 438 zu fertigen. Diese Wellen haben das Potenzial mit „in Ordnung“ beurteilt zu werden. Welches Entzunderungsverfahren für diese Wellen die beste Wahl ist, wird mit den folgenden Untersuchungen ermittelt.

3.16.1. Entzündert durch Kugelstrahlen: Getriebewellen 442 und 441 fertigbearbeitet: geschmiedet über zweistufigen Dorn DB, Ofenvorwärmtemperatur 800 °C, Induktionserwärmung beider Wellenseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 950 °C

Das Bild 128 zeigt das Ergebnis der fertigbearbeiteten Getriebewelle mit der Nummer 422. Als Bearbeitungsmethode für die Entzunderung wird hier das Kugelstrahlen untersucht. Damit wird angestrebt, nach der Hartbearbeitung, am Ende der gesamten Prozesskette, die gesamte Zunderschicht im Hohlraum zu entfernen. Stellen, an denen kein Material abgetragen werden darf (z. B. Endbereiche mit Innengewinde), werden durch eigens dafür angefertigte Andeckungen (u.a. Hülsen) geschützt. Dieser Bearbeitungsversuch wird als Lohnauftrag an die Firma Metall Improvement Company, Feuchtwangen, vergeben. Die dort vorhandenen Kugelstrahleinrichtungen stellen Eigenentwicklungen dar, mit denen ein möglichst breites Bauteilspektrum abgedeckt werden soll. Da diese Firma ihr spezielles Know-how auf dem Gebiet des Kugelstrahlens schützt und strikt geheim hält, kann im Rahmen vorliegender Arbeit kein Einfluss auf die Optimierung der Bearbeitungsparameter genommen werden. Auch der genaue Aufbau der hier verwendeten Strahlanlage wird vom Auftragnehmer nicht offengelegt. Es ist weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten vorbehalten, die nachfolgend vorgestellten Bearbeitungsergebnisse unter Laborbedingungen nachzustellen und ggf. weiterzuentwickeln. Jedoch wird hier davon ausgegangen, dass die dabei verwendeten Stahlkugeln einen Durchmesser zwischen 1 und 2 mm haben. Bei der durchgeführten, optischen Befundung mittels Endoskop und Sichtprüfung werden keine Fehlstellen an der Oberfläche des Welleninnenraumes festgestellt (siehe Bild 128). Dennoch finden sich hier zwei Auffälligkeiten. Zum einen, im Bild 129, eine mit roten Pfeilen markierte, kleine Ringnut. Diese ist – wie bereits im Abschnitt 3.15.1 angemerkt – beim beidseitigen Ausdrehen der Schmiedeteile entstanden. Zu vermeiden ist diese Auffälligkeit durch die Prozessumstellung vom Ausdrehen zum Tieflochbohren. Zum anderen sind im mit blauen Pfeilen markierten Bereichen Drehriefen vorhanden, die jedoch durch einen geringeren Vorschub beim Schlichten des Halbzeugs zu vermeiden sind.

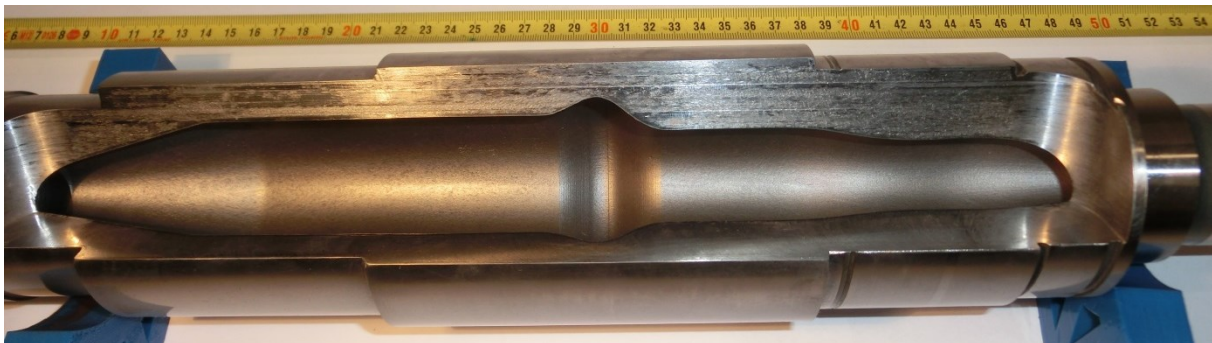


Bild 128: Übersicht des Hohlraumes der Welle 442 (zur Befundung musste im Bereich der Ausfräsungen die äußere Härteschicht abgeschliffen werden, da sonst die Welle mit einer Bandsäge nicht zerschneidbar gewesen wäre)

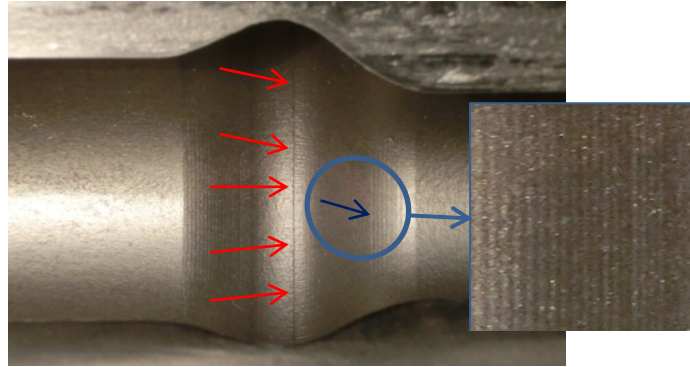


Bild 129: Kleine umlaufende Nut durch Umspannen des Schmiederohrteils bei der Drehbearbeitung des Innendurchmessers in zwei Werkstückaufspannungen (rote Pfeile) und Drehriefen an der Oberfläche (blau markierter Bereich)

Zur genaueren Analyse werden Schlibfbilder in den im Bild 130 gezeigten Bereichen hergestellt. Die schwarzen Pfeile zeigen auf die Kanten der herausgearbeiteten Wellensegmente zur Anfertigung der metallografischen Schlibfen (Sicht- bzw. Betrachtungsebene).

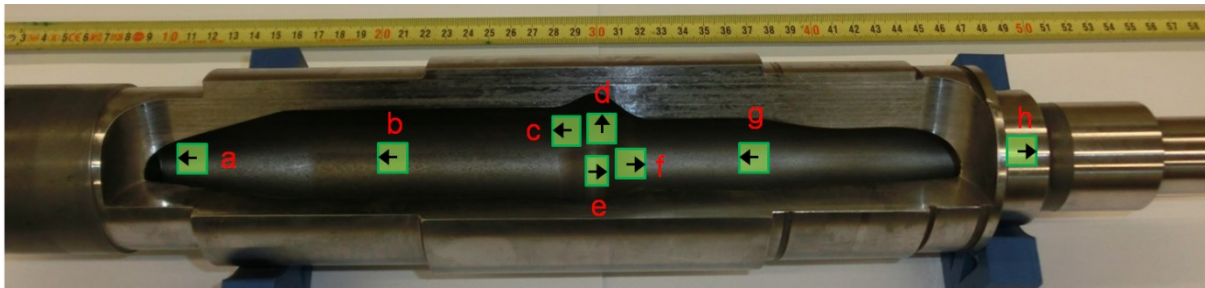


Bild 130: Übersicht der ausgewählten Bereiche zur Untersuchung mit metallografischen Schlibfen der Welle 442 (schwarze Pfeile zeigen, auf welche Kanten die Überprüfung durchgeführt wird)

Das Ergebnis der hergestellten Schlibfbilder wird in den Bildern im Anhang 19 dargestellt. Auch dort kann kein Riss oder Lunker gefunden werden. Auffällig sind dort nur die im Bild 129 gefundenen, kleinen Drehriefen. Diese sind auf der Wellenoberfläche vorhanden und am Schlibfbild (Anhang 19d) als wellenförmig verlaufende Oberfläche zu sehen. Weder mit einer optischen Untersuchung (siehe Bild 130) noch mit Schlibfbildern (Anhang 19) können Fehlstellen im Inneren der Welle 442 gefunden werden. Deshalb wird diese Welle als zunder- und fehlerfrei bewertet und zeigt eine Möglichkeit zur Serienfertigung der Getriebewelle auf.

Die Untersuchung der zweiten Getriebewelle, die unter den gleichen Prozessbedingungen wie die Welle 442, mit dem Kugelstrahlen entzundert ist, wird im Werkstofflabor des Mercedes-Benz-Getriebewerks in Gaggenau-Rastatt durch die dortigen Werkstoffspezialisten (Dr. Ahrens und Hr. Ebel) durchgeführt. Auch bei dieser Welle werden bei der durchgeführten Sichtprüfung keine Zunderreste oder andere Fehlstellen auf der Oberfläche des Hohlraums gefunden (Bild 131).

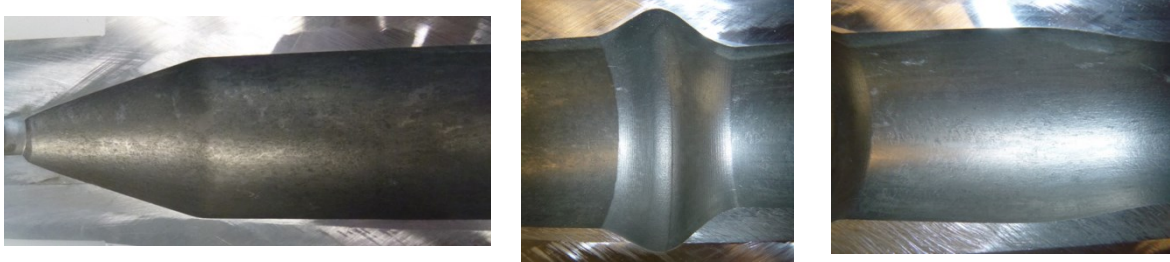


Bild 131: Übersicht des Hohlraumes der Welle 441 mit zunderfreier Oberfläche und ohne Oberflächenfehler. (Quelle: Dr. Ahrens, Daimler AG, Getriebewerk Gaggenau-Rastatt)

Zur genaueren Untersuchung werden, wie im Bild 132 dargestellt, in den dort definierten Bereichen metallografische Schliffe hergestellt. Die Ergebnisse dieser Schliffe zeigen die Bilder im Anhang 20. Da auch bei diesen Schliffen keine Fehlstellen zu finden sind, wird die Welle als „in Ordnung“ befundet und die o.a. Empfehlung für die Großserienfertigung bestätigt.

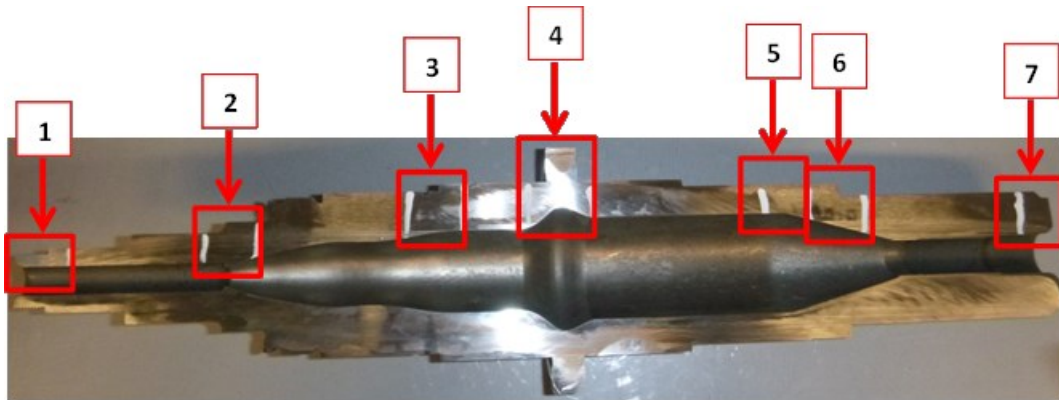


Bild 132: Übersicht der ausgewählten Bereiche zur Untersuchung mit metallografischen Schliffen der Welle 441 (Welle wurde mittels Drahterodieren in der Mitte zerschnitten). (Quelle: Dr. Ahrens, Daimler AG, Getriebewerk Gaggenau-Rastatt)

3.16.2. Entzunderung mit Kolene-4-Verfahren

Als weiteres Bearbeitungsverfahren zum Entzundern wird das Kolene-4-Verfahren ausgewählt. Die hier beschriebenen Versuche werden bei der Firma HEF Durferrit in Mannheim durchgeführt. Die Versuchsobjekte, mit denen die ersten Untersuchungen durchgeführt werden, sind Schleudergussrohrsegmente, die zur besseren Beurteilbarkeit entlang der Längsachse in der Mitte durchgesägt sind. Es werden hierfür fertig bearbeitete Getriebehohlwellen (gehärtet und hartzerspannt) verwendet, die nur noch entzundert werden müssen. Da es bei der Anwendung des Kolene-4-Verfahren auch zu einer Verringerung der Härte an bereits gehärteten Flächen kommen kann, muss die Prozesstemperatur so niedrig wie möglich gehalten werden. Die gewählten Versuchsparameter sind in der Tabelle 16 dargestellt. Die beiden Wellen werden zunächst in einem Ofen auf die Temperatur von 200 °C vorgewärmt. Anschließend werden diese in die Salzschnmelze eingesenkt und verweilen dort für einen Zeitraum von 20 Minuten. Während dieser Zeit wird an den Korb eine Gleichspannungs-

quelle mit den in Tabelle 17 gewählten Parametern angelegt, welche die Entzunderung beschleunigt.

Bauteilnummer	Temperatur [°C]		Zeit [min]		Nachbehandlung
	Vorwärmer	Kolene No.4	Vorwärmer	Kolene No.4	
436	200	320	20	20	Luftabkühlung ↓ Wasserspülung ↓ Beize
435	200	350	20	20	

Tabelle 16: Parameterwahl für das Kolene-4-Verfahren

Spannung [V]	Strom [A]	Bauteilpolung
2,5	65	negativ

Tabelle 17: Parameterwahl für die Gleichspannungsquelle beim Kolene-4-Verfahren

3.16.2.1. Welle 436: geschmiedet bei (DB zweistufig), Ofen 800 °C, Induktionserwärmung Seite 1 (950 °C) und Seite 2 (950 °C); gerichtet; gewuchtet; wärmebehandelt; gerichtet; hartzerspannt; entzündert mit Kolene-4-Verfahren

Im Vergleich zur Welle 442 weist die Welle 436 (siehe Bild 133) immer noch eine Restverschmutzung an der Oberfläche des Hohlräume auf. Da bei dieser Welle das Salzbad die verhältnismäßig niedrige Temperatur von 320°C hat, bildet sich um die Welle eine schokoladenartige Masse. Deshalb wird bei dieser Temperatur keine ausreichende Entzunderung erreicht. Das damit erzielte Bearbeitungsergebnis muss mit „nicht in Ordnung“ bewertet werden. Um das auf der Welle angelagerte Salz wieder zu entfernen, ist es notwendig, das Salzbad auf eine Temperatur von mindestens 400 °C zu erwärmen.



Bild 133: Übersicht des Hohlräume der Welle 436 nach der Entzunderung mit dem Kolene-4-Verfahren bei einer Salzbadtemperatur von 320 °C

Auch mit der Getriebewelle 435 wird bei der höheren Salzbadtemperatur von 350 °C keine vollständige Entzunderung erreicht. Im Bild 134 ist immer noch eine Restzundermenge auf der Oberfläche zu erkennen, wie auch Salzreste (gelb/grüne Verfärbungen). Im Vergleich zu der im Bild 133 gezeigten Getriebewelle ist das Reinigungsergebnis etwas besser. Ob es

sinnvoll ist, die Temperatur des Salzbadetes zur Verbesserung der Reinigungswirkung zu steigern, soll die in Abschnitt 3.16.3 gezeigte Härtemessung an der Oberfläche von ausgewählten Getriebewellen zeigen. Falls diese Bearbeitungsmethode zu einem starken Härteabfall an bereits gehärteten Werkstückzonen führt, ist dieses Verfahren für die betrachtete Getriebewelle nicht anwendbar. Es ist zu prüfen, ob die vom Salzbadhersteller vorgegebene Behandlungstemperatur von 480 °C, die für eine gute Reinigungswirkung mit dem Kolene-4-Verfahren erforderlich ist, zu unzulässigen Gefügeumwandlungen im Werkstoff führt.

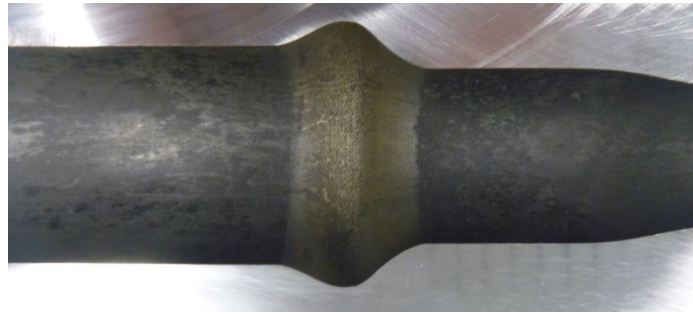


Bild 134: Übersicht des Hohlraumes der Welle 435 nach der Entzunderung mit dem Kolene-4-Verfahren bei einer Salzbadtemperatur von 350 °C

3.16.3. Härtemessungen

An den Lagerstellen der Getriebewellen wird ein Mindesthärtewert von 59 HRC gefordert. Bei den in der Tabelle 18 aufgelisteten Wellen werden an der lt. Werkstückzeichnung vorgegebenen Härtemessposition 2 jeweils drei Härtemessungen durchgeführt. Wird der jeweils mittlere Härtewert für Versuchszwecke betrachtet, so zeigt sich, dass bei den kugelgestrahlten Wellen ein gemittelter Härtewert von 62,3 HRC bzw. 63,3 HRC erreicht wird. Bei den mit dem Kolene-4-Verfahren behandelten Wellen kommt es, aufgrund der Erwärmung der Wellen auf Temperaturen zwischen 320 °C und 350 °C, zu einem starken Härteabfall. Dabei werden an der Härtemessstelle 2 bei den Wellen 435 und 436 gemittelte Härtewerte von 55,3 HRC bzw. 54,0 HRC ermittelt. Aus diesem Grund scheidet das Kolene-4-Verfahren für die Nachbehandlung der Getriebewellen aus.

Welle Nr.	Messung Nr.			Mittelwert
	1	2	3	
441	63 HRC	63 HRC	64 HRC	63,3 HRC
442	62 HRC	62 HRC	63 HRC	62,3 HRC
435	55 HRC	55 HRC	56 HRC	55,3 HRC
436	54 HRC	54 HRC	54 HRC	54,0 HRC

Tabelle 18: Ermittelte Härtewerte der Getriebewellen 441, 442, 435, 436 nach dem Entzunderungsvorgang

3.17. Richten

Nach dem Schmieden und nach der Wärmebehandlung durch Einsatzhärten tritt ein sog. Verzug auf. Die Längssymmetrieachse der Getriebewelle weicht von der Geraden ab und ist

gekrümmt. Die Getriebewelle weist „einen Schlag“ auf, der durch Richten eliminiert werden muss. Eine gekrümmte Getriebewelle würde unter Betriebsbedingungen infolge unzulässig hohe Kräfte in ihren Lagerstellen verursachen. Das Richten der Versuchsteile erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Firma Dunkes, Kirchheim/Teck, einem Hersteller von Richtpressen. Zur Messung der Rundlaufabweichungen werden die im Bild 135 gezeigten Messstellen definiert. Auf den mit A und B gekennzeichneten Positionen werden die Wellen auf drehbare Rollen gelegt. Damit sind die Bezugsebenen für die Rundlaufmessung festgelegt. Zudem wird während des Richtvorgangs die Welle in den Bereichen A1 und A2 abgestützt. Teilweise wird sie auch noch zusätzlich, zur Verkürzung der Biegelänge, im Bereich A3 abgestützt. Dadurch wird die Welle in kleinere Richtabschnitte unterteilt und somit das Richtergebnis verbessert. Die Messung des Rundlaufes erfolgt mit Hilfe von mechanischen Messuhren an den im Bild 135 gezeigten Messpositionen. Auf diese Positionen drückt auch der Richtstempel (rotes Rechteck) beim Richtvorgang. Der Richtvorgang ist beendet, wenn die Rundlaufabweichung an den definierten Kontrollstellen Maximalwertausschläge von 0,1 mm nicht mehr überschreiten. Ein noch genaueres Richten auf einen Maximalausschlag von 0,05 mm ist aufgrund der Oberflächenrauigkeit (Schmiedehämmerabdrücke) nicht möglich.

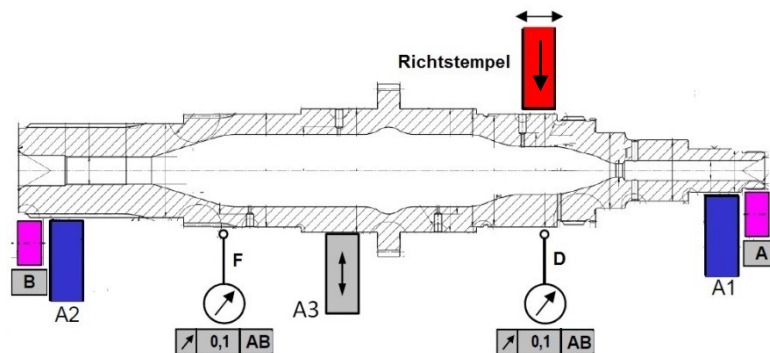


Bild 135: Messstellen an der Getriebewelle; A und B: Bezugsflächen für die Rundlaufmessung; A1, A2, A3: Auflagerstellen beim Richtvorgang

Das Richten erfolgt auf einer vorhandenen, manuell zu bedienenden Richtpresse (siehe Bild 136 oben). Dazu wird die Welle an ihren äußeren Enden an den rot markierten Stellen (A, B) auf Rollen drehbar gelagert aufgelegt. Diese legen die beiden Bezugsflächen bei der Rundlaufüberprüfung fest. An den Messstellen (D und F) erfolgt beim Drehen der Welle die Bestimmung der Drehlage und der Werte der maximalen Durchbiegung. Die Messung erfolgt mit zwei analogen Messuhren, deren Tastspitze auch während des gesamten Richtvorganges die Wellenoberfläche kontaktiert. Wird der Richtvorgang z. B. im Bereich D gestartet, so wird die Welle zunächst so ausgerichtet, dass der Druckstempel direkt auf den Punkt mit dem Maximalausschlag drückt (Bild 136 links unten). Drückt der Stempel auf einen der grün markierten Bereiche der Messuhren, dann kippt der schwenkbar gelagerte Rollenhalter (A, B) mit der Welle nach unten. Erst wenn die Welle auf den Lagerböcken (A1, A2, bzw. A3)

aufliegt wird sie durch die Stempelkraft plastisch entgegen der ursprünglichen Durchbiegung verformt.

Das Biegerichten der Welle erfolgt in kleinen Schritten mit einem Druckstempel. Dies erfolgt abwechselnd in den grün markierten Bereichen der Auflagerstellen (D bzw. F). Über einen weiteren Lagerbock an der Position A3 wird die Biegelänge bei Bedarf verkürzt und dadurch die Welle in einem kleineren Längenbereich verformt. Der Richtvorgang ist abgeschlossen, wenn an den definierten Positionen bei der Rundlaufmessung ein Maximalausschlag kleiner gleich 0,1 mm erreicht wird. Anschließend erfolgt die zerspanende Vorbearbeitung der Wellen. Auf die Herstellung der Steckverzahnungen für die Welle-Nabe-Verbindungen wird bei diesen Untersuchungen verzichtet.

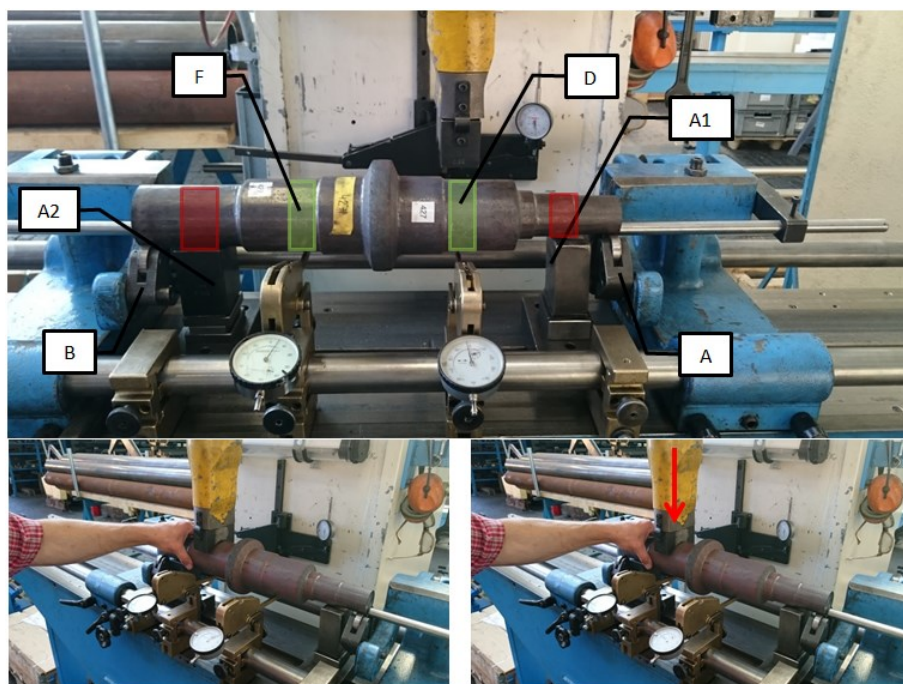


Bild 136: Richtvorrichtung mit eingelegter Getriebewelle (oben); Positionieren der Welle vor dem Richten, damit der Druckstempel im Bereich F aufliegt (links unten), Richtbiegen der Welle durch Drücken mit dem Stempel auf die Fläche F (rechts unten)

Nach der Wärmebehandlung durch Aufkohlen, Härten und Anlassen erfolgt ein zweiter Richtvorgang auf der gleichen Richtpresse unter den gleichen Richtbedingungen. Hier besteht die Gefahr, dass als Folge der begrenzten Umformbarkeit Risse entstehen und die Getriebewelle beim Richten bricht.

3.18. Auswuchten

Die Feststellung der Masseverteilung an den Getriebewellen erfolgt jeweils zwei Mal. Damit werden die Einflüsse des Radialschmiedens und der Wärmebehandlung auf die Wuchtgüte analysiert.

3.18.1. Auswuchten der Getriebewellen

Das Auswuchten der Getriebewellen erfolgt in enger Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Wuchteinrichtungen als Technologiepartner, Fa. Hoffmann, Pfungstadt. Die für die Getriebewellen vorgegebenen zulässigen Unwuchtwerte sind in der Tabelle 19 dargestellt. Die Unwucht wird dabei auf die definierten Ebenen 1 und 2 (Bild 137) gleichmäßig aufgeteilt. Vor dem eigentlichen Wuchten wird zunächst der Ausgangszustand (=Urzustand) der jeweiligen Welle ermittelt. Hierzu wird die Getriebewelle auf beiden Seiten auf drehbare Rollen gelegt, an denen sich Kraftmessensoren befinden (Bild 138). An einem Wellenrand wird zur Drehlagenmarkierung ein kleiner Klebepunkt auf die Oberfläche geklebt. Die Getriebewelle wird über einen Elektromotor und einen dünnen, endlosen Kunststoffriemen angetrieben (Bild 138). Die Steuerung der Wuchtmesseinrichtung erfasst die an den Auflagerrollen gemessenen Kräfte in Abhängigkeit von der aktuellen Drehlage der Getriebewelle bei der eingestellten Messnenndrehzahl. Die aktuelle Drehlage wird über einen optischen Sensor erkannt. Nach einem kurzen Messlauf ermittelt die Steuerung die Unwucht, indem sie die Messwerte auf die spätere Betriebsnenndrehzahl und die in der Wellenmitte liegende Ausgleichsebene umrechnet. Der Wert der Unwuchtmasse sowie die Drehlage der vorzusehenden Ausgleichsmasse werden am Display angezeigt. Nach dem Messlauf wird die Drehlage für die Ausgleichsbohrungen manuell markiert; die Welle wird entnommen. Die Ausgleichsbohrungen werden auf einer Radialbohrmaschine eingebracht, wobei hier die Werkstückspannung in Doppelprismen erfolgt. Die Auswuchtbohrungen werden so angebracht, dass der geforderte Wuchtzustand erreicht wird. Zum Auswuchten werden neben der Position und der Anzahl der Bohrungen auch die Bohrungstiefen variiert. Nur der Durchmesser der Bohrungen, mit dem Wert von $d=5\text{ mm}$, wird nicht verändert.

Toleranzberechnung nach ISO 9140	
Gütestufe:	G 16
Rotormasse:	13,00 kg
Betriebsdrehzahl:	1.800 1/min
Gewichtsverteilung:	1 zu 1
Statische Toleranz:	
Ebene 1	550,00 gmm
Ebene 2	550,00 gmm
Statisch:	1.100,00 gmm
Moment:	550,00 gmm
Messnenndrehzahl:	600 - 602 1/min
Wuchtbohrungs- Φ :	5mm

Tabelle 19: Benötigte Mindestwerte der Unwucht und der Momentenunwucht zur Erreichung einer geforderten Wuchtgüte von G 16 bei einer vorgegebenen Betriebsdrehzahl und einem Gewichtsverteilungsverhältnis 1:1 zwischen den Ebenen 1 und 2

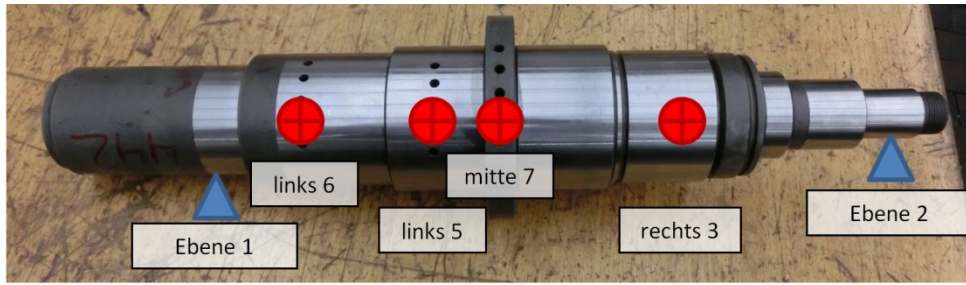


Bild 137: Blaue Dreiecke: Ebene 1 und Ebene 2 (=Auflagerstellen mit Kraftmesssensoren) zur Bestimmung der Unwucht; rote Zielkreise: definierte Bereiche zum Anbringen von Auswuchtbohrungen



Bild 138 : Auswuchteinrichtung von der Fa Hoffmann zur Unwuchtmessung von Wellen

Zum Erreichen der geforderten Massenausgleichs werden bei den Wellen die in der Tabelle 20 angegebene Bohrungen (mögliche Bohrungspositionen: siehe Bild 137, rote Zielkreise) eingebracht. Dabei fällt auf, dass auf der rechten Getriebewellenseite (Position: rechts 3) nur bei einer einzigen Welle (Nr. 319) eine Auswuchtbohrung angebracht werden muss. Bei den anderen Wellen wird das Auswuchten vorwiegend über die axialen Positionen 6 und 7, teilweise auch noch zusätzlich über die Position 5 durchgeführt.

Anzahl, Tiefe & Position der angebrachten Ausgleichbohrungen (Bohrungsdurchmesser d= 5mm)																		
Teile Nr.	Ausgleich mitte 7		Ausgleich links 5		Ausgleich links 6		Ausgleich rechts 3		Teile Nr.	Ausgleich mitte 7		Ausgleich links 5		Ausgleich links 6		Ausgleich rechts 3		
	Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe		Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe	Anzahl	Tiefe	
	Stück	mm	Stück	mm	Stück	mm	Stück	mm		Stück	mm	Stück	mm	Stück	mm	Stück	mm	
318	5	15	-	-	5	12	-	-	357	1	10	-	-	-	-	-	-	
307	5	10	-	-	5	12	-	-	358	5	15	3	12	5	12	-	-	
310	3	10	-	-	-	-	-	-	383	5	15	-	-	3	10	-	-	
311	5	15	5	12	5	12	-	-	384	1	10	-	-	-	-	-	-	
319	5	10	-	-	1	10	1	10	386	angebohrt!							-	-
324	1	10	-	-	-	-	-	-	387	5	10	-	-	-	-	-	-	
327	5	15	-	-	5	12	-	-	424	1	15	-	-	-	-	-	-	
331	-	-	-	-	1	10	-	-	425	5	15	-	-	-	-	-	-	
337	1	5	-	-	-	-	-	-	426	1	10	-	-	-	-	-	-	
338	1	10	-	-	-	-	-	-	427	1	10	-	-	-	-	-	-	
341	5	12	-	-	-	-	-	-	435	5	15	3	10	5	12	-	-	
342	-	-	-	-	3	10	-	-	436	5	15	-	-	5	12	-	-	
344	5	10	-	-	3	15	-	-	441	5	15	5	15	5	12	-	-	
349	angebohrt!							-	-	442	5	15	5	15	5	12	-	-
354	1	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 20: Anzahl und Tiefe der Auswuchtbohrungen an den Positionen 3, 5, 6, 7

Bei allen Wellen, bis auf die Nummer 442, wird nach dem Auswuchten die erforderliche Wuchtgüte von G16 eingehalten. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Wuchtvorgänge ist im Anhang 21 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass die Wellen nach dem Richten eine gemittelte Wuchtgüte von G 20,3 aufweisen. Dort sind jene Wellen mit einem farbigen Rahmen markiert, welche mit dem gleichen Temperaturverlauf geschmiedet worden sind. Dabei fällt auf, dass in den grün, blau und braun markierten Bereichen jeweils die Hälfte der Wellen bereits vor dem Wuchten die erforderliche Wuchtgüte aufweisen. Nur im rot markierten Bereich überschreiten alle Wellen im gerichteten Urzustand die geforderte Wuchtgüte. Nach dem Auswuchten aller Getriebewellen wird die gemittelte Wuchtgüte von G 11,9 erreicht.

Die Welle 349 weist bereits vor dem Auswuchten mit einem Gütewert von $G = 4,7 \text{ mm/s}$ die beste Ausgangssituation auf. Ein Auswuchten dieser Welle ist eigentlich nicht mehr erforderlich. Beim Versuch, ihre Massenverteilung zu verbessern, kommt es entgegen den Erwartungen zur Verschlechterung (auf $G = 5,7 \text{ mm/s}$) ihres Wuchtzustands. In der Tabelle im Anhang 21, Spalte „Urunwucht“, ist ersichtlich, dass die Urunwucht in der Wellenebene 1 einen stets größeren Wert aufweist als in der Ebene 2. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Welle in der Ebene 1 mehr Material aufweist als in der Ebene 2. Im Durchschnitt muss in der Ebene 1 eine Unwucht von $U = 291,6 \text{ gmm}$ (-32,2% von der gemittelten Urunwucht), in der Ebene 2 $U = 182,8 \text{ gmm}$ (-38,1% von der gemittelten Urunwucht) entfernt werden. Dabei verringert sich die gesamte, gemittelte statische Unwucht um $503,9 \text{ gmm}$ (-37,6% von der gemittelten Urunwucht) und das Unwuchtmoment um durchschnittlich $36,9 \text{ gmm}$ (-10,6% von der gemittelten Momentenunwucht).

Bei den Wellen im rot umrandeten Bereich (Tabelle 21) ist erkennbar, dass bei diesen Wellen die gemittelte Gütestufe im Urzustand schlechter ist als der gemittelte Wert von allen Wellen (siehe Anhang 21). Die direkt nach dem Schmiedeprozess im abgekühlten Zustand durchgeführte Rundlaufmessung hat gezeigt, dass deren gemittelter Rundlauf schlechter ist als der gemittelte Rundlauf von allen Wellen. Die berechneten gemittelten Maximalausschläge von allen ausgewuchteten Wellen (siehe Anhang 21) an den Messstellen RL1, RL2, RL3 ergeben Werte von $\bar{x}_{RL1} = 0,43 \text{ mm}$, $\bar{x}_{RL2} = 0,87 \text{ mm}$ und $\bar{x}_{RL3} = 0,50 \text{ mm}$. Diese weisen nach dem erfolgten Richtprozess eine gemittelte Wuchtgüte $\bar{x}_{G_{ges}} = 20,3 \text{ mm/s}$ auf. Werden die gemittelten Rundlaufausschläge nur für die in der Tabelle im Anhang 21 rot eingerahmten Wellen berechnet, so liegen die Rundlaufwerte in den Wellenbereichen RL1 mit $\bar{x}_{RL1} = 0,2 \text{ mm}$ und RL3 mit $\bar{x}_{RL3} = 0,31 \text{ mm}$ auf einem niedrigeren Niveau. Im Bereich RL2 liegen sie mit $\bar{x}_{RL2} = 0,81 \text{ mm}$ auf einem ähnlichen Niveau (Anhang 21). Trotzdem weisen diese Wellen bereits im Urzustand eine schlechte Gütestufe auf. Diese haben nach dem erfolgten Richtvorgang eine gemittelten Gütestufe von

$\bar{x}_G = 38,1 \text{ mm/s}$. Dabei schwanken die Werte der Wuchtgüte zwischen dem kleinsten Wert von $G_{min} = 31,9 \text{ mm/s}$, und dem größten Wert mit $G_{max} = 55,1 \text{ mm/s}$. Bei allen diesen Wellen wird nach dem Richten die zulässige Gütestufe G16 erheblich überschritten. Werden die Rundlaufwerte dieser Wellen mit den Wellen im grün umrahmten Bereich verglichen, so zeigt sich, dass die Wellen im grün markierten Bereich (Anhang 21 und Tabelle 21) im Wellenbereich RL1 ($\bar{x}_{RL1} = 0,33 \text{ mm}$) und RL3 ($\bar{x}_{RL3} = 0,54 \text{ mm}$) auf einem höheren, im Bereich RL2 ($\bar{x}_{RL2} = 0,75 \text{ mm}$) auf einem ähnlichen Niveau liegen. Trotz der ermittelten, höheren Werte bei der Rundlaufüberprüfung weisen diese Wellen vor dem Wuchten mit einer mittleren Gütestufe von $\bar{G} = 18,9 \text{ mm/s}$ eine bessere Urunwucht auf. Des Weiteren unterschreiten 50% dieser Wellen bereits vor dem Wuchten die geforderte Gütestufe (siehe Tabelle 21). Daraus folgt, dass bei niedrigen Werten bei der Rundlaufprüfung nicht von niedrigen Werten bei der Wuchtgüte ausgegangen werden kann.

Teile Nr.	Rundlauf			Urunwucht				
	RL1	RL2	RL3	Güte	Ebene 1	Ebene2	Statisch	Moment
	mm	mm	mm	mm/s	gmm	gmm	gmm	gmm
318	0,4	0,6	0,4	G 24,8	856,4	648,1	1504,4	104,9
307	0,4	0,5	0,5	G 31,0	1070,6	449,6	1515,2	316,6
310	0,2	0,7	0,5	G 14,7	507,6	233,2	647,1	226,6
311	0,2	1	0,6	G 33,7	1162,5	663,3	1803,9	286,8
319	0,3	0,6	0,2	G 19,3	665,4	413,2	1035,1	197,3
324	0,1	0,6	0,7	G 11,0	381,0	255,8	550,1	172,2
327	0,4	1	0,9	G 30,6	1054,7	568,1	1619,1	249,4
331	0,5	0,9	0,6	G 11,5	396,1	203,3	595,7	102,0
337	0,4	0,8	0,7	G 8,0	277,1	70,5	313,9	127,5
338	0,3	0,7	0,7	G 10,1	348,9	166,5	445,7	158,3
341	0,4	0,7	0,4	G 17,4	600,5	105,5	646,5	285,2
342	0,3	0,9	0,3	G 15,0	516,8	214,7	710,7	174,0
Mittelwert	0,33	0,75	0,54	18,9	653,1	332,7	948,9	200,1
435	0,25	1,3	0,4	G 31,9	1101,3	665,4	1766,6	218,3
436	0,25	0,6	0,3	G 29,6	1022,1	472,1	1481,5	291,5
441	0,15	0,9	0,25	G 35,8	1235,9	667,9	1899,2	291,7
442	0,15	0,45	0,3	G 55,1	1900,7	990,5	2887,9	460,3
Mittelwert	0,20	0,81	0,31	G 38,1	1315,0	699,0	2008,8	315,5

Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse der Rundlaufmessung und des Urunwuchtzustandes der Wellen 307, 310, 311, 318, 319, 324, 327, 331, 337, 338, 341, 341 im Vergleich mit den Wellen 435, 436, 441, 442

Im weiterer Folge wird überprüft, ob nach dem Radialschmieden zwischen der Außen- und Innenkontur ein koaxialer Versatz vorliegt. Dieser würde zu einer Verschlechterung der Unwucht nach der Hartbearbeitung führen, da das Setzen der Zentrierbohrungen nach Rundlaufmessung der Außenkontur erfolgte. Wird die Getriebewelle, die eine Masse $m=13 \text{ kg}$ aufweist, und bei einer maximalen Betriebsdrehzahl $n=1800 \text{ U/min}$ eine Wuchtgüte von maximal G 16 erreichen darf, betrachtet, so wird mit der Beziehung (20) die maximal zulässige Exzentrizität ermittelt.

$$\varepsilon_{zul} = \frac{G}{\omega} \quad [mm] \tag{20}$$

Die Tabelle 22 zeigt, dass zum Erreichen der Gütestufe G16 die maximal zulässige Exzentrizität von 0,085 mm nicht überschritten werden darf. Dieser Wert stellt hohe Anforderungen an den gesamten Fertigungsablauf.

	Schmiederohteil	Getriebewelle
Masse m =	16,65 kg	13 kg
Betriebsdrehzahl n =	1800 U/min	1800 U/min
Gütestufe G =	16 mm/s	16 mm/s
zulässige Exzentrizität ϵ_{zul} =	0,0849 mm	0,0849 mm
zulässige Unwucht U_{zul} =	1,4 kgmm	1,1 kgmm

Tabelle 22: Berechnung der zulässigen Exzentrizität ϵ_{zul} und der zulässigen Unwucht U_{zul} für das Schmiederohteil und die fertig bearbeitete Getriebewelle

3.18.2. Endergebnis der Wuchtgüte der hartbearbeiteten Wellen nach dem zweiten Richten

Nach der Wärmebehandlung werden die Wellen zur Eliminierung des Härteverzugs zunächst noch einmal gerichtet, um anschließend die Fertigbearbeitung (Hartzerspannung durch Schleifen) zu durchlaufen. Da die Wellen 318 und 354, nach dem Härten, beim zweiten Richten gebrochen sind, werden diese im folgenden Vergleich nicht mehr berücksichtigt. Die nicht gebrochenen Wellen werden erneut auf Wuchtheit überprüft und die finale Unwucht festgestellt. Dabei wird eine gemittelte Gütestufe von $\bar{x}_G = 17,6 \text{ mm/s}$ erreicht. Die Unwucht in der Ebene 1 erhöhte sich durchschnittlich um +44,1%, von $\bar{x}_U = 415 \text{ gmm}$ auf $\bar{x}_U = 607,9 \text{ gmm}$. In der Ebene 2 kommt es zu einer durchschnittlichen Verbesserung von -21,2% der Unwucht (von $\bar{x}_U = 177,6 \text{ gmm}$ auf $\bar{x}_U = 138,8 \text{ gmm}$). Die gemittelte, statische Unwucht bleibt dabei annähernd gleich, mit einer Änderung von $\bar{x}_U = 533,2 \text{ gmm}$ auf $\bar{x}_U = 535 \text{ gmm}$. Dagegen erfährt die gemittelte Momentenunwucht eine starke Erhöhung, um +150%, von $\bar{x}_M = 163,7 \text{ gmm}$ auf $\bar{x}_M = 347,4 \text{ gmm}$. Die gemittelte Gütestufe verschlechtert sich dabei von $\bar{x}_G = 12,1 \text{ mm/s}$ auf $\bar{x}_G = 17,6 \text{ mm/s}$ und liegt außerhalb des geforderten Bereiches. Von allen Wellen (29 Stück), die für den Auswuchtversuch verwendet werden, haben am Ende nur 41% die geforderte Gütestufe erreicht. Bei 52% der Wellen wird die erforderliche Gütestufe nicht erreicht (Bild 139). Die restlichen 7% der Wellen sind beim zweiten Richtvorgang gebrochen, weshalb bei diesen keine erneute Überprüfung der Massenverteilung durchgeführt werden kann. Da sich nach dem Härteprozess, dem anschließenden erneuten Richten und der darauffolgenden Hartbearbeitung die Wuchtgüte bei den meisten Wellen (siehe Anhang 22) sehr stark verschlechtert hat, muss hierfür die Ursache zunächst analysiert und die Prozesskette entsprechend optimiert werden.

Verhältnis der Ausschuss-/Gutwellen

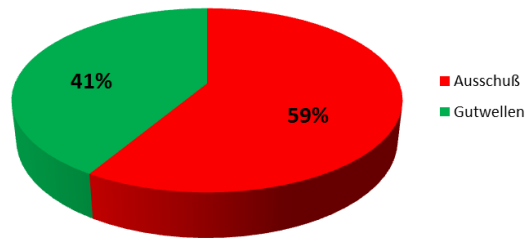


Bild 139: Endergebnis der Wuchttheit der fertigbearbeiteten Wellen (52% der Wellen sind Ausschuss durch das Verfehlen des geforderten Wuchtzustandes, 7% Ausschuss durch Wellenbruch beim Richtvorgang)

Die Änderung des Wuchtzustandes der Wellen und deren Gauß'sche Verteilung für die Unwucht in Ebene 1 und 2, der statischen Unwucht, wie auch für die Momentenunwucht ist im Bild 140 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass sich die Verteilung des Wuchtzustandes der Unwucht in der Ebene 1 von der Urunwucht über die Restunwucht nach dem Auswuchten bis hin zur finalen finalen Unwucht am stärksten ändert. Es kommt dabei sogar beim Vergleich der finalen Unwucht mit der Restunwucht zu einer Verschlechterung des Wuchtzustandes. Dieses Verhalten ist auch bei der Momentenunwucht zu sehen. Dagegen kommt es in der Ebene 2 zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Wuchtzustandes und dessen Verteilung. Wird die statische Unwucht betrachtet, so verändert sich deren Verteilung der bereits gewuchteten Wellen vor und nach der Hartbearbeitung nahezu nicht.

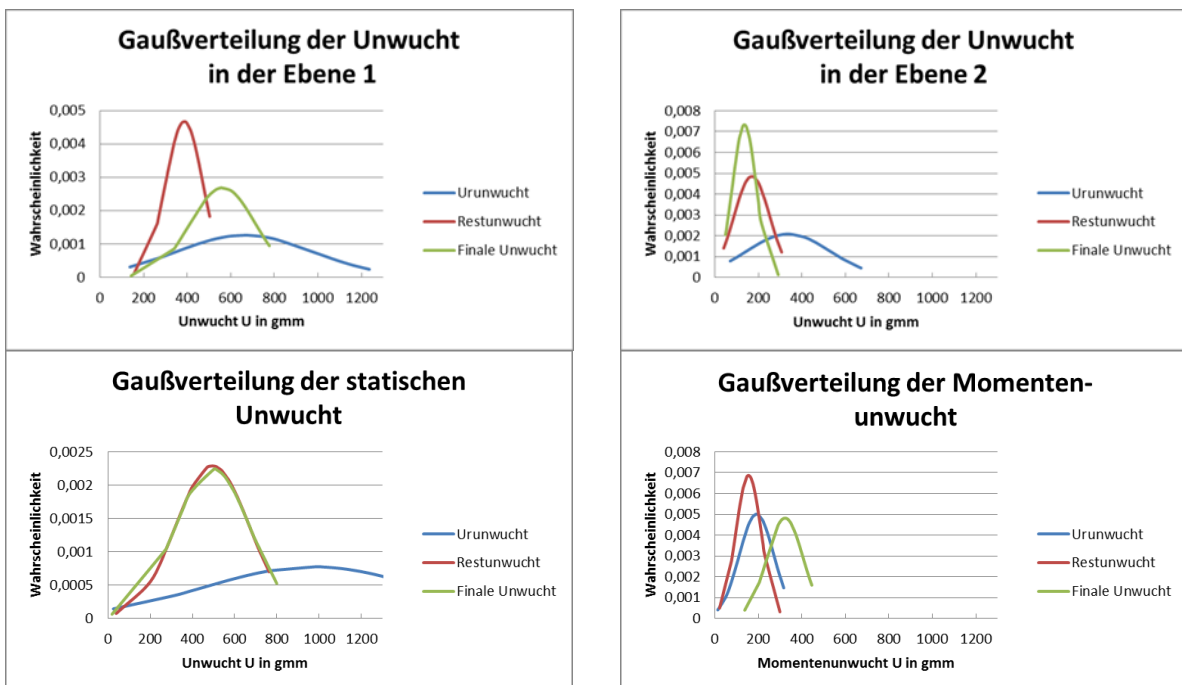


Bild 140: Veränderung der Normalverteilung der Wuchttheit (Massenverteilung) des Ausgangszustandes (Urunwucht), nach dem Auswuchten (Restunwucht) sowie nach der Hartbearbeitung (finale Unwucht)

3.19. Wanddickenmessung mittels Ultraschall

Da sich die Wuchtgüte der Getriebewellen nach der Hartbearbeitung stark verändert hat, wird zunächst die Ursache hierfür in Abweichungen der Wanddicke vermutet. Zur Verifizierung sollen an ausgewählten Versuchswellen Querschnittsprofile gemessen werden. Als Vorgabe für das Messverfahren gilt die Bedingung, dass der Wanddickenverlauf zerstörungsfrei zu bestimmen ist, um eine derartige Messung auch produktionsbegleitend unter Großserienbedingungen durchführen zu können. Die Wahl des Messverfahrens fällt auf die Wanddickenmessung mit Hilfe des Ultraschalls. Als Technologiepartner wird hierfür die Materialprüfanstalt (MPA) der Universität Stuttgart gewonnen, wo die erforderliche gerätetechnische Ausrüstung vorhanden ist. Die zu messende Getriebewelle wird im Backenfutter einer angetriebenen Spindel zur Drehmitnahme eingespannt und zur Aufnahme des Eigengewichts auf vier Rollen drehbar gelagert (Bild 141). Dort ersichtlich ist auch die Laufvariable für die Lage des zu vermessenden Wellenabschnittes (X-Position), wie auch von wo aus die Winkellagen der Messpunkte gemessen werden (Y-Position). Die für diesen Versuch definierten Positionen für die Wanddickenmessungen sind in der Schnittzeichnung der Welle (siehe Bild 142) dargestellt.

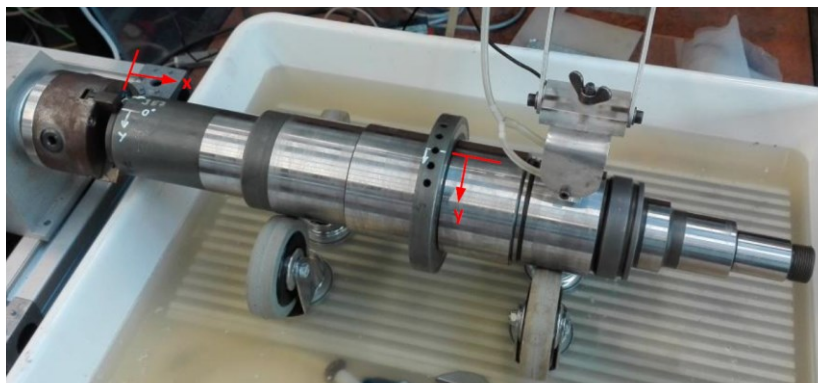


Bild 141: Messeinrichtung der MPA Universität Stuttgart zur Wanddickenmessung mit Hilfe des Ultraschalls mit eingezeichneten Achsen für die axiale x-Position der Messebene und der Winkellage y

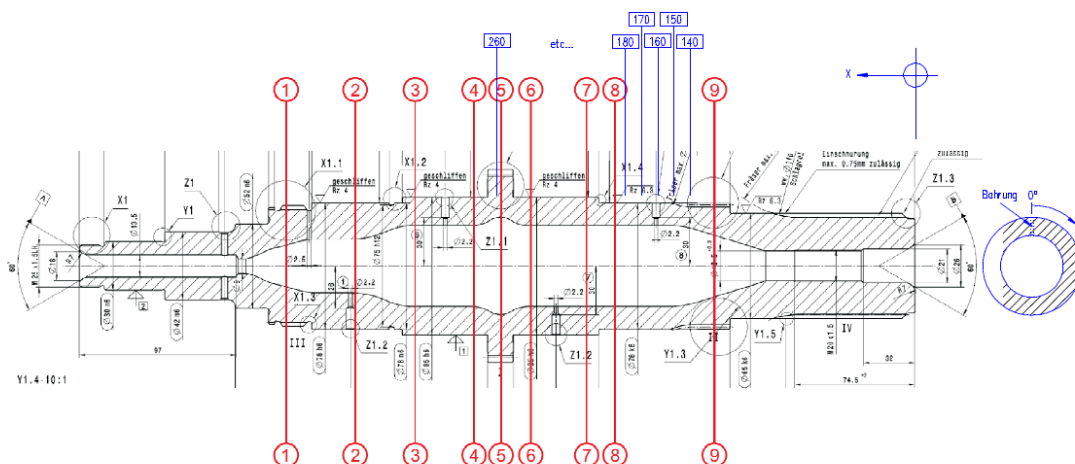


Bild 142: Ausgewählte Wellenabschnitte und Messebenen für die Wanddickenmessung

Die Wanddickenmessung mit Ultraschall erfordert stets zwei gegenüberliegende, nahezu parallele Flächen für die Reflexion des Ultraschallsignals. Ist das, wie in den Messebenen 1 und 9 (vgl. Bild 142) nicht der Fall, so sind in diesen Bereichen keine plausiblen Messwerte zu erhalten. Auch im Bereich 5 kommt die Ultraschallmessung an ihre Grenzen, da dort die Innenkontur in axialer Richtung gekrümmt ist. Aus den gefilterten Messwerten (siehe Tabelle 23) der Welle 386 wird klar, dass Wanddickenschwankungen in unterschiedlicher Ausprägung in allen Messebenen auftreten. Die nachgewiesenen Abweichungen betragen im Querschnitt 5 bis zu 1,1 mm, was den ungünstigsten Verlauf an der Welle darstellt. Dagegen wird in den Querschnitten 3 und 8 eine maximale Wanddickenänderung von 0,47 mm entlang des Umfangs festgestellt. Gemittelt über alle Messbereiche zeigt sich eine mittlere Wanddickenschwankung von 0,68 mm. Bei der Welle 428 treten noch höhere Werte auf. Hier schwankt die Wanddicke um durchschnittlich 1 mm bei einer maximalen Schwankung von 1,5 mm. Eine Ursache dieser Schwankung ist die Messunsicherheit des gewählten Messsystems. Ob über diese Messungen eine koaxiale Abweichung bestimmt werden kann, wird im Folgenden untersucht.

Welle 386					Welle 428						
Pos. Nr.	Pos. X [mm]	Wanddicke [mm]		Differenz [mm]		Pos. Nr.	Pos. X [mm]	Wanddicke [mm]		Differenz [mm]	
		max	min	max	gemittelt			max	min	max	gemittelt
8	140	14,63	14,04	0,59	0,68	8	160	14,63	13,8	0,83	1,00
8	160	14,51	13,8	0,71		8	170	14,63	13,8	0,83	
8	170	14,39	13,92	0,47		8	180	14,63	13,68	0,95	
8	180	14,27	13,8	0,47		7	200	18,1	17,1	1	
7	200	17,93	17,1	0,83		6	220	18,2	16,9	1,3	
6	220	17,93	17,22	0,71		6	230	18,4	16,9	1,5	
6	230	18,05	17,22	0,83		4	285	23,1	22,3	0,8	
5	260	31,8	30,7	1,1		3	310	23,2	22,3	0,9	
4	285	21,23	20,64	0,59		1	390	25,7	24,8	0,9	
3	310	21,23	20,76	0,47							

Tabelle 23: Ermittelte Werte aus der Ultraschallüberprüfung der Wellen 386 und 428: Maximale und minimale Wanddicke in den untersuchten Wellenquerschnitten; absolute und maximale Differenz in den einzelnen Messebenen; gemittelte Differenz über alle gemessenen Messebenen

3.19.1. Grafische Auswertung der Exzentrizität

Der Einfluss der Messunsicherheit des gewählten Messverfahrens und die Frage eines ggf. vorhandenen koaxialen Versatzes zwischen der inneren und äußeren Wellengeometrie sollen mit Hilfe von Kreis- bzw. Polardiagrammen untersucht werden. Werden die schrittweise über den Drehwinkel gemessenen Einzelmesswerte der Welle 386 in das im Bild 143 gezeigte Diagramm eingetragen, so zeigt sich eine schwankende Abweichung des Wanddickenverlaufs von der idealen Kreisform. Diese Schwankung der Messwerte sind nicht durch die Werkstückgeometrie entstanden, sondern stellen Messfehler des Messverfahrens dar. Bei Betrachtung der aufgetragenen Messwerte einer Messebene (z. B. Messebenen an den Axialpositionen 220 und 230 mm im Wellenbereich 6) lässt sich in die Kurven ein

gedachter Ausgleichskreis legen (gelber Kreis). In diesem Fall weicht der Mittelpunkt des Ausgleichskreises vom Kreismittelpunkt des Kreisdiagramms (grauer Kreis) um 0,38 mm ab.

Im Wellenbereich 8 (Kurven 140, 160, 170, 180) beträgt die gemittelte Achsabweichung 0,18 mm, im Wellenbereich 3 (Kurve 310) liegt sie bei 0,22 mm (brauner Kreis). Ein vergleichbares Ergebnis zeigt auch die Auswertung der Messerte der Welle 428 (Bild 144). Im Wellenbereich 6 der Messebenen 220 und 230 mm kommt es zu einer coaxialen Abweichung von 0,59 mm (gelber Kreis). Im Bereich 8 (Messebenen 160, 170, 180 mm) von 0,34 mm (orangefarbener Kreis) und im Bereich 3 (Kurve 310) sind es 0,36 mm (brauner Kreis). Zusammengefasst sind diese Werte in der Tabelle 24. Die dort ersichtliche, coaxiale Abweichung wird durch den coaxialen Versatz zwischen der Innen- und Außenkontur der Getriebewelle erzeugt. Somit ist nachgewiesen, dass bei den Getriebewellen ein coaxialer Versatz vorliegt, der nach der Hartbearbeitung zu einer Veränderung des Wuchtzustandes der Getriebewellen führt.

Die hieraus gewonnenen Erkenntnis ist, dass die Zentrierbohrungen am geschmiedeten Rohteil zur geometrischen Festlegung der Werkstücklängsachse nicht nach dem Verlauf der Außenkante erfolgen darf. Hierzu ist der Verlauf der Innenkontur heranzuziehen.

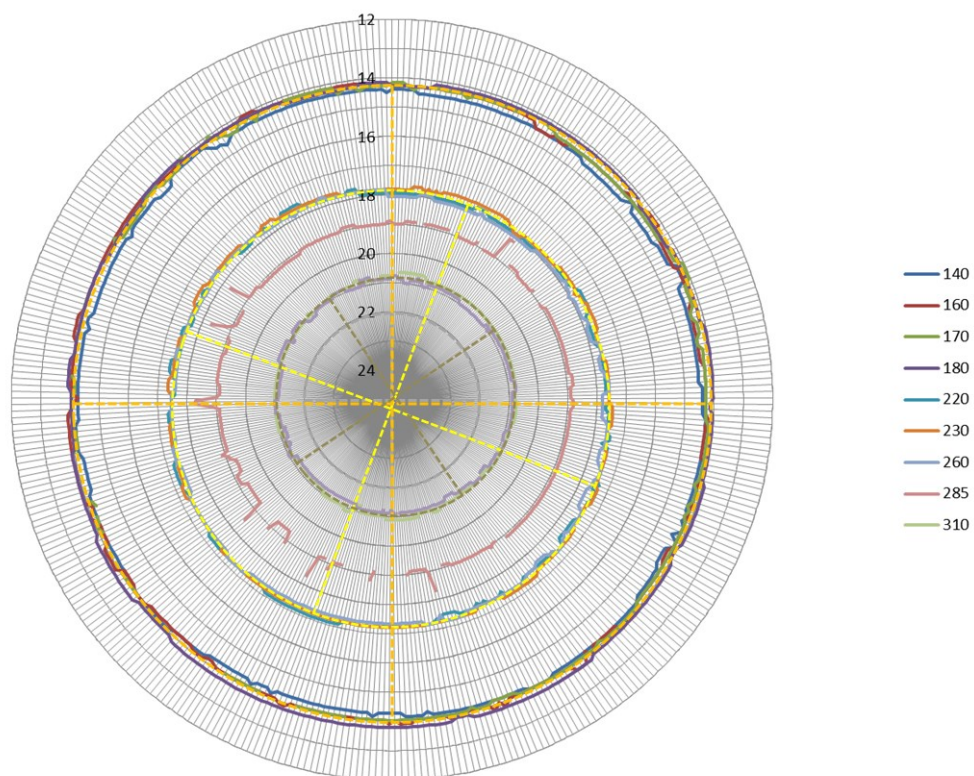


Bild 143: Darstellung der gemessenen Wanddicken und Wanddickenschwankungen der Getriebewelle 386 (nach Hartbearbeitung) in einem Kreisdiagramm

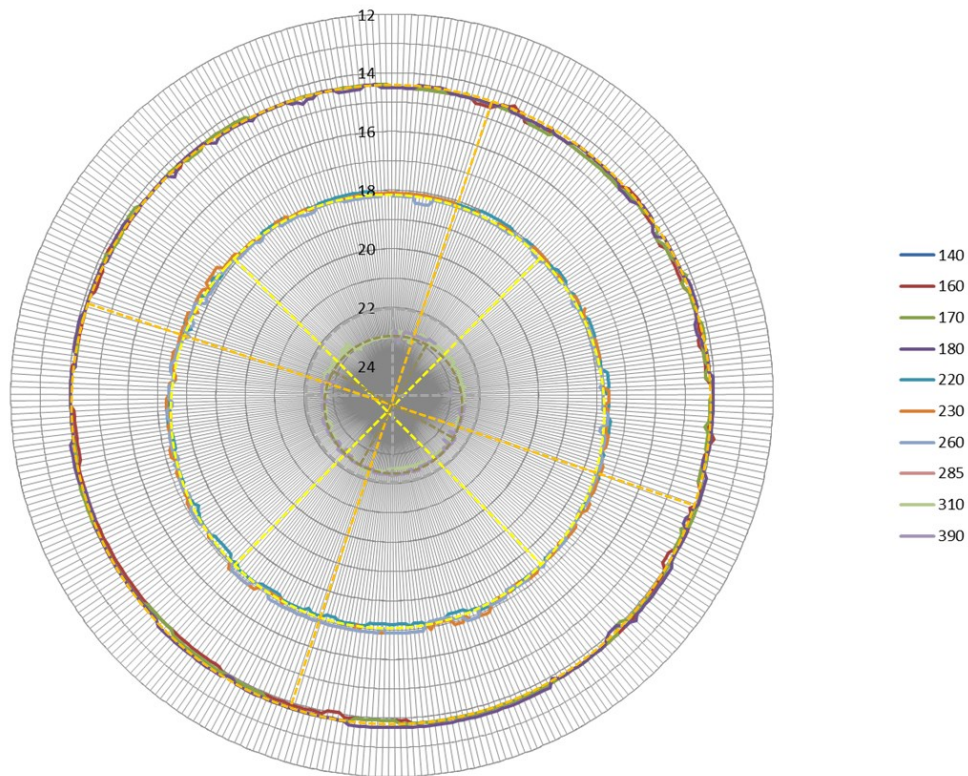


Bild 144: Darstellung der gemessenen Wanddicken und Wanddickenschwankungen der Getriebewelle 428 (nach Hartbearbeitung) in einem Kreisdiagramm

Koordinatenversatz (koaxiale Abweichung)	Einheit	Welle 386			Welle 428		
		gelb	orange	braun	gelb	orange	braun
vertikal	mm	0,37	0,17	0,10	0,56	0,34	0,34
horizontal	mm	0,10	0,05	0,20	0,17	0,00	0,10
absolut	mm	0,38	0,18	0,22	0,59	0,34	0,36

Tabelle 24: Grafisch ermittelte Werte der Koaxialitätsabweichung der Wanddickenmessung der Wellen 386 und 426 in horizontaler und vertikaler Richtung aus dem Bild 143 und Bild 144; Berechnete absolute Achsabweichungen aus den gemessenen Diagrammwerten

3.20. Biaxialshaker als alternatives Entzunderungsverfahren

Hier wird die Möglichkeit untersucht, mit dem kinematischen Prinzip eines Biaxialshakers die Zunderschicht zu entfernen. Für erste Untersuchungen wird ein Plexiglaszylinder verwendet, welcher mit Stahlkugeln befüllt ist. Den Versuchsaufbau zeigt das Bild 145. Der Plexiglaszylinder dreht sich gleichzeitig um zwei Achsen (siehe blaue Pfeile, Bild 145) und erzeugt dadurch eine Relativbewegung zwischen den Kugeln und der Glasinnenoberfläche. Der Innendurchmesser des Plexiglaszylinders beträgt 94 mm, die Höhe 100 mm. Der Befüllungsgrad mit Stahlkugeln ist 33 %. Die verwendeten Polierstahlkugeln (Güteklasse 6; Härte: 63±3 HRC) haben einen Durchmesser von 4,8 mm.

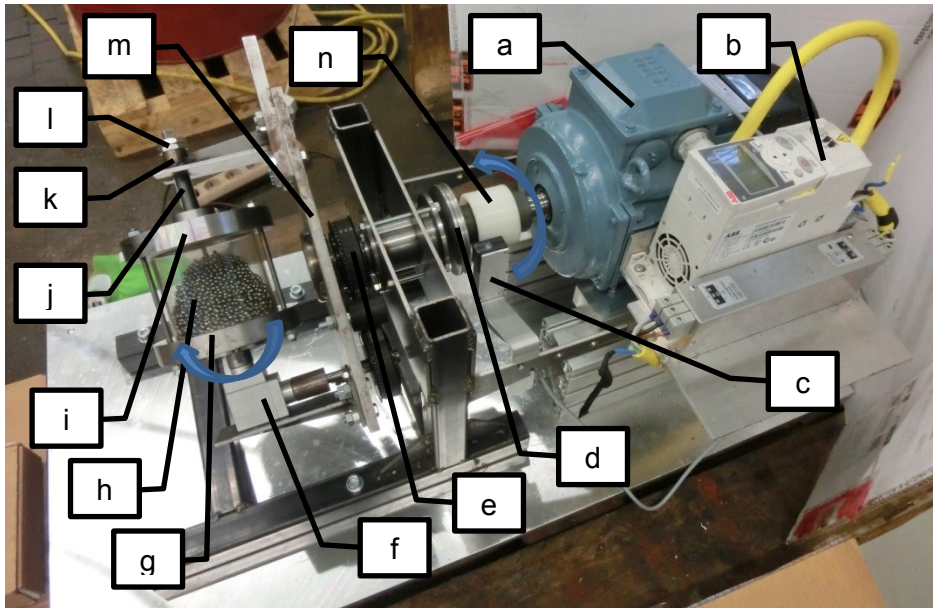


Bild 145: Aufbau des Biaxialshakerprüfstands: a) Antriebsmotor; b) Drehzahlregler mit Bedienfeld; c) optischer Drehzahlmesser; d) Scheibe mit Reflektoren; e) Riementrieb bestehend aus Zahnriemen und zwei Zahnriemenscheiben ($i=1:1$); f) 90° Winkelgetriebe ($i=1:1$); g) Bodenscheibe; h) Plexiglaszylinder mit Kugelfüllung; i) Deckscheibe j) Gewindestange mit Außenvierkant; k) Gewindehülse; l) Kontermuttern; m) Platte n) Bogenzahnkupplung zum Ausgleich von Axial und Winkelversatz

Die Versuche zeigen, dass die Kugeln ab der Grenzdrehzahl von 250 U/min durch die Fliehkraft im Bereich der Zylinderoberfläche gehalten werden. Sie werden auf die Zylinderoberfläche gedrückt (Bild 146a-c). Es kommt zu einer Relativbewegung zwischen der Zylinderoberfläche und den Kugeln in tangentialer Richtung, erkennbar an der gleichbleibenden Kugelverteilung bei der Bildfolge a-c (Bild 146a-c, 90° Verdrehung zwischen dem Bild a und c). Durch diese Relativbewegung kommt es zu einer Scheuerbewegung und damit zu einem Materialabtrag an der Zylinderoberfläche. Mit zunehmender Drehzahl sammeln sich umso mehr Kugeln im Bereich des Deckels.

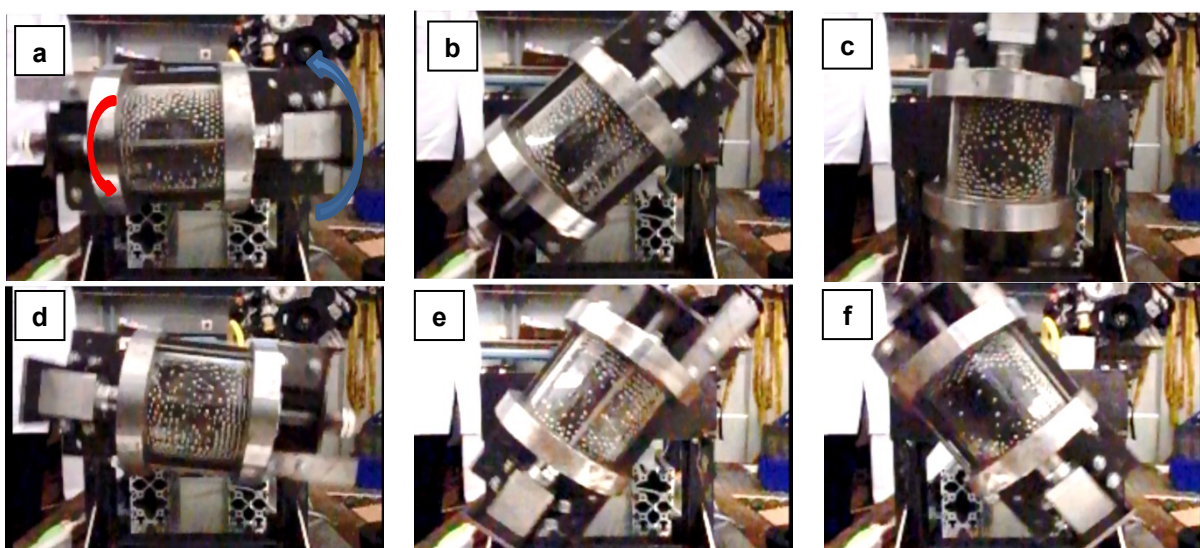


Bild 146: Biaxialshaker Prinzipversuch mit einer Drehzahl von 250 U/min mit im Bild a eingezeichneter Drehrichtung des Plexiglaszylinders (rot) und der Platte (blau)

3.20.1. Bearbeitungsversuche mit dem Biaxialshaker

Als Erprobungsteile werden hier wieder verzünderte Zahnradnaben verwendet (vgl. Abschnitt 3.4) Die Bearbeitungsversuche (siehe Bild 147) werden mit den in Tabelle 25 gezeigten Parametern durchgeführt. Dabei wird neben der Drehzahl auch die Art des Abrasivmittels variiert. Bei den ersten drei Versuchsdurchgängen D1 bis D3 wird unter Verwendung von Schleudergussgranulat bzw. Edelstahlsatelliten an den beiden Werkstücken BIAX1 und BIAX2 keine zufriedenstellende Abtragsleistung erzielt. Deshalb werden beim Durchgang D4 für beide Testobjekte optimierte Füllungen verwendet (siehe Tabelle 25: BIAX1-D4 und BIAX2-D4). Die beigemischten Stahlkugeln sollen den Druck auf die Oberfläche erhöhen und somit die Abtragsleistung verbessern. Damit wird keine zufriedenstellende Verbesserung erzielt (Vergleiche: Bild 147 BIAX1 D3→D4 und Bild 147 BIAX2 D3→D4). Auch bei Bearbeitungszeiten von mehreren Stunden (z. B. Versuch BIAX3 mit Schleifkörpern) kann bei keinem der Testobjekte die Zunderschicht komplett entfernt werden. Dieses Verfahren hat nur eine polierende und keine abtragende Wirkung. Aus den an der Oberfläche des Werkstückes vorhandenen Riefen wird die Zunderschicht nicht entfernt, da in diese Regionen keines der abrasiven Medien vordringen kann. Deshalb ist dieses Verfahren nicht für das Entzundern geeignet.

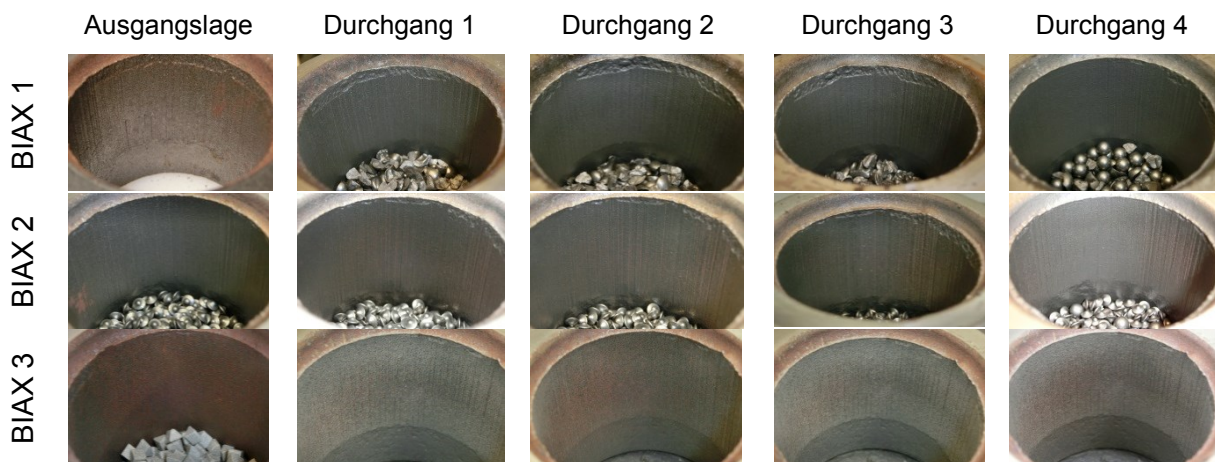


Bild 147: Bearbeitungsergebnisse mit dem Biaxialshakerprüfstand der Versuchsstücke BIAX1, BIAX2, BIAX3; die linke Spalte zeigt die jeweilige Ausgangslage

		Abrasive				Drehzahl	Bearbeitungs- dauer
		A		B			
		Art	Menge	Art	Menge		
BIA X 1	D1	Schalenhartguss GHK 4-5mm	221g	X		350 U/min	30 min
	D2					400 U/min	30 min
	D3					250 U/min	30 min
	D4	Schalenhartguss GHK 4-5mm	111g	Polierstahlkugeln D=6,35mm	113g	450 U/min	30 min
BIA X 2	D1	Edelstahl- satelliten	221g	X		250 U/min	30 min
	D2					350 U/min	30 min
	D3					200 U/min	30 min
	D4	Edelstahl- satelliten	137g	Polierstahlkugeln D=6,35mm	113g	400 U/min	30 min
BIA X 3	D1	X		Schleifkörper	113g	250 U/min	30 min
	D2					350 U/min	30 min
	D3					350 U/min	60 min
	D4					400 U/min	60 min

Tabelle 25: Bearbeitungsparameter und Abrasivstoffe für die Versuche BIA X 1 bis BIA X 3

4. Entgratversuche

Wie im Abschnitt 2.15 (Mechanische Entgratverfahren) ausgeführt sind am Markt viele erprobte mechanische Werkzeuge zum Entgraten von Querbohrungen im Bereich des Bohrungsaustrittes erhältlich. Um herauszufinden, ob ein neuartiges Entgratverfahren entwickelt werden muss oder ein etabliertes Verfahren für die Entgrataufgabe ausreicht, werden mehrere mechanische Werkzeuge (Bild 148) hinsichtlich ihrer Eignung verglichen. Hierfür werden die im Bild 148 dargestellten Entgratwerkzeuge ausgewählt. Dabei handelt es sich um die XEBEC Entgratbürste (vgl. Abschnitt 2.15.1), das GMO-Werkzeug (vgl. Abschnitt 2.15.3), dem Burr-Off (vgl. Abschnitt 2.15.4) und dem Burr-Away-Entgratwerkzeug (vgl. Abschnitt 2.15.7).

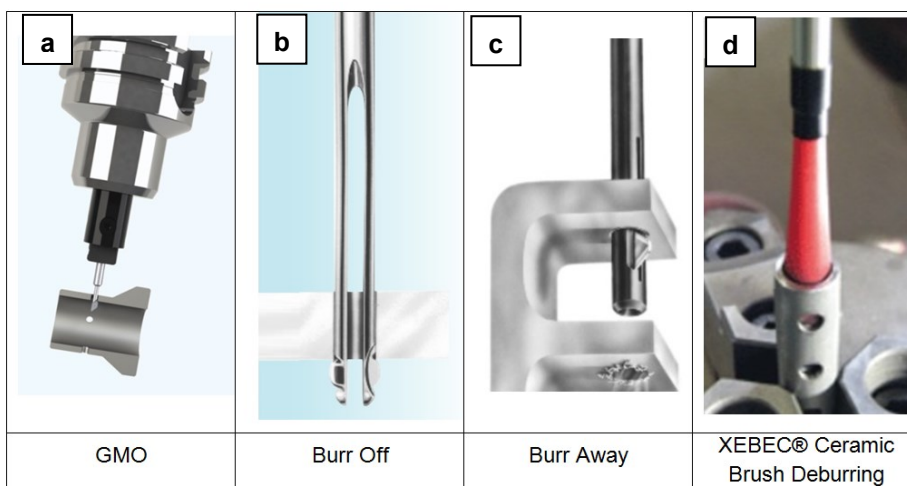


Bild 148: Ausgewählte Werkzeuge für die Entgratversuche

Als Versuchsträger für die Bohrversuche werden Rohrabschnitte aus 25MoCr4 verwendet, in die eine Vielzahl an Bohrungen eingebracht werden. Die Abmessungen der Rohrabschnitte und der Bohrungsgeometrie sind im Bild 149a dargestellt. Das Aussehen der zu entfernen- den Grate mit Bohrungskapen zeigt das Bild 149b. Mit den in der Tabelle 26 gezeigten

Werten für die Spindeldrehzahl und Schnittgeschwindigkeit werden die in Bild 149b dargestellten Bohrungsgrate mit Kappen erzeugt. Im Bereich des inneren Bohrungsaustrittes haben die Bohrungen einen Durchmesser von 2,2 mm. Diese dienen als Ausgangspunkt für die im Folgenden beschriebenen Entgratungsversuche.

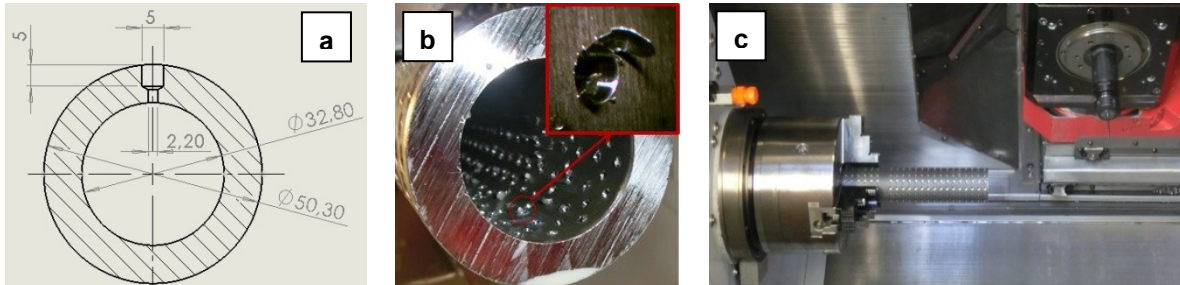


Bild 149: Links: Abmessungen des Versuchsträgers mit Bohrungsgeometrie für die Entgratungsversuche; Mitte: Aussehen des zu entfernenden Grates mit einer Bohrungskappe; rechts: Versuchsanordnung (Versuchsträger in die „EMCO Hyperturn 665MC plus“ eingespannt)

Spindeldrehzahl [s in U/min]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
7000	420

Tabelle 26: Gewählte Parameter (Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit) zur Herstellung des Bohrungsgrats und der Bohrungskappen

4.1. GMO-Entgrater

Erreicht das Werkzeug seine vorgegebene Startposition, so ist es zentrisch zur Bohrungsachse ausgerichtet (siehe Bild 150). In der Folge positioniert es zunächst bis kurz vor die Bohrungsöffnung mit Eilganggeschwindigkeit ohne Spindeldrehzahl. Wenige Millimeter vor dem Bohrungseintritt wird die Vorschubgeschwindigkeit auf 500 mm/min verringert und die Bohrung vollständig durchfahren. Anschließend werden der Vorschub gestoppt und die Spindeldrehzahl eingeschaltet. Sobald die Spindeldrehzahl den konstanten Wert von 500 U/min erreicht hat, bewegt sich das Werkzeug mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm/min in die Gegenrichtung. Beim Eintreten des Werkzeuges in die Bohrung kommt es zum Kontakt der Schneide mit der Bohrungsaustrittskante. Dabei wird der Grat an der Bohrungsinnenkante abgetragen und gleichzeitig eine Fase ausgebildet. Die Stärke der Entgratung und die Größe der entstehenden Fase ist mit einer Feder, die sich im Inneren des Werkzeuges befindet, vor dem Versuchsbeginn eingestellt worden. Erst wenn das Werkzeug wieder komplett aus der Bohrung herausgefahren ist, werden die Spindeldrehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit ausgeschaltet. Für den vorgestellten Versuch wird die im GMO Set enthaltene Feder der Stärke „mittel“ verwendet. Mit diesem Werkzeug wird mit den in der Tabelle 27 gezeigten Parametern das Entgratungsergebnis mit einer Fasenbildung (siehe Bild 151) erzielt.

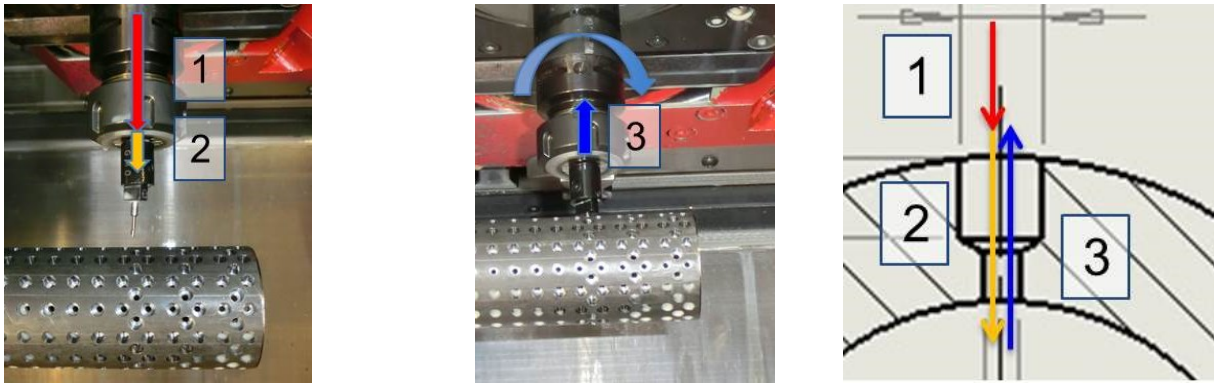


Bild 150: Arbeitsablauf mit dem GMO-Entgrater: links: Einfahren mit Eilgang (1) bis kurz vor dem Bohrungsbeginn, dann Durchfahren der Bohrung mit langsamerer Vorschubgeschwindigkeit (2) bis das Werkzeug komplett aus der Bohrung ausgetreten ist; Mitte: Bearbeitungsprozess (3); rechts: schematische Darstellung der drei Bewegungsschritte beim Versuchsobjekt

Nr. [-]	Spindeldrehzahl [s in U / min]	Vorschubgeschwindigkeit [v in mm/min]
1 ↓	0	Eilgang
2 ↓	0	500
3 ↑	500	500

Tabelle 27: Vorschubrichtung (siehe Pfeile), Spindeldrehzahl und Schnittgeschwindigkeit für das Entgraten

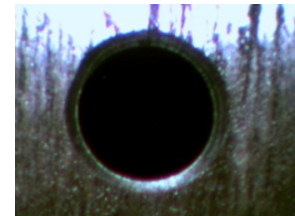


Bild 151: Entgratungsergebnis der 2,2 mm Bohrung mit dem GMO-Entgrater

4.2. Burr Off

Mit dem Burr-Off-Werkzeug ist es, je nach Aufgabenstellung, möglich, den Grat nur am Eintritt, nur am Austritt oder an beiden Seiten der Querbohrung zu entfernen. Hier ist die Aufgabenstellung das Entfernen des Grates lediglich im Bereich des Bohrungsaustritts. Hierzu wird das Entgratwerkzeug (Burr Off BOFBB040 des Herstellers Cogsdill, Camden) mit einer Spindeldrehzahl von 1200 U/min und der Vorschubgeschwindigkeit von 60 mm/min in die Bohrung eingeführt (Bild 152). Die Vorschubrichtung wird geändert, wenn die Schneide komplett den Bereich des Bohrungsaustritts passiert hat. Durch die Rückwärtsbewegung kommt es nun zum Kontakt der Schneide mit der Bohrungskante; der Grat wird abgetrennt. Beim Entgraten wird gleichzeitig eine kleine Fase erzeugt. Bei diesem Werkzeug ist die Entgratstärke nicht einstellbar. Das Bild 153 zeigt das Ergebnis, das mit den in der Tabelle 28 gezeigten Parametern erreicht wird. Nach einem Durchgang ist der Grat problemlos entfernt. Jedoch ist aufgrund der nicht einstellbaren Entgratungsintensität die entstehende Fase verhältnismäßig groß ausgebildet.

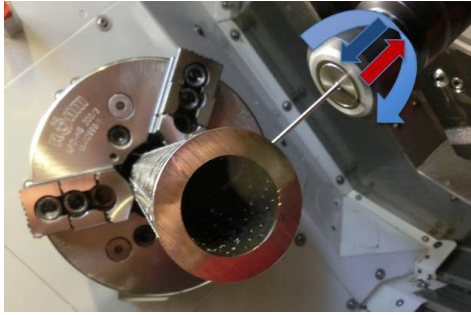


Bild 152: Versuchsablauf mit dem Burr-Off-Werkzeug

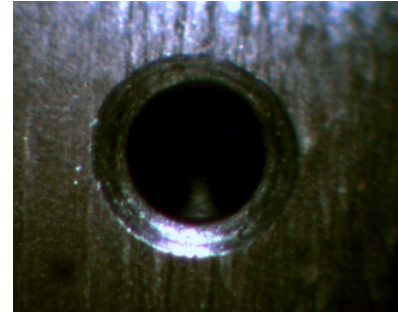


Bild 153: Entgratungsergebnis des Versuchs mit dem Burr-Off-Werkzeug

Nr.	Spindel- drehzahl [s in U/min]	Vorschub- geschwindigkeit [v in mm/min]	Durch- gänge	Vorschub- richtung
1	1200	60	1	↓
2	1200	60		↑

Tabelle 28: Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Durchgänge, Vorschubrichtung für Burr Off

4.3. Burr Away

Für die Untersuchung wird ein standardmäßig erhältliches Werkzeug für 2,2 mm Bohrungen (Typ MA 2,0 mm des Herstellers Cogsdill, Camden) herangezogen, welches beidseitig eine Klinge aufweist. Damit wird die Bohrung im Ein- und Austrittsbereich in einem Arbeitsgang entgratet. Beim Versuch fährt das Burr-Away-Werkzeug mit den in Tabelle 29 angegebenen Parametern (Bild 154a) in die Bohrung hinein. Beim Kontakt mit der Bohrungseintrittskante wird diese entgratet. Dann gleitet das Werkzeug durch die Bohrung hindurch. Erst wenn die Klinge im inneren Hohlraum vollständig aus der Bohrung ausgetreten ist, wird die Vorschubrichtung geändert, die Spindeldrehzahl und Spindeldrehrichtung bleiben unverändert (Bild 154b). Bei der Rückwärtsbewegung mit den in Tabelle 29 unter Punkt 2 angegebenen Parametern erfolgt die Entgratung der Bohrungsaustrittskante (Innengrat). Dabei entsteht eine kleine, gratfreie Fase (siehe Bild 155). Die Entgratungsstärke und die dabei entstehende Fase werden über die Federvorspannung durch das Verdrehen einer Wurmschraube eingestellt.

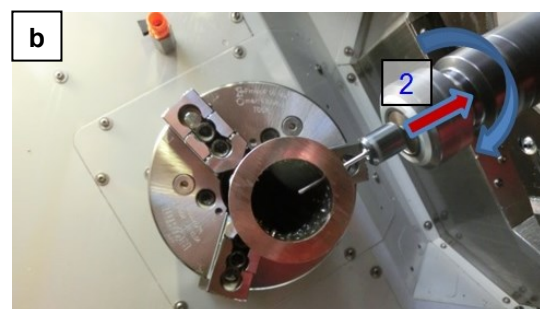
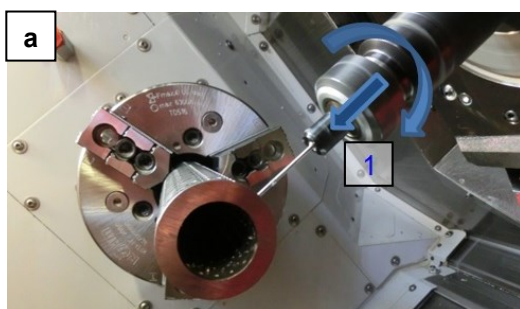


Bild 154: Arbeitsablauf mit dem Burr-Away-Werkzeug: Einfahren in die Bohrung mit konstanter Spindeldrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit (Bild links); Umkehrung der Vorschubrichtung und Ausfahren aus der Bohrung (Bild rechts)

Nr.	Spindel- drehzahl [s in U/min]	Vorschub- geschwindigkeit [v in mm/min]	Durch- gänge	Vorschub- richtung
1	1200	60	1	↓
2	1200	60		↑

Tabelle 29: Versuchsparameter beim Versuch mit dem Burr-Away-Entgratwerkzeug

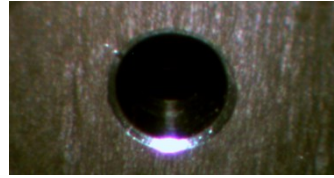


Bild 155: Entgratungsergebnis mit dem Burr-Away-Entgratwerkzeug

4.4. XEBEC Entgratbürste

Mit der XEBEC-Entgratbürste (XEBEC A31-CB40M des Herstellers Xebec, Tokyo) wird zunächst, wie in Bild 156a dargestellt, das Werkzeug ohne Spindeldrehzahl in die Bohrung zentrisch bis zur Startposition eingeführt. Nach dem Einschalten der Spindelbewegung und dem Erreichen der vorgegebenen Drehzahl wird das Werkzeug mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in Richtung inneren Bohrungsausritt bewegt. Diese Bewegung wird kurz vor dem Austreten der Borsten aus der Bohrung gestoppt und das Werkzeug wird zurückgezogen (Versuche 1 bis 4). Zusätzlich wird in einem weiteren Versuch vor dem Werkzeugrückzug das Werkzeug mehrmals hin und herbewegt (Bild 156b). Der Versuch wird mit den in der Tabelle 30 dargestellten Parametern durchgeführt. Dabei werden nicht nur die Spindeldrehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit variiert: Das Testobjekt wird mehrmals hintereinander mit verschiedenen Vorschubzyklen bearbeitet.

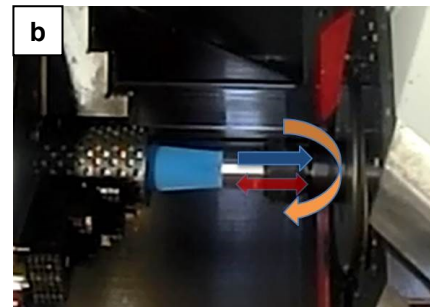
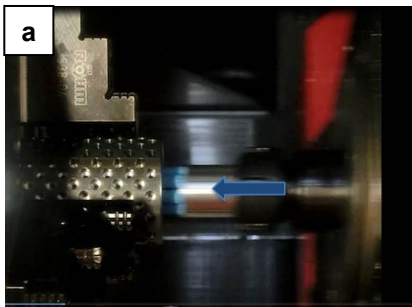


Bild 156: Arbeitsablauf Entgratungsversuch: Einfahren in die Bohrung mit stillstehendem Werkzeug (Bild links); Bearbeitungsvorgang mit der XEBEC-Entgratbürste (Bild rechts)

Die Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse der Entgratungsversuche. Diese werden mit den in Tabelle 30 angegebenen Werten für Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anzahl der Durchgänge und den damit verbundenen Bearbeitungsrichtungen erreicht. Die letzte Spalte zeigt die Bearbeitungsrichtungen, mit denen die Versuche durchgeführt werden. Sind dort mehrere Pfeile angegeben, so wurden hintereinander, mit den durch die Pfeile angegebenen Richtungen, Bearbeitungen durchgeführt. Die Drehrichtung der Spindel wird dabei nicht geändert. Trotz der Variation der vorhin erwähnten Parameter kann mit diesem Werkzeug keine der Bohrungen vollständig entgratet werden. Entweder bleibt ein Restgrat stehen (Tabelle 31a), oder ein Gratrest wird in die Bohrung hineingeklappt (Tabelle 31b). Beides tritt

auch gleichzeitig auf (Tabelle 31c). Deshalb ist dieses Werkzeug für die spezifische Entgrataufgabe ungeeignet.

Durchlauf Nr.	Spindel-drehzahl [s in U/min]	Vorschub-geschwindigkeit [v in mm/min]	Durch-gänge	Bearbeitungs-Richtung
1	4000	2400	1	↑
2	4000	1800	1	↑
3	4000	1200	1	↑
4	4000	600	1	↑
5	6000	600	3	↑ ↓ ↑
6	6000	600	4	↑ ↓ ↑ ↓

Tabelle 30: Parameterwahl der Entgratungsversuche mit der XEBEC-Entgratbürste: Spindel-drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anzahl der Durchgänge, Bearbeitungsrichtung

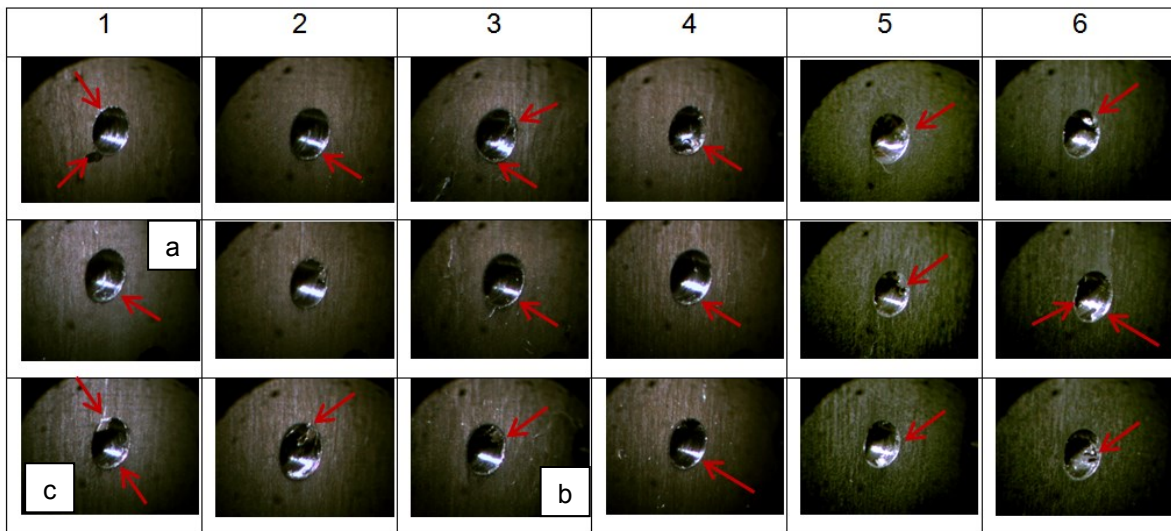


Tabelle 31: Ergebnisse der Entgratungsversuche mit XEBEC Entgratbürste: Nach jedem Versuch ist ein Gratrest vorhanden (Es werden stets drei Bohrungen mit einer Parameterkombination entgratet)

4.5. Vergleich der Ergebnisse der ausgewählten, mechanischen Entgratwerkzeuge

Das Bild 157 zeigt eine Gegenüberstellung der besten Entgratungsergebnisse der untersuchten, mechanischen Entgratwerkzeuge. Diese Ergebnisse werden mit den in der Tabelle 32 angegebenen Parametern erreicht. Die Werte beziehen sich auf die Zeitspanne, in der die Entgratung an der Kante stattfindet. Das beste Ergebnis wird mit dem GMO-Entgrater erreicht. Dessen Schneide ist austauschbar, die Entgratstärke ist gut durch den Austausch von Federn mit unterschiedlichen Federsteifigkeitswerten einstellbar und die Zykluszeit ist mit 13 s am kürzesten. Das zweitbeste Entgratwerkzeug ist der Burr-Away-Entgrater. Auch hier wird die Entgratung mit einer kleinen, durchaus gewünschten Fase erreicht. Die Entgratstärke kann hier sehr gut über die einstellbare Federvorspannung eingestellt werden. Jedoch ist die damit realisierbare Zykluszeit, bei einer Dauer von 60 s, sehr lang. Mit dem

Burr-Off-Werkzeug kann der Grat zwar problemlos entfernt werden, jedoch ist die dabei entstehende Fase sehr groß und nicht einstellbar. Auch die Zykluszeit ist, wieder mit 60 s, sehr lang, wodurch das Werkzeug als eher mittelmäßig eingestuft wird. Die Xebec-Entgratbürste fällt bei dem Test durch da damit, nach vier Bearbeitungsdurchgängen, keine einzige Bohrung vollständig entgratet werden kann. Es bleiben Gratreste stehen oder Teile des Grates werden in die Bohrung hineingebogen. (Versuchsbewertung: siehe Tabelle 33)

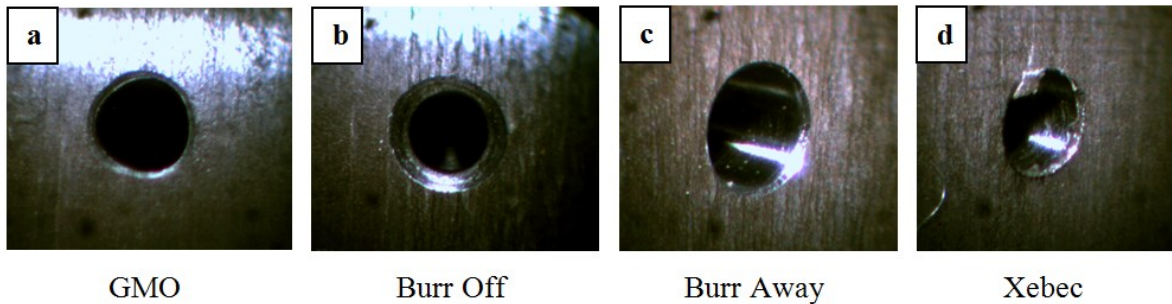


Bild 157: Gegenüberstellung der Entgratungsergebnisse mit den Entgratwerkzeugen

Bild	Werkzeug	Spindeldrehzahl [s in U/min]	Vorschub- geschwindigkeit [v in mm/min]	Zykluszeit [t in s]
a	GMO GMOSET1	500	100	13s
b	Burr-Off BB4	1200	60	60s
c	Burraway 2.0mm	1200	60	60s
d	XEBEC A31-CB40M	6000	600	Durchlauf 1-4

Tabelle 32: Parameter der Versuchsergebnisse zum Zeitpunkt des Entgratungsvorganges (Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit) und erreichte Zykluszeit für die Entgratung einer Bohrung

Werkzeug	Entgratungs- ergebnis	Werkzeug- wiederver- wendbarkeit	Zykluszeit [t in s]
GMO GMOSET1	++	+*	+
Burr-Off BB4	++	+*	o
Burr-Away 2.0mm	+	o*2	o
XEBEC A31-CB40M	-	-	-
* Schneidenteil auswechselbar			
*2 Schneiden bis zu 4x nachschleifbar			

Tabelle 33: Bewertung der vier Entgratwerkzeuge anhand des Entgratungsergebnisses, der Werkzeugwiederverwendbarkeit und der Zykluszeit (Notenskala: ++ sehr gut, + gut, o befriedigend, - nicht genügend)

4.6. Thermische Entgratungsversuche

Bei Getriebewellen müssen nicht nur die Querbohrungen entgratet werden, sondern gleichzeitig auch die Steckverzahnungen, falls diese mit einem spanenden Bearbeitungsverfahren hergestellt sind. Von Vorteil ist, wenn mehrere Stellen auf einmal, in einem Arbeitsgang, entgratet werden können. Ein Verfahren, mit dem das möglich ist, ist das thermische Entgraten.

Der Nachweis, dass die Querbohrungen im Inneren von Hohlwellen durch das thermische Entgraten prozesssicher entgratet werden können, wird durch einen Versuch bei der Firma BENSELER Entgratungen GmbH erbracht. Diese in Marbach ansässige Firma ist nicht Hersteller von Entgratanlagen, sondern arbeitet als Lohndienstleister für metallverarbeitende Betriebe mit Anlagen des Fabrikats Bosch-Rexroth.

Der Entgratungsversuch wird auf folgende Weise durchgeführt:

1. Eine einzelne Getriebewelle wird in die Reaktionskammer der Entgratanlage gegeben und steht dort senkrecht im Gitterkorb (Bild 158 links).
2. Die Kammer wird luftdicht verschlossen und mit einem brennfähigen Methan-Luft-Gemisch befüllt, welches einen Luftüberschuss aufweist und daher oxidierend wirkt. Die Befüllung des Arbeitsraums ist abgeschlossen, wenn ein Druck von 12 bar erreicht ist.
3. Das Gasgemisch wird entzündet und verbrennt in Millisekunden. Während dieser Zeit tritt kurzzeitig eine Temperatur von 3000 °C auf. Dabei verbrennt (oxidiert) der Grat und ein Teil des verbrannten Metalls schlägt sich als rostbraune Verfärbung auf die Bauteiloberfläche nieder (Bild 158 Mitte).
4. Da das Eisenoxid auf der Oberfläche sehr stark anhaftet, folgt direkt im Anschluss eine zweite Behandlung in der Reaktionskammer. Diesmal wird zur Entfernung der Oxidschicht ein Reduktionsschuss durchgeführt und dabei ein reduzierendes Gasgemisch (mit Sauerstoffmangel) in die Kammer geleitet. Wenn in der Kammer ein Druck von 8 bar erreicht ist, ist der Füllvorgang abgeschlossen. Durch elektrische Lichtbogenzündung erfolgt der Reduktionsschuss innerhalb der Arbeitskammer und es wird dabei das an der Bauteiloberfläche befindliche Eisenoxid in Eisencarbonat umgewandelt, das wiederum nicht gut an der Oberfläche anhaftet. Danach hat das Bauteil eine gräuliche Oberflächenfarbe (Bild 158 rechts). Das unmittelbar aufeinanderfolgende Durchführen des Oxidations- und Reduktionsschusses führt zu einer Erwärmung der Bauteiloberfläche. Dabei wird direkt nach der thermischen Bearbeitung an der Bauteiloberfläche eine Oberflächentemperatur von 130°C gemessen.
5. Als letzter Bearbeitungsschritt erfolgt das Waschen der Oberfläche mit einem säurehaltigen Medium. Dabei wird der Schmauch (Eisencarbonat) von der Oberfläche entfernt.



Bild 158: links: Getriebewelle vor der thermischen Behandlung im Gitterkorb; Mitte: Aussehen der Welle nach dem Oxidationsschuss; rechts: Aussehen der Welle nach dem Reduktionsschuss (rechts)

Die Ergebnisse der thermischen Bearbeitung der Getriebewellen, mit dem oben beschriebenen Verfahrensablauf, zeigt das Bild 159. Dort werden die Zustände in ausgewählten Bereichen vor (Bilder oben) und nach der Bearbeitung (Bilder unten) einander direkt gegenübergestellt. Vor dem Bearbeitungsversuch sind bei allen Querbohrungen im Bereich des Bohrungsaustrittes (Bohrungsdurchmesser $d = 2,2 \text{ mm}$) jeweils eine Bohrungskappe sowie ein leichter Grat im Bereich außerhalb der Bohrungskappe vorhanden (Bilder oben). Mit dem thermischen Entgraten wird an allen Bohrungen der Grat restlos entfernt (Bilder unten).

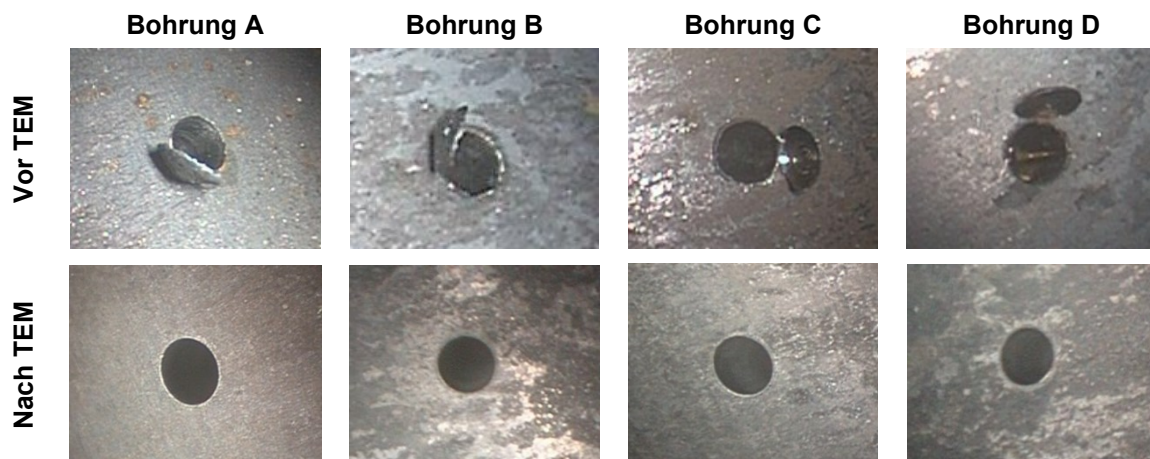


Bild 159: Endoskopische Befundung der Bearbeitungsergebnisse der Entgratversuche an einer hohlen Getriebewelle; Bohrungen A, B, C, D vor dem thermischen Entgraten jeweils mit Bohrungskappe sowie kleinem Grat (oben); Grاتفreiheit der Bohrungen nach dem thermischen Entgraten (unten)

Bei der für den Versuch verwendeten Entgratanlage kann immer nur sequenziell eine Welle einzeln bearbeitet werden. Die gesamte Zykluszeit für eine Welle beträgt vier Minuten. Wird bei der Großserienfertigung eine Entgratanlage mit größerem Arbeitsraum verwendet, so können mehrere Wellen gleichzeitig behandelt werden. Dadurch verringert sich die Bearbeitungszeit und Bearbeitungskosten pro Welle. Das genaue Mischungsverhältnis des Methan-Luft-Gemisches für den Oxidations- und den Reduktionsschuss unterliegt dem Betriebsgeheimnis und wird deshalb nicht offengelegt. Der Nachteil des thermischen Entgratens ist in den laufenden Kosten für den Verbrauch der erforderlichen Betriebsgase zu sehen.

5. Bohren ohne Gratbildung

Um die Problematik des Entfernens des Grates im Bereich des Querbohrungsaustritts zu umgehen wird ein alternatives, gratfreies Bohrverfahren unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen auf seine Eignung hin untersucht. Hierzu werden bei dem Funkenerosionsspezialisten Firma Naus, Waiblingen, Bearbeitungsversuche durchgeführt. Es wird die Realisierbarkeit von Bohrlöchern mit 2,2 mm Durchmesser durch die radiale Bohrerrosion untersucht. Als Versuchsmaschinen stehen im dortigen Versuchslabor zwei Senkerodiermaschinen zur Verfügung. Eine arbeitet mit einem ölbasierten (Bild 160 links: AgemaGermany AS430) und die andere mit einem wasserbasierten Dielektrikum (Bild 160 rechts: Mandra BT – 2NC ATC). An beiden Maschinen werden die Bohrungen mit Hilfe einer Kupferelektrode gesetzt. Als Alternative könnte dafür auch eine Elektrode aus Messing verwendet werden, jedoch tritt bei dieser Elektrodenart ein stärkerer Verschleiß auf.



Bild 160: Erodiermaschinen *AgemaGermany AS430* mit ins Dielektrikum eingetauchtem Bauteil (Bild links) und *Mandra BT – 2NC ATC* mit ins Vierbackenspannfutter eingespanntem Dummy-Werkstück

5.1. AgemaGermany AS430

Diese Erodiermaschine arbeitet mit einem ölbasierenden Dielektrikum, mit dem eine geringere Oberflächenrauheit realisiert werden kann. Nach dem Einlegen des zu bearbeitenden Werkstückes wird der Behälter geflutet, sodass das Werkstück komplett ins Dielektrikum eingetaucht ist. Das dabei verwendete Dielektrikum wird während des Bearbeitungsvorganges kontinuierlich umgewälzt und gefiltert; es wird mehrfach verwendet. Da es sich um ein brennbares Medium handelt, gelten bei dieser Anlage verschärfte Sicherheitsanforderungen. Die Oberflächenform der Bohrung wird durch zyklisches Abfahren der Bohrung verbessert. Der für die folgenden Versuche verwendete Elektrodendurchmesser beträgt 2 mm. Der Druck, mit dem das Dielektrikum durch die Elektrode hindurch in die Bohrung gespült wird, liegt bei 60 bar.

5.2. Mandra BT – 2NC ATC

Die Erodiermaschine Mantra BT arbeitet mit einem kostengünstigeren, wasserbasierenden und nicht brennbaren Dielektrikum. Dieses wird mit Drücken von bis zu 75 bar direkt in die zu

erodierende Bohrung gespült. Da hier im Vergleich zur anderen vorgestellten Versuchsmaschine das Dielektrikum ausschließlich nur über die Elektrode zugeführt wird, entfällt hier das Fluten des Beckens. Dadurch verkürzt sich die Bearbeitungszeit zur Herstellung einer Bohrung. Als Nachteil bei diesem Bohrprozess ist zu sehen, dass die erzielbare Oberflächerrauheit im Vergleich zur Bearbeitung auf der vorhin erwähnten Maschine hier nicht erreicht wird.

5.3. Versuchsobjekte

Als Versuchsobjekte werden zwei Schleudergussrohrsegmente aus dem Originalwerkstoff 25MoCr4 in radialer Richtung durchbohrt (Bild 161). Beim Scheibensegment mit den im Bild 162 (links) angegebenen Abmessungen, das für das Herstellen der Bohrungen 1-5 verwendet wird, muss ein Bohrloch mit einer Länge von 12,14 mm hergestellt werden. Für die Bohrung 6 wird ein Scheibensegment verwendet, bei dem eine Länge von 15,36 mm durchbohrt wird (Bild 162 Mitte). Gemessen wird die effektive Bohrlänge vom obersten Punkt des Bohrungseintritts bis zum untersten Punkt des Bohrungsaustritts. Das Bearbeitungsergebnis der Bohrversuche wird in der Tabelle 34 dargestellt. Die Lage der dort gezeigten Messwerte sind im Bild 162 zu sehen. Die Vermessung und Auswertung aller Bohrungsdurchmesser zeigt, dass die Bohrungen einen konusförmigen Verlauf haben, welcher durch die geeignete Wahl der Prozessparameter gesteuert werden kann. Dabei ist der Durchmesser im Bereich des Bohrungseintritts immer größer als im Bereich des Bohrungsaustritts.

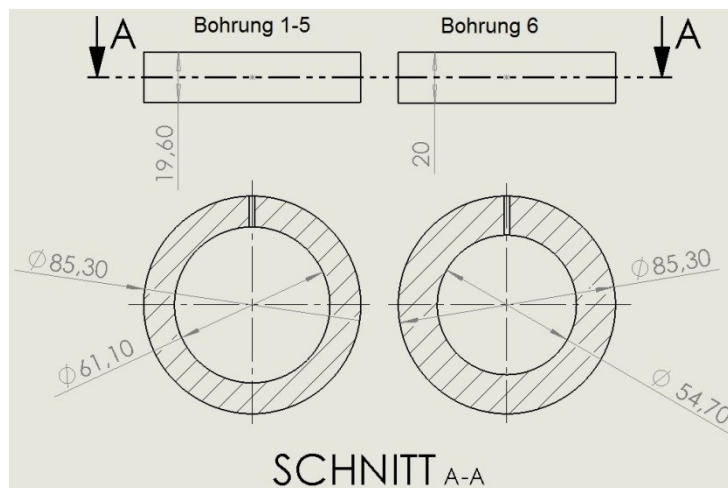


Bild 161: Abmessungen der Versuchsträger für die Bohrungen 1-5 (links) und der Bohrung 6 (rechts)

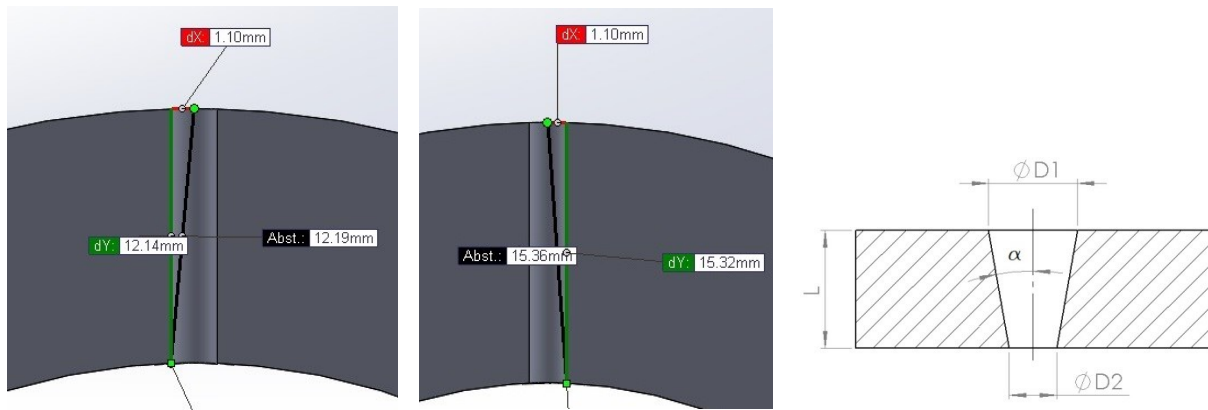


Bild 162: Schematische Darstellung der Abmessungen der Bohrungen 1-5 (links) und der Bohrung 6 (Mitte); Vereinfachte Darstellung des kegelförmigen Verlaufes der erodierten Querbohrung zur Messung der Ausbildung einer kegelförmigen Bohrung mit Bohrungseintritt D1, Bohrungsaustritt D2 und Bohrungslänge L (rechts)

Im ungünstigsten Fall wird ein Kegelwinkel von $0,12^\circ$ bei einer Bearbeitungszeit von 2,04 min erzeugt (Tabelle 34, Bohrung 1). Durch ein zusätzliches zirkulares Abfahren der Bohrung mit einem Oberflächennachbehandlungszyklus kann die Ausbildung eines kegelförmigen Bohrungsverlaufes verringert werden. Dadurch verringert sich der kegelige Verlauf der Bohrung auf den Kegelwinkel von $0,02^\circ$ (Tabelle 34, Bohrung 3). Jedoch erhöht sich die Bearbeitungszeit signifikant auf 6 Minuten.

Werte zur Beschreibung der kegelförmigen Bohrungen	Einheit	Bohrung Nr.					
		1	4	2	3	5	6
Oberflächen-nachbehandlung	-	nein	nein	ja	ja	ja	nein
Durchmesser D1	mm	2,13	2,12	2,13	2,19	2,2	2,3
Durchmesser D2	mm	2,08	2,09	2,11	2,18	2,18	2,25
Bohrungslänge L	mm	12,14	12,14	12,14	12,14	12,14	15,36
Durchmesseränderung ΔD	mm	-0,05	-0,03	-0,02	-0,01	-0,02	-0,05
Bearbeitungszeit [min]	min	2,04	2,08	4	6	8,54	1,36
Verhältnis $\Delta D/L$	$\mu\text{m}/\text{mm}$	-4,12	-2,47	-1,65	-0,82	-1,65	-3,26
Absolute Änderung ΔD	%	-2,4	-1,4	-0,9	-0,5	-0,9	-2,2
Kegelwinkel α	$^\circ$	0,12	0,07	0,05	0,02	0,05	0,09
$\Delta D = D_2 - D_1$ $\frac{\Delta D}{L} = \frac{D_2 - D_1}{L}$ $\Delta D_{\%} = \left(\frac{D_2 - D_1}{L} + 1 \right) * 100\%$ $\alpha = \arctan \frac{\Delta D}{2L}$							

Tabelle 34: Gemessene und berechnete Werte zur Charakterisierung der kegelförmigen Querbohrungen

5.4. Rauheitsvergleich

Nach der Vermessung der Bohrungen erfolgt die Bestimmung der Rauheit der Bohrungs-oberflächen. Ausgewählt werden hierfür die Bohrungen 4, 5 und 6, die entlang ihrer Symme-trieachse durchgeschnitten und die Rauheit mit einem taktilen Tastschnittgerät gemessen werden (Bild 163). Die dabei entstehenden Bohrungssegmenthälften werden jeweils mit Index a und Index b beschriftet.



Bild 163: Aufgeschnittene Bohrungen zur Überprüfung der Rauheit der Bohrungen 4 (rechts), 5 (Mitte), 6 (links)

Zur Bewertung der Oberflächenrauheit wird hier gemittelte Rautiefe R_z nach der Gleichung (21) herangezogen.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{z(i)} \quad [\mu m] \quad (21)$$

Das Bild 164 zeigt das Ergebnis der Rauheitsmessung der Bohrungshälften. Die Bohrungen 4 und 5 sind mit der gleichen Erodiermaschine, jedoch mit unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien hergestellt worden. Bei der Bohrung 5 wird die Bohrung zur Oberflächennachbehandlung zirkular abgefahren, wodurch die Ausbildung einer Konizität verringert wird. Hierbei wird die Elektrode im eingetauchten Zustand über die gesamte Bohrungstiefe im zweiachsigen Bahnbetrieb zirkular interpolierend, außermittig entlang des Bohrungseintrittskreises um 360° geführt. Die Rauheitswerte liegen bei dieser Bohrung im Bereich von $R_{z5b} \approx 24 \mu m$. Bei der Bohrung 4, die ohne eine Oberflächennachbehandlung hergestellt ist, liegen die Rauheitswerte auf einem niedrigeren Niveau bei Werten zwischen $R_{z4a} \approx 9 \mu m$ und $R_{z4a} \approx 11 \mu m$. Für das Bohren der Bohrung 4 wird eine Bearbeitungszeit von $t_4 = 2,08 \text{ min}$ benötigt. Durch die zusätzliche zyklische Oberflächennachbearbeitung bei der Bohrung 5 erhöht sich die Bearbeitungszeit auf $t_5 = 8,54 \text{ min}$. Mit der Erodiermaschine, die ein wasserbasierendes Dielektrikum verwendet, wird die Bohrung 6 hergestellt. Dabei wird eine kurze Bohrzeit von $t_6 = 1,36 \text{ min}$ erzielt. Die Oberflächenrauheitswerte liegen, mit Werten zwischen $R_{z6a} \approx 24 \mu m$ und $R_{z6a} \approx 29 \mu m$, auf ähnlichem Niveau wie bei der Bohrung 5.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die zirkulare Oberflächennachbearbeitung zu einer Verringerung des Kegelwinkels führt. Jedoch wird diese Verbesserung mit erheblich höheren Bearbeitungszeiten und höheren Oberflächenrauigkeiten erkaufte. Sollen Bohrungen mit kurzen Bearbeitungszeiten, unter Tolerierung einer höheren Oberflächenrauigkeit und der entstehenden Konizität hergestellt werden, so ist dafür eine Erodiermaschine mit wasserbasierendem Dielektrikum optimal. Müssen dagegen Bohrungen mit geringem

kegeligen Verlauf hergestellt werden, so ist eine Erodiermaschine mit ölbasierendem Medium und einer zirkularen Oberflächennachbearbeitung zu wählen.

Für die Großserienfertigung könnten auf einer Sondermaschine, die speziell an die Getriebewellengeometrie angepasst ist, mehrere Bohrungen gleichzeitig hergestellt werden. Damit würden sich die langen Bohrzeiten relativieren.

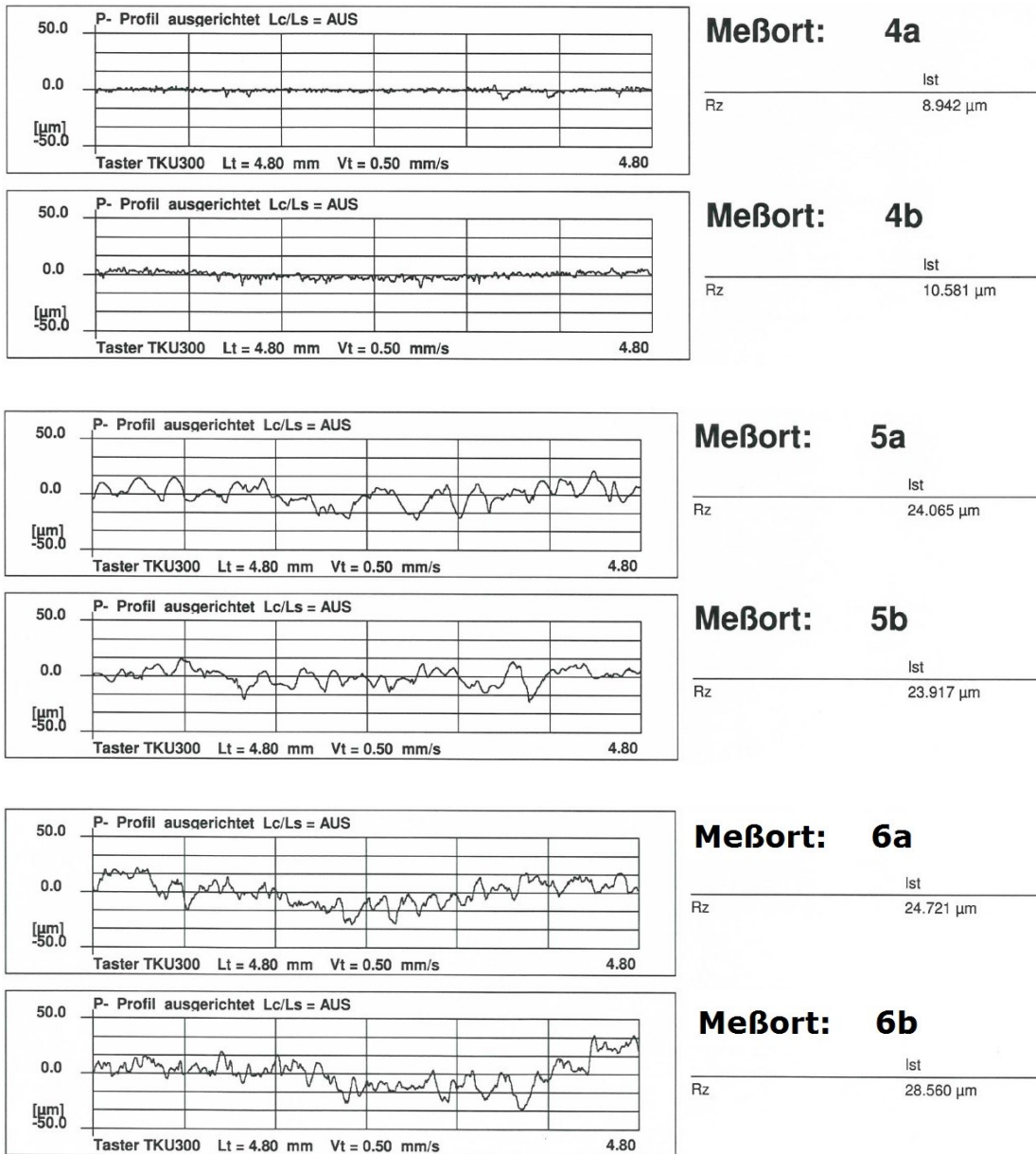


Bild 164: Ergebnis der Messungen der Rauheit der Bohrungen 4, 5, 6 (Originalschriebe des Perthometers)

5.5. Automatische Detektion des Zunderbestandes

Für die Großserienproduktion wäre es von Vorteil, wenn der innere Hohlraum einer fertig bearbeiteten Getriebewelle vollautomatisch auf Zunderfreiheit untersucht werden kann. Dazu ist es nicht erforderlich, die Zunderdicke zu bestimmen, sondern nur dessen eventu-

elles Vorhandensein an der Innenoberfläche nachzuweisen.

Auffälligkeiten, die direkt an der Innenoberfläche der Bauteile liegen, können mit einem optischen Messsystem des Fabrikats Jenoptik vollautomatisch detektiert werden. Damit lassen sich auch Oberflächenfehler an äußeren Konturen feststellen. Verwendet wird dieses Messverfahren z. B. zur Überprüfung der Oberfläche von Nockenwellen auf Risse, Lunker und Porositäten. Aber auch Ausbrüche der Kanten von Nocken werden damit erkannt. Diese Fehlerarten dürfen eine Größe von 0,1 mm nicht unterschreiten, da sonst eine Fehlererkennung nicht möglich ist. Die Oberflächenkontrolle mit dem Jenoptik Bohrungsinspektionsgerät erfolgt sehr schnell, wodurch in der Serienfertigung die Überprüfung einer Nockenwelle nur 12 Sekunden dauert.¹⁹³

Das Ergebnis eines bei der Firma Jenoptik, Villingen-Schwenningen, durchgeführten Versuchs zeigt, dass eine vollautomatische Kontrolle der Zunderschicht von Hohlräumen prinzipiell möglich ist. Bei der Untersuchung entsteht die im Bild 165, linke Seite, gezeigte Panoramaaufnahme. Eine von dieser Firma selbst entwickelte Software ist in der Lage, über die Grauwert-Auswertung eines von der CCD-Kamera aufgenommenen Bildes vollautomatisch das Vorhandensein von Zunder zu erkennen. Die dunklen Bereiche auf dem Bild stellen Bereiche mit Zunder dar, welche vom Softwareprogramm automatisch erkannt und rot markiert werden (Bild 165 links).

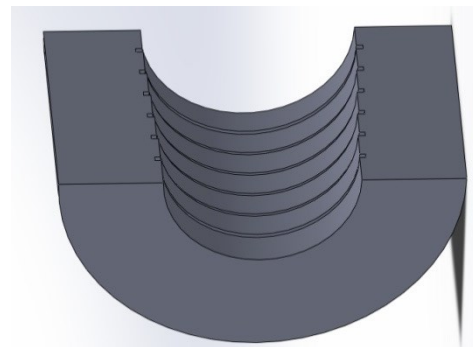
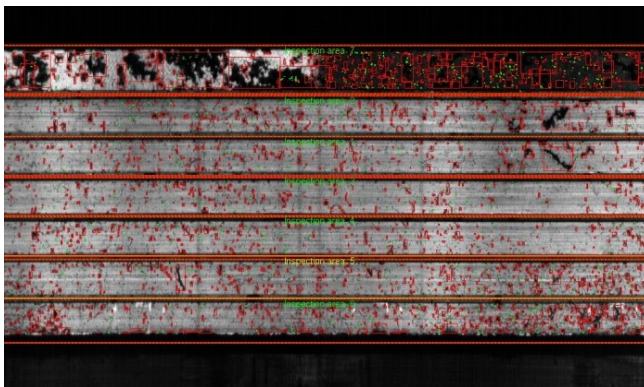


Bild 165: links: Ausschnitt des aufgenommenen Bildes des Hohlraumabschnitts eines in Stufen angeschliffenen Schleudergussrohres. Die dunklen Stellen sind verzunderte Bereiche; die hellen Stellen sind geschliffenen Mantelflächenzonen. Verzunderte Bereiche werden durch ein Softwareprogramm der Fa. Jenoptik automatisch erkannt und markiert (rot). Die Aufnahme zeigt den „Panorama-Blick“ eines CCD-Flächensensors (die Bildlänge vom linken zum rechten Rand entspricht dem abgewickelten Innenmantel des Hohlraums über 360°). Rechts: Aufgeschnittenes Schemabild des Versuchsträgers.

¹⁹³ Jenoptik AG, 2009

6. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten

6.1. Rohteilgeometrie

Das ursprünglich vorgesehene Schleudergussrohr ist wegen seiner Neigung zur Rissbildung als Halbzeug zum Radialschmieden nicht geeignet. Es muss auf ein warm gewalztes Stangenmaterial als Ausgangsmaterial zurückgegriffen werden. Von diesem Vollmaterial werden Segmente abgesägt, welche zunächst durch Längs- und Plandrehen auf das erforderliche Vorbearbeitungsmaß gebracht werden. Anschließend werden sie im Inneren auf den Durchmesser 65 mm durch Tieflochbohren aufgebohrt. Das Rohteil zum Schmieden der Serie 6 hat die im Bild 166 dargestellten Abmessungen.

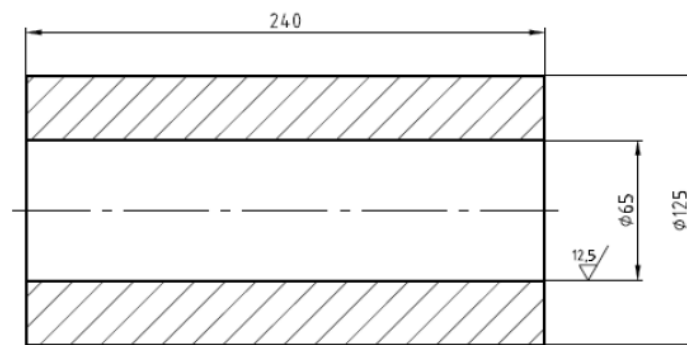


Bild 166: Abmessungen des Rohteils zum Schmieden der Versuchsserie 6

Zur Verringerung des Zerspanungsaufwandes sollten nach Möglichkeit warm gewalzte dickwandige Nahtlosrohre verwendet werden. Da an diesen die Wanddicke über den Umfang stark variiert, ist auf jeden Fall eine spanende Nachbearbeitung erforderlich. Durch die Verringerung des Innendurchmessers von $\Phi 65$ mm auf $\Phi 51$ mm könnte die Qualität der Hohlraumoberfläche verbessert werden, da der Werkstoff des Rohteils beim Schmiedeprozess früher auf dem Dorn aufliegt. Des Weiteren ist dadurch eine Verbesserung des Rundlaufes des ungeschmiedeten Mittelbundes zu erwarten. Das Materialvolumen V des Rohteils der Serie 6 wird mit der Gleichung (22) berechnet:

$$V = \frac{(D_R^2 - d_R^2) \cdot \pi \cdot L}{4} \quad [mm^3] \quad (22)$$

Wird bei gleichbleibendem Außendurchmesser nur der Innendurchmesser verkleinert und gleichzeitig das Volumen konstant gehalten, so wird das Rohteil nach der Gleichung (23) kürzer ausgeführt.

$$L_{neu} = \frac{4 \cdot V}{(D_R^2 - d_{Rneu}^2) \cdot \pi} \quad [mm] \quad (23)$$

Das Stangenmaterial, aus dem die Rohrsegmente abgetrennt werden, hat die marktübliche Ausgangslänge von 6 m. Es wird davon ausgegangen, dass durch das Ablängen und das beidseitige Plandrehen jeweils 10 mm Länge pro Rohrsegment verloren gehen. Dadurch entstehen 24 Rohteile mit den in Bild 166 dargestellten Abmessungen. Durch die Verkleinerung des Innendurchmessers auf $d_{Rneu}=51$ mm bei einem gleichbleibenden Außendurchmesser von $D_R=125$ mm ist nur mehr eine Rohteillänge von 210 mm erforderlich, wodurch die Anzahl der Rohteile auf 27 Stück erhöht wird. Wird zusätzlich auch noch der Außendurchmesser auf den Durchmesser von $D_R=130$ mm vergrößert, so reduziert sich die Länge eines Rohrsegments auf einen Wert von 191 mm. Gleichzeitig steigt die dabei mögliche Stückzahl auf 29 Stück pro Vollmaterialstange bzw. Nahtlosrohr. Allerdings ändert sich auch der lokale Umformgrad beim Radialschmieden.

6.2. Herstellung des Rohteils für das Radialschmieden

Das Rohteil kann aus zwei verschiedenen Halbzeugen hergestellt werden. Zum einen, wie bei der Versuchsserie 6, aus vollem Rundmaterial, von dem zunächst entsprechende Segmente abgetrennt werden. Mit anschließenden Plan- und Außendrehoperationen werden diese auf das erforderliche Verarbeitungsmaß gebracht. Anschließend wird die für den Radialschmiedeprozess benötigte Bohrung mit einer Tieflochbohrmaschine hergestellt. Alternativ besteht die Möglichkeit, als Ausgangsmaterial ein warmgewalztes Rohr zu nehmen, welches nach dem Ablängen plangedreht wird. Danach wird es im Inneren auf den benötigten Durchmesser durch Tieflochbohren aufgebohrt. Die Tabelle 35 zeigt die kalkulierten Varianten einer Tieflochbohrmaschine des Fabrikats TIBO zum Voll- oder Aufbohren eines Rohteils vor dem Schmieden. Mit diesen beiden Varianten zur Herstellung der Bohrung ist es möglich, mit einer Tieflochbohrmaschine die erforderliche Produktionskapazität von 10.000 Stück Rohteile pro Jahr abzudecken. Von den dort vorgeschlagenen zwei Varianten ist, das Vollbohren dem Aufbohren vorzuziehen, da mit diesem Verfahren ein besserer Bohrungsmittenverlauf (0,12 mm) wie auch eine bessere Oberflächenrauigkeit ($Ra < 1 \mu m$) erreicht wird. Jedoch ist beim Vollbohren das erreichbare Durchmesserfeld mit Werten zwischen IT8 und IT9 um einen Grad schlechter als beim Aufbohren (Tabelle 36).

Werkstück-/Zchngsnr.	Getriebehauptwelle Variante 1 Vollbohren	Getriebehauptwelle Variante 2 Aufbohren
Bohrverfahren		
Bohr-Ø (mm)	65	65
Bohrtiefe (mm)	240	240
Werkstücklänge (mm)	240	240
An-/Ausbohren(mm)	10	10
Vc (m/min)	80	90
f (mm/U)	0,2	0,25
Vf (mm/min)	78	110
Bohren (min.)	3,21	2,27
Nebenzeit (min.)	0,25	0,25
Taktzeit (min.)	3,46	2,52
Stück/Jahr	10.000	10.000
Taktzeit/ Jahr	34.551	25.227
Verf. Kapazität min/Jahr	228.000	228.000
Benötigte Spindelanzahl	0,2	0,1
Maschinentyp	B80-375	B80-375

Tabelle 35: Bearbeitungsparameter für zwei mögliche Varianten des Tieflochbohrens (Quelle: Firma TIBO, Pfullingen)

Werkstück-/Zchngsnr.	Getriebehauptwelle Variante 1 Vollbohren	Getriebehauptwelle Variante 2 Aufbohren
Bohrverfahren		
Ø-Toleranzfeld	IT8-IT9	IT7-IT8
Oberflächengüte (µm)	Ra<1	Ra<2,5
Bohrungsmittenverlauf (mm)*	0,12	0,48

Tabelle 36: Erreichbare Qualitätskenngrößen (* gilt für stillstehendes Werkzeug und rotierendes Werkstück) (Quelle: Firma TIBO, Pfullingen)

6.3. Schmiedeprozess

Bei allen Versuchen wird zuerst die erste (Bild 100 rechts), massivere Seite der Welle geschmiedet. Danach erfolgt das Schmieden der zweiten, schlankeren Seite (Bild 101 rechts). Wird das Aussehen der beiden Wellenseiten verglichen, so ist zu erkennen, dass bei der zweiten Schmiedeseite das Material stärker verdrängt werden muss (Schmieden auf kleinere Durchmesser) und dass es dort eher zu einer Rissbildung/Faltenbildung kommt. Die Innenkontur der Getriebewelle sollte, wie in der oberen Hälfte im Bild 167 dargestellt, ausgeführt werden. Dadurch wird die im Mittelbereich der Welle nicht benötigte, jedoch vorhandene Vertiefung (im Bild 167 unten) entfernt. Dadurch sinkt die Gefahr, dass sich im Bereich dieser Vertiefung Drehriefen negativ auf die Bauteillebensdauer auswirken. Es sinkt die Gefahr der Rissbildung in diesem Bereich.

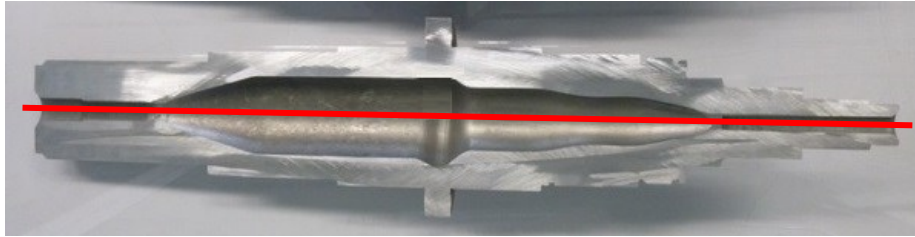


Bild 167: Empfohlener innerer Konturverlauf ohne mittlere Vertiefung (oberhalb des roten Striches) im Vergleich zu originalen Verlauf mit Vertiefung (Seite unterhalb des roten Striches)

6.4. Schmiedemaschine

Eine niedrigere Schmiedetemperatur führt zu einer geringeren Zunderbildung. Jedoch treten bei niedrigeren Temperaturen auch höhere Umformkräfte auf. Im Abschnitt 3.13.9 ist bei 750 °C Schmiedetemperatur die Leistungsgrenze der zur Verfügung stehenden Versuchsradial-schmiedemaschine erreicht worden. Es besteht ein Optimierungspotenzial in der Maschinen-größe bzw. Schlagleistung der Hämmer. In einer weiterführenden wissenschaftlichen Arbeit sollte für das inkrementelle Umformen der hohlen Getriebewelle ein Simulationsmodell ent-wickelt werden, welches Grundlage für die optimale Auslegung der Radialschmiedemaschine ist. Dies würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

6.5. Zunderschichtdicken

6.5.1. Zunderbildung bei Ofenvorwärmung und induktiver Nacherwärmung

Die durchgeführten Untersuchungen, insbesondere die Schmiedeversuche haben gezeigt, dass bei den hohlen Getriebewellen die Zunderbildung bzw. Zunderbeseitigung beherrsch-bar sind. Von Bedeutung ist die Wahl der Schmiedeparameter derart, dass fehlerfreie Wellen produziert werden. Werden die Wellen vor dem Schmieden zunächst im Ofen vorgewärmt und anschließend jede Schmiedestufe induktiv auf Schmiedetemperatur gebracht, so bilden sich die im Bild 168 zusammengefassten Schichtdicken aus. Bei einer induktiven Nacher-wärmung der vorgewärmten Welle (von 650 °C Ofentemperatur) auf 850 °C hat die Zunder-schicht der mit einem Schutzlack versehenen Innenoberfläche die Dicke von bis zu 8.5 µm. Bei der Ofenvorwärmung auf 850 °C und einer Nacherwärmung auf 950 °C erreicht die Zun-derschicht auch eine Dicke von bis zu 8.6 µm. Bei Wellen, die direkt aus der Ofenvorwär-mung auf 950 °C zum Schmieden gelangen, liegt die gebildete Zunderschichtdicke zwischen 15.5 µm bis 22 µm. Durch die niedrigere Ofenvorwärmung und der nachfolgenden induktiven Nacherwärmung wird die Zunderschichtdicke, im Vergleich zur ausschließlichen Ofenerwär-mung, erfolgreich reduziert.

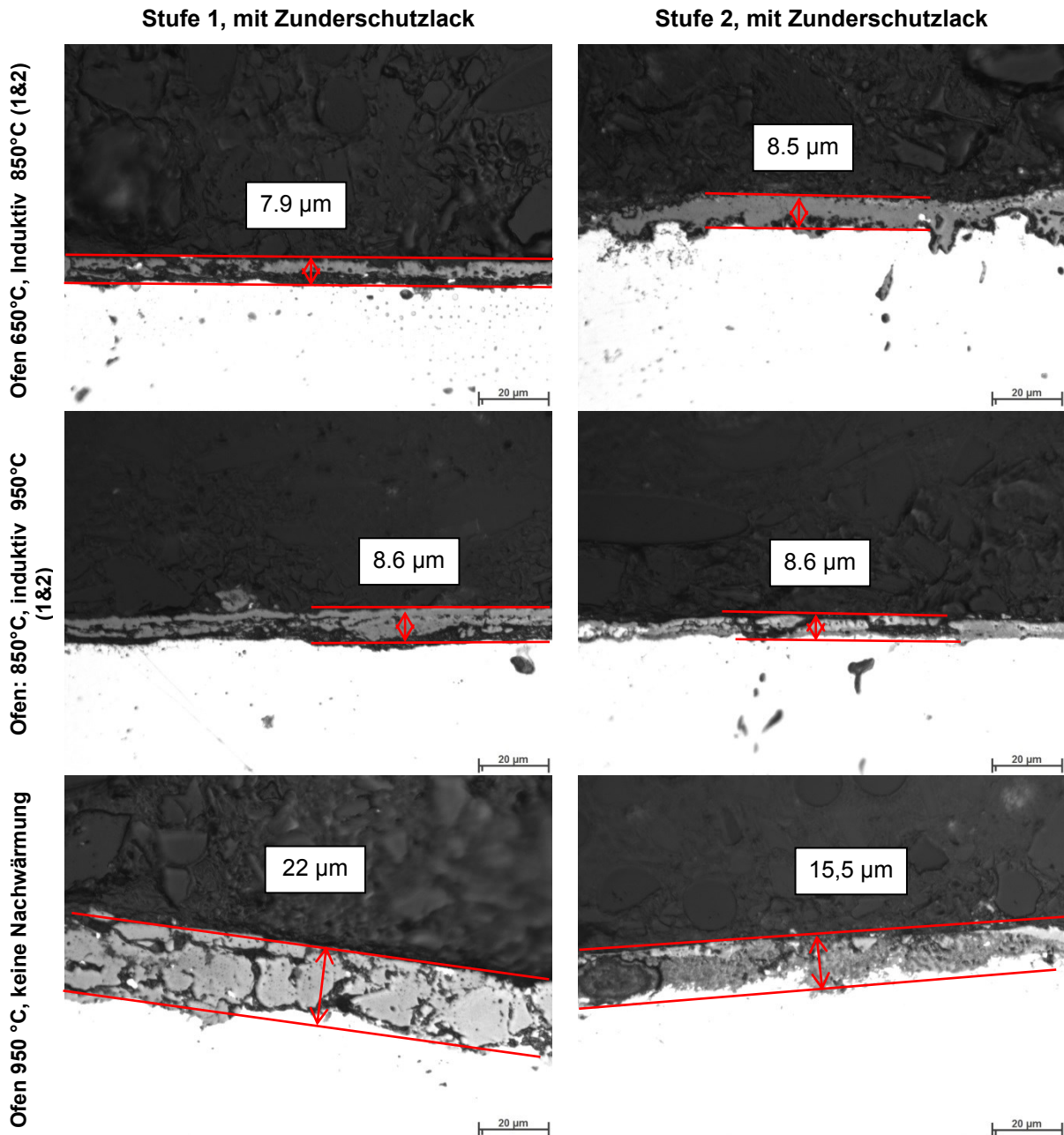


Bild 168: Zunderschichtdicken bei Ofenvorwärmung und induktiver Nacherwärmung jeder Wellenseite unmittelbar vor dem Schmieden, mit Zunderschutzlack (x-tec® Zunderschutz RT des Herstellers NANO-X GmbH) im Inneren

Mit dem Aufbringen eines Zunderschutzlackes kann, bei reiner Ofenerwärmung der Rohteile und dem Schmieden aus einer Hitze, die Zunderbildung je nach Temperaturbereich verschieden stark verringert werden (siehe Bild 169). Bei Ofentemperaturen von 950 °C wird die Zunderbildung nur geringfügig verringert (vgl. Wellen 335 und 350). Dabei wird ihre Schichtdicke von 29 µm auf 25 µm verringert. Wird die Temperatur bei der Ofenerwärmung auf 850 °C verringert, vermindert sich die Zunderbildung durch die Verwendung eines Zunderschutzlackes um fast die Hälfte (vgl. Welle 343 und 352). Bei reiner Ofenerwärmung bei Temperaturen von 800 °C wird mit der Anwendung des Zunderschutzlackes keine Verbesserung erzielt. Hier weist die Zunderschicht eine Dicke von 5.7 µm auf (Wellen 382

und 385). Im Vergleich dazu: Wird ein unausgedrehtes Schleudergussrohr bei der Temperatur von 950°C aus einer Hitze geschmiedet (Welle 388), so zeigen sich dabei sehr dicke Schichten mit Werten bis zu 47 µm (vgl. Anhang 1, Bild h) .

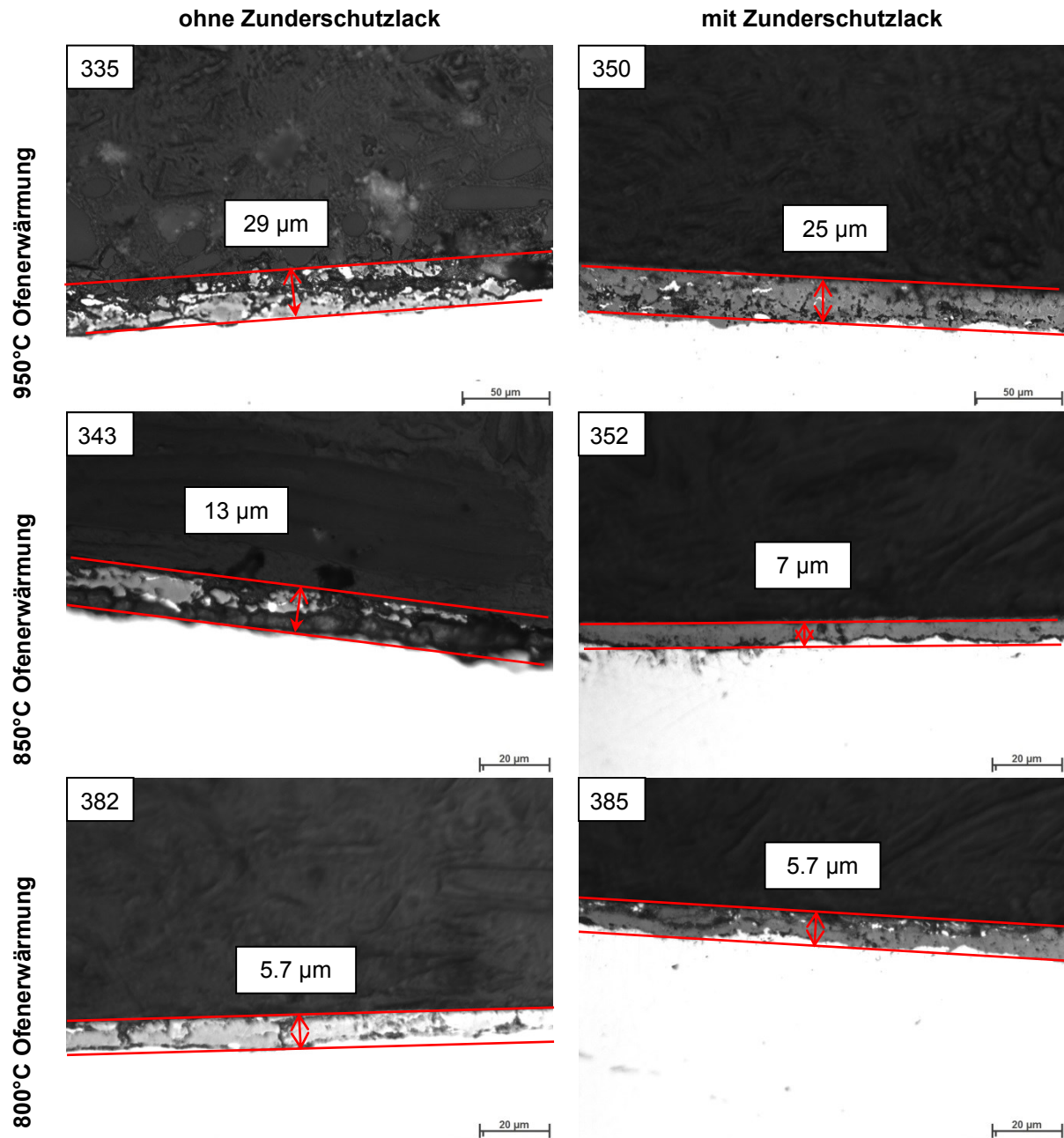


Bild 169: Vergleich der im inneren Hohlraum gebildeten Zunderschichten bei ausschließlicher Ofenerwärmung, mit oder ohne Verwendung eines Zunderschutzlackes

7. Empfohlene Prozessketten zur Herstellung einer fehlerfreien Getriebehohlwelle

Die Ausgangsbasis für die Prozesskette zur Herstellung von hohlen Getriebewellen ist die bereits entwickelte Prozesskette zur Weiterverarbeitung von Schleudergussrohren. Mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit werden die Umstellung auf ein anderes Ausgangsmaterial und Optimierung in der Prozessfolge bzw. den Fertigungsschritten empfohlen (Bild 170). Erstens wird als Ausgangsmaterial, anstatt des ursprünglich vorgesehenen Schleudergussrohres ein massives, warmgewalztes Rundstangenmaterial verwendet. Nach dem Trennen der Stangen in Abschnitte und der mechanischen Bearbeitung der Aussenkontur muss die Prozesskette, als zweiten Punkt, um einen Tieflochbohrprozess erweitert werden. Damit wird die für das Radialschmieden benötigte rohrförmige Geometrie des Rohteils hergestellt. Anschließend erfolgt das Vorwärmen für das Schmieden in einem Elektroofen. Die dritte Änderung ist die ergänzende Maßnahme, dass jede Werkstückseite vor dem Schmieden mit einer Induktionsspule auf die vorgegebene Schmiedetemperatur von 950 °C nachgewärmt wird. Nach der Wärmebehandlung und dem ersten Richtprozess muss als ergänzenden vierten Punkt eine Wanddickenmessung mit Hilfe des Ultraschalls zur Bestimmung der Welleninnengeometrie und somit der optimalen Drehachse in die Prozesskette eingefügt werden. Dadurch soll die Verschlechterung des Wuchtzustandes der Getriebehelle durch die Hartbearbeitung minimiert werden. Die dafür benötigte Zentriermaschine ist noch nicht am Markt erhältlich und die hierfür benötigten Algorithmen zur optimalen Auswertung der Messergebnisse müssen erst entwickelt werden. Als fünften Punkt muss die Prozesskette, nach der Hartzerspannung, mit dem thermischen Entgraten ergänzt werden. Das thermische Entgraten entfernt nicht nur die Grate in Bereichen der Bohrungsaustritte, sondern auch die an den Steckverzahnungen. Gleichzeitig wird beim thermischen Entgraten auch ein Teil der Zunderschicht im öldurchfluteten Wellenhohlraum entfernt. Anschließend erfolgt, als die sechste neue Maßnahme, das Kugelstrahlen des Wellenhohlraumes, mit dem die restliche Zunderschicht vollständig von der Oberfläche entfernt wird. Als weitere, ergänzende Maßnahme muss als qualitätssichernde Maßnahme eine vollständige Oberflächenkontrolle mit den modernen Möglichkeiten der industriellen Bildverarbeitung erfolgen, die auf die Inspektion des Wellenhohlraumes hin optimiert ist. Als Radialschmiedemaschine wird die bei den Versuchen verwendete Maschinenbaugröße SSK-14 empfohlen, da damit beide Getriebehellenseiten direkt hintereinander geschmiedet werden. Mit dieser ist es auch möglich, zukünftig Hauptwellen der größeren Getriebebaureihen zu fertigen. Als Alternative zur Ofenvorwärmung kann die Vorerwärmung der Rohteile zum Schmieden auch auf einer mehrstufigen Induktionsanlage durchgeführt werden.

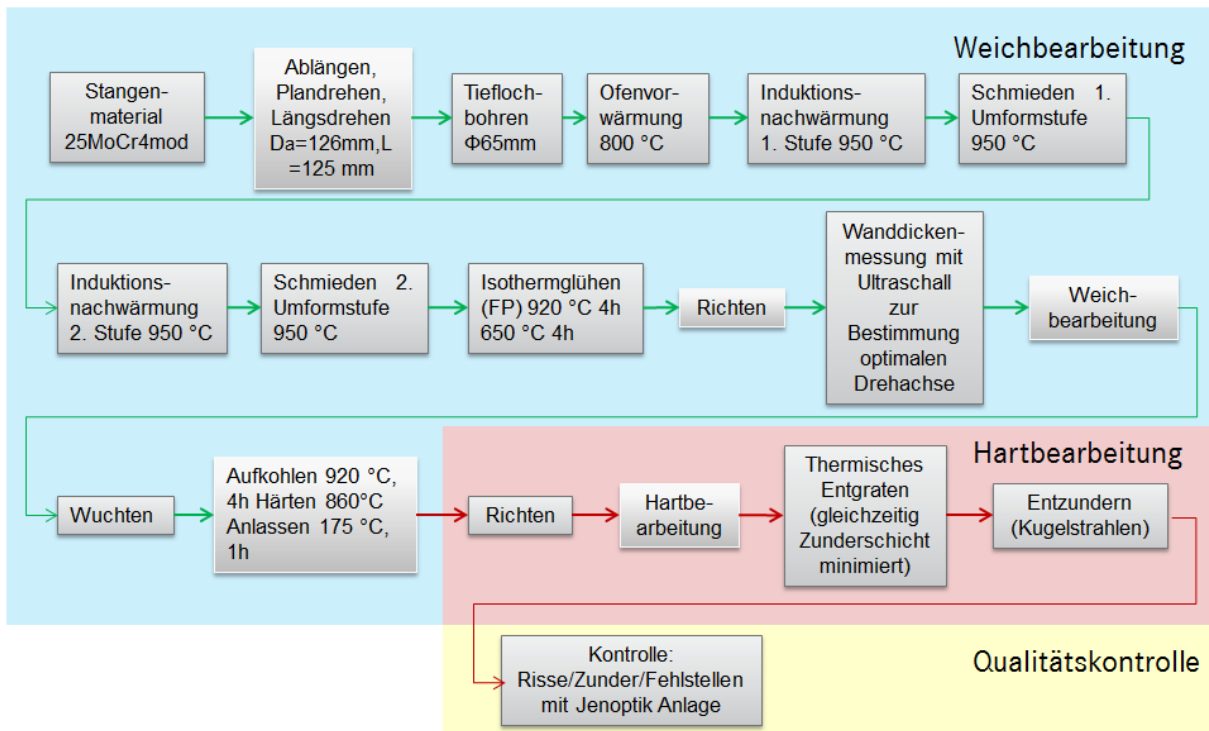


Bild 170: Optimierte Prozesskette zur Herstellung von Getriebebohlwellen unter Verwendung der Radialschmiedemaschine SSK-14 des Fabrikats GFM, Steyr

Die zweite Variante (siehe Bild 171) verwendet, anstatt der Radialschmiedemaschine SSK-14, die nächst kleinere, aber dafür verstärkte, Baugröße. Die in diesem Bild gezeigte Prozesskette unterscheidet sich, im Vergleich zu der im Bild 170 gezeigten Variante, im Ablauf zwischen dem Tieflochbohren und dem Isothermglühen. Dabei wird, nach dem Tieflochbohren, zunächst die erste Wellenseite in einer mehrstufigen Induktionsanlage auf die gewünschte Schmiedetemperatur erwärmt. Diese Anlage besteht aus einem drehbaren Tisch, auf dem eine auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmte Anzahl von Schmiederohtteilen und Induktionsstufen verteilt sind. Dabei befindet sich auf der ersten Stufe immer ein neues, nicht erwärmtes Rohteil. Auf der letzten Induktionsstufe ist das zu entnehmende, fertig erwärmte Schmiederohteil. Dieses wird von einem Industrieroboter gegriffen und der Radialschmiedemaschine zugeführt. Nun erfolgt das Schmieden der ersten Wellenseite. Das Bestücken des leeren Platzes auf dem Induktionstisch wird auch durch den Roboter durchgeführt. Bei der kleineren Baugröße der Radialschmiedemaschine ist es nicht mehr möglich, die beiden Wellenseiten direkt nacheinander zu schmieden. Deshalb muss für das Schmieden der zweiten Wellenseite die Radialschmiedemaschine, wie auch die mehrstufige Induktionsanlage umgebaut werden. Danach erfolgt, wie vorhin beschrieben, das Erwärmen und Schmieden der zweiten Wellenseite. Anschließend erfolgt das Isothermglühen der fertiggeschmiedeten Teile. Alle darauf folgenden Prozessschritte entsprechen denen der zuvor beschriebenen Prozesskette. Dies würde die Anschaffungskosten der Schmiedemaschine um etwa die Hälfte senken. Allerdings weist diese Variante den Nachteil auf, dass der konti-

nuierliche Werkstückfluss beim Radialschmieden zum Bilden von Losgrößen unterbrochen werden muss.

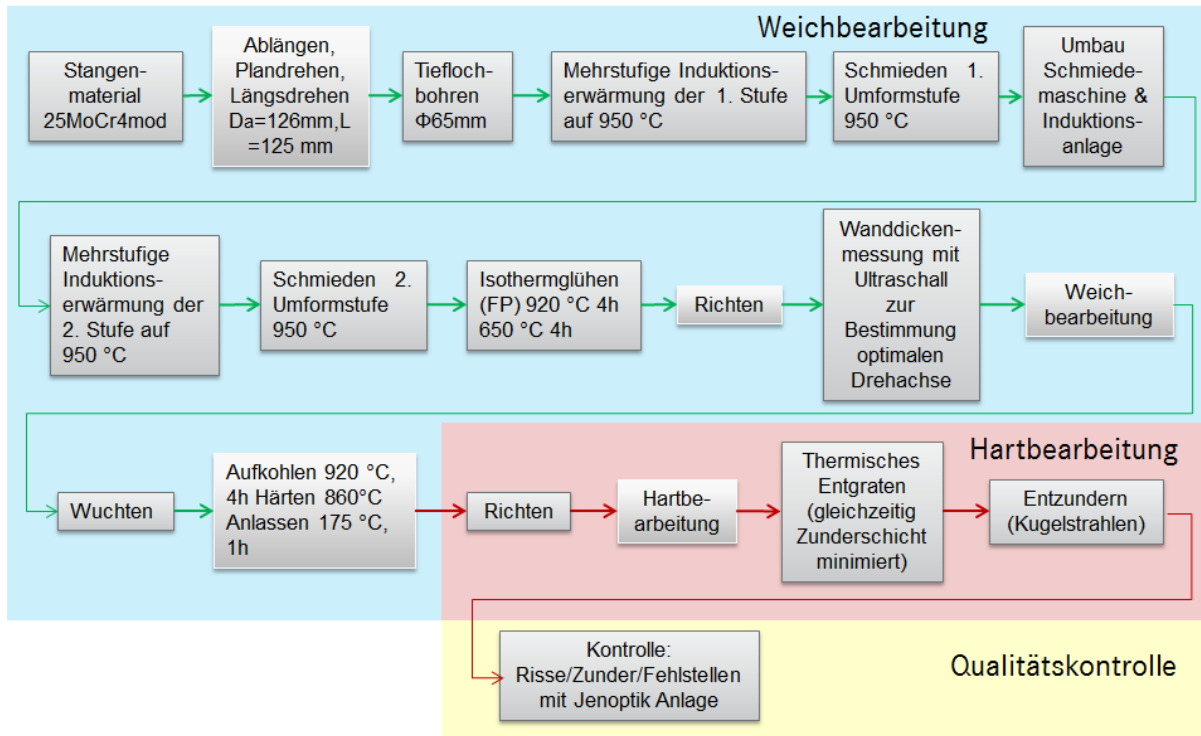


Bild 171: Eine weitere, optimierte Prozesskette zur Herstellung von Getriebeholwellen mit einer kleineren GFM SSK Schmiedemaschine und einer mehrstufigen Induktionsanlage

8. Literaturverzeichnis

Adam, W., Alberts, B. & Bergmann, A., 1989. *Handbuch Fertigungs- und Betriebstechnik*. 1. Auflage, Hrsg. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.

Alducto AG, 2015. *Alducto AG*. [Online]

URL: www.alducto.ch/projekt/downloads/firmenbroschuere.pdf

[Zugriff am 5. Oktober 2015].

Alisch, G. et al., 2015. *Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten*. 1. Auflage, Hrsg. München: Carl Hanser-Verlag.

ATL Anlagentechnik Luhden GmbH, 2013. *ATL Anlagentechnik Luhden GmbH*. [Online]

URL: [http://www.atl-](http://www.atl-luhden.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Prospekte/iTEM_Prospekt_2013_DE.pdf)

[luhden.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Prospekte/iTEM_Prospekt_2013_DE.pdf](http://www.atl-luhden.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Prospekte/iTEM_Prospekt_2013_DE.pdf)

[Zugriff am 14. Jänner 2014].

Avila, M. C. et al., 2004. Deburring of Cross-Drilled Hole Intersections by Mechanized Cutting. *Intl. Conf. on Deburring and Edge Finishing*, 31. Mai 2004, S. 379-389.

Baake, E., Drewek, R. & Eggers, A., 1992. *Industrielle Elektrowärmetechnik*. 1. Auflage, Hrsg. Essen: Vulkan-Verlag.

Balluff, 2004. Automatische Gratprüfung - Integration in die Produktionslinie. *Industriebedarf*, November, Ausgabe 11-12/2004, S. 24-26.

Bargel, H. J. et al., 2012. *Werkstoffkunde*. 11. Auflage, Hrsg.

Heidelberg/Dordrecht/London/New York: Springer-Verlag.

Barnickel, H. & Reissenweber, F., 2013. *Querkeilwalzmaschine und Verfahren zum Querkeilwalzen*. Deutschland, Patentnr. DE102013108451 A1.

Basler, M., 2000. *Nockenwelle aus Stahlguß*. Deutschland, Patentnr. DE1998133594.

Baudis, U. & Kreutz, M., 2001. *Technologie der Salzschnmelzen: Wärmebehandlung, Härtetechnik, Wärmeübertragung, Reinigung*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.

Beier, H. M. & Nothnagel, R., 2015. *Praxisbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung*. 2. Auflage, Hrsg. München: Carl Hanser-Verlag.

Berger, J., 1998. *Technische Mechanik für Ingenieure: Dynamik*. Braunschweig/Wiesbaden: Springer-Verlag.

- Bergmann, R. B. & Zabler, E., 2006. Methoden der zerstörungsfreien Prüfung. In: H. J. Gevatter & U. Grünhaupt, Hrsg. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik*. 2. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 363-410.
- Bergner, O. et al., 2007. *Metalltechnik - Metallbau und Fertigungstechnik Grundausbildung*. 9. Auflage, Hrsg. Berlin: Beuth-Verlag.
- Berns, H. & Theisen, W., 2008. *Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen*. 4. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bertrand, N. et al., 2004. Low Temperature Oxidation of pure Iron: Growth kinetics and scale Morphologies. *Materials Science Forum*, 15. August 2004, Band 461-464, S. 591-598.
- Bleckmann, C. E., 1968. *Die Härterei*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blum, M. et al., 2002. *Praxishandbuch Thermoprozess-Technik: Grundlagen - Verfahren*. 1. Auflage, Hrsg. Essen: Vulkan-Verlag.
- Böllinghaus, T. et al., 2014. Werkstofftechnik – E6: Korrosion und Korrosionsschutz. In: K. H. Grote & J. Feldhusen, Hrsg. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. E98-E115.
- Bosch Rexroth AG, 2013. *Bosch Rexroth AG*. [Online]
URL:
http://www.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload.dll/3842528618_TEM_2013_09_DE_media.pdf?db=brmv2&lvid=1175715&mvid=9812&clid=1&sid=997F7DECF7A1DF22A29D9BCBB161B1CA&sch=M&id=9812,1,1175715
[Zugriff am 14. Jänner 2014].
- Briehl, H., 2008. *Chemie der Werkstoffe*. 2. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Teubner-Verlag.
- Brommundt, E. & Sachau, D., 2014. *Schwingungslehre mit Maschinendynamik*. 2. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien-Verlag.
- Büchele, W., 1995. Entzundern von warmgewalzten Oberflächen. *Stahl und Eisen*, Band 115, S. 71-72.
- Buse, C., Santangelo, A. & Behrens, B. A., 2014. In-Prozess Risserkennung in der Kaltmassivumformung von Stahlwerkstoffen. *Schmiede JOURNAL*, September 2014, Ausgabe 09/2014, S. 54-57.

Cogsdill Inc., 2011. *Cogsdill Tool Products*. [Online]

URL: <http://kempf-tools.de/PDF/EntgratwerkzeugeCogsdill.pdf>

[Zugriff am 22. Juni 2015].

Deml, B. et al., 2014. *Integrated Design Engineering: Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Deutsches Institut für Normen, 2004. *DIN ISO 1940-1:2004-04*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen.

Diekmann, U., Glaß, R., Goldau, H. & Schmicker, H., 2006. *Verfahren zur Herstellung einer Getriebehohlwelle und Getriebehohlwelle*. Deutschland, Patentnr. DE200610016099.

Dresig, H. & Holzweißig, F., 2006. *Maschinendynamik*. 7. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Dresig, H. & Holzweißig, F., 2012. *Maschinendynamik*. 11. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Eberhard Abele, T. H. S. G., 2013. Kampf dem Grat. *Werkstatt + Betrieb*, 4. September 2013, Ausgabe 9/2013, S. 134-138.

Eibeck, G., 1974. Sonderdruck aus der Zeitschrift "Metallreinigung mit Salzschnmelzen". *Werkstatt und Betrieb*, Heft 2,107. Ausgabe, S. 101-106.

EMAG, 2016. *EMAG*. [Online]

URL: <http://www.emag.com/de/technologien/induktionshaerten.html>

[Zugriff am 23. Juli 2016].

Erdmann, C. M., Hahn, D., Hansen, W. & Kränzler, T., 2008. *Method for work-hardening surfaces of vehicle engine and transmission components comprises ultrasonic shot peening using component as part of sonotrode, its vibrating surfaces being hardened by contact with shot*. Deutschland, Patentnr. DE102006048712.

Erix Tool, 2013. *Erix Tool*. [Online]

URL: <http://www.erixtool.com/catalog/germancatalogmm.pdf>

[Zugriff am 29. Juni 2015].

Fechter, T. A. & Jaich, H., 2014. Fertigungsverfahren – geometrisch bestimmte Werkstücke herstellen. In: W. Skolaut, Hrsg. *Maschinenbau*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 977-1074.

Felss, 2005. *Felss GmbH*. [Online]

URL: www.felss.de

[Zugriff am 2. Mai 2005].

Fischer, R. et al., 2012. *Das Getriebebuch*. 1. Auflage, Hrsg. Wien: Springer-Verlag.

Föhl, C., 2011. *Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen, Dissertation, Universität Stuttgart*. München: Herbert Utz-Verlag.

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2013. *Fraunhofer IWU*. [Online]

URL: <http://www.e3-fabrik.de/content/dam/iwu/de/documents/Broschueren/IWU-KB-Bohrungsdruecken.pdf>

[Zugriff am 30. Juni 2015].

Fritz, A. H., Förster, R. & Hoffmeister, W., 2015. *Fertigungstechnik*. 11. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Fritz, A. H. et al., 2012. *Fertigungstechnik*. 10. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Fritz, A. H., Knipfelberg, M. & Kühn, K. D., 2008. *Fertigungstechnik*. 8. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Gasch, R., Nordmann, R. & Pfützner, H., 2006. *Rotordynamik*. 2. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.

Göbel, E. F. & Marfels, W., 1953. *Die Oberflächenhärtung und ihre Berücksichtigung bei der Gestaltung*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag.

Gühring oHG, 2009. *Gühring oHG*. [Online]

URL: <http://www.guehring.de/pdf/Entgratwerkzeuge.pdf>

[Zugriff am 13. Februar 2014].

H. Butting GmbH & Co. KG, 2012. *H. Butting GmbH & Co. KG*. [Online]

URL:

http://www.butting.com/fileadmin/daten/redakteure/Download/EN/Prospekte_EN/BUTTING_Seamless_or_welded_pipes.pdf

[Zugriff am 6. August 2015].

Haller, A., 2007. Ultraschall-Kugelstrahlen bietet Vorteile bei Qualität, Handhabung und Kosten. *MM - Das Industriemagazin*, Ausgabe 23/2007, S. 54-57.

Häusler, K. H., 1993. *Verfahren zur Herstellung nahtloser Rohre nach dem Stopfenwalzverfahren*. Deutschland, Patentnr. 93250081.2.

Hellmich, A. et al., 2012. *Werkzeugmaschinen - Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Heule Precision Tools, 2014. *Heule Precision Tools*. [Online]

URL: <http://www.heule.com/de/entgraten/cofa>

[Zugriff am 10. Februar 2014].

Heule Precision Tools, 2014. *Heule Precision Tools*. [Online]

URL: http://www.heule.com/images/stories/pdf/COFA_Micro_Dokumentation_V1-0_DE.pdf

[Zugriff am 8. Februar 2014].

Heun GmbH, 2015. *Heun GmbH*. [Online]

URL: <http://heun-gmbh.de/erodierbohren-innovativ-vielseitig-interessant/>

[Zugriff am 6. April 2016].

Hiersig, H. M., 1995. *VDI - Lexikon Maschinenbau*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Hirsch, A., 2012. *Werkzeugmaschinen - Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 2. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.

HMP Umformtechnik GmbH, 2014. *Heinrich Müller Pforzheim Umformtechnik*. [Online]

URL: http://www.hmp.de/cms/upload/Rundkneten_D.pdf

[Zugriff am 10. Juli 2014].

Hoepke, E. et al., 2008. *Nutzfahrzeugtechnik*. 5. Auflage, Hrsg. Wiesbaden:

Vieweg+Teubner-Verlag.

Hoffmann, H., Neugebauer, R. & Spur, G., 2012. *Handbuch Umformen*. 2. Auflage, Hrsg.

München: Carl Hanser-Verlag.

Hopf, W., Bast, J., Lang, L. & Lippek, P., 1998. *Verfahren zum Gießen von Hohlkörpern*.

Deutschland, Patentnr. DE1996153668.

J.W. Done Company, 2016. *VSH Siegfried Hermann e. K.*. [Online]

URL: <http://www.vsh-hermann.de/pdf/orbitoolgebr.pdf>

[Zugriff am 01. Jänner 2017].

Jain, R. K., Jain, V. K. & Kalra, P. K., 1999. Modelling of abrasive flow machining process: a neural network. *Wear*, 29 July, Band 231, Ausgabe 2, S. 242-248.

Jenoptik AG, 2009. *Jenoptik AG*. [Online]

URL: [http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/OPTI-SENS_camshaft_DE.pdf/\\$file/OPTI-SENS_camshaft_DE.pdf](http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/OPTI-SENS_camshaft_DE.pdf/$file/OPTI-SENS_camshaft_DE.pdf)

[Zugriff am 16. November 2014].

Jenoptik AG, 2009. *Jenoptik Industrielle Messtechnik*. [Online]

URL:

[http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/IPS10_%20EN.pdf/\\$file/IPS10_%20EN.pdf](http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/IPS10_%20EN.pdf/$file/IPS10_%20EN.pdf)

[Zugriff am 25. November 2014].

Jenoptik AG, 2009. *Jenoptik Industrielle Messtechnik*. [Online]

URL:

[http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/IPS100_%20EN.pdf/\\$file/IPS100_%20EN.pdf](http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/IPS100_%20EN.pdf/$file/IPS100_%20EN.pdf)

[Zugriff am 24. November 2014].

Kache, H., Nickel, R. & Quitter, D., 2010. *Konstruktionspraxis*. [Online]

URL: <http://files.vogel.de/vogelonline/pdfarticles/253/9/253952.pdf>

[Zugriff am 8. Juli 2015].

Kalpakjian, S., Schmid, S. & Werner, E., 2011. *Werkstofftechnik - Herstellung, Verarbeitung, Fertigung*. 5. Auflage, Hrsg. München: Pearson Studium.

Kaufmann, 1988. *Arbeitsanweisung zur Berechnung und zum Eintrag der "K"-Zahlen in den Fertigungsplan*. Stuttgart: Daimler Benz AG.

Kegel, K., 1961. *Die Praxis der induktiven Wärmebehandlung*. 1. Auflage, Hrsg.

Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag.

Kempf GmbH, 2012. *Magazin des Verbandes deutscher Werkzeug- und Formenbauer e.V.*

[Online]

URL: <http://www.vdww-im-dialog.de/wissen-und-wandel/werkzeug-sonderloesungen-von-kempf-steigern-produktivitaet>

[Zugriff am 10. August 2015].

Kempf GmbH, 2013. Blaue Fasern für ein kraftvolles Entgraten. *Werkstatt + Betrieb - Zeitschrift für spanende Fertigung*, Dezember 2013, Ausgabe 12/2013, S. 74.

Kempf GmbH, 2013. *Kempf Tools - Sonderwerkzeuge in Präzision*. [Online]

URL: <http://kempf-tools.de/PDF/GMOEntgrater.pdf>

[Zugriff am 3. Februar 2014].

- Kempf GmbH, 2014. *Kempf Tools - Sonderwerkzeuge in Präzision*. [Online]
URL: <http://kempf-tools.de/PDF/Entgratwerkzeuge.pdf>
[Zugriff am 22. Juni 2015].
- Kempf GmbH, 2014. *Kempf Tools - Sonderwerkzeuge in Präzision*. [Online]
URL: <http://kempf-tools.de/PDF/Entgratbuersten.pdf>
[Zugriff am 28. Jänner 2015].
- Kempf GmbH, 2015. *Kempf Tools - Sonderwerkzeuge in Präzision*. [Online]
URL: http://www.kempf-tools.de/Entgratwerkzeuge_3_2.html
[Zugriff am 11. August 2015].
- Kennametal, 2008. *Innovative Entgrat- und Oberflächentechnologien*. [Online]
URL: http://www.stroemungsschleifen.de/downloads/EH_Firmenbroschuere_DE_08.pdf
[Zugriff am 16. Juni 2014].
- Klein, F., 2010. *Industrielle Fertigung - Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik*. 4. Auflage, Hrsg. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel-Verlag.
- Klocke, F. & König, W., 2005. *Fertigungsverfahren 2 - Schleifen, Honen, Läppen*. 4. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Klocke, F. & König, W., 2006. *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. 5. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Klocke, F. & König, W., 2007. *Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung*. 4. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Kluge, M., 2010. *Auslegung, Erprobung und Fertigung von hohlen Getriebewellen für Schwere Nutzfahrzeuge*, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart: Shaker-Verlag.
- Kluge, M., 2015. *Getriebewelle sowie Verfahren zur Herstellung einer Getriebewelle*. Deutschland, Patentnr. DE2003105074.
- Kluge, M. & Schmid, A., 2008. *Verfahren zum Schleudergießen einer Hohlwelle mit variablem Innendurchmesser*. Deutschland, Patentnr. DE200810021906.
- Kolbe, P., Schmitz, E. P. & Körner, T., 2012. *Verfahren zur Herstellung eines rotationssymmetrischen hohlen Teils und danach hergestelltes hohles Teil*. Deutschland, Patentnr. DE201210104413.
- Kopecky, A. & Schamschula, R., 1961. *Mechanische Technologie*. 2. Auflage, Hrsg. Wien: Springer-Verlag.

Läpple, V., 2006. *Wärmebehandlung des Stahls*. 9. Auflage, Hrsg. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel.

Lasco Umformtechnik GmbH, 2013. Up grade. *Vorformen und Umformen mit Walzen (Teil 1): Walztechnologie mit Zukunft*, August 2013, Ausgabe 30, S. 4-5.

Lasco Umformtechnik Werkzeugmaschinenfabrik, 2012. *Lasco Umformtechnik Werkzeugmaschinenfabrik*. [Online]

URL:

http://lasco.de/umformtechnik/media/archive2/technische_informationen/QuerkeilundReckwalzen_2012_D.pdf

[Zugriff am 7. Juli 2015].

Lochmann, K., 2013. *Formelsammlung Fertigungstechnik*. 3. Auflage, Hrsg. München: Carl Hanser-Verlag.

Maag, U., 2003. Kleinste Bohrungen automatisch und präzise kalibrieren: Neue Möglichkeiten in der Bearbeitung von Kleinstbohrungen. *F+M Mechatronik - Sonderteil Mikroproduktion*, Ausgabe 1/2003, S. 20-23.

Macherauch, E. & Zoch, H. W., 2011. *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.

Maier, H. J., Niendorf, T. & Bürgel, R., 2015. *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. 5. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Springer-Verlag.

Manjot, C. S., Gudipadu, V., Akshay, . D. & Apurbba, . S. K., 2012. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 8. Oktober 2012, S. 1951-1962.

Martin, D. et al., 2010. Multi-modal defect detection of residual oxide scale on a cold stainless steel strip. *Machine Vision an Applications*, 13. April 2010, Band 21, 5. Ausgabe, S. 653-666.

Maschinen- und Apparatebau Götzen GmbH, 2013. *Maschinen- und Apparatebau Götzen GmbH*. [Online]

URL: <http://www.mae-group.com>

[Zugriff am 13. Juni 2015].

Maschinen- und Apparatebau Götzen GmbH, 2013. *Maschinenmarkt Vogel*. [Online]

URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de>

[Zugriff am 21. Juli 2015].

Mc Cafferty, E., 2010. *Introduction to Corrosion Science*. 1. Auflage, Hrsg. New York/Dordrecht/Heidelberg/London: Springer-Verlag.

Mercedes Benz AG, 2013. *Mercedes Benz AG*. [Online]

URL: [http://www.powertrain.mercedes-](http://www.powertrain.mercedes-benz.com/content/powertrain/mpc/mpc_powertrain_website/de/home_mpc/powertrain/home_company/brochures.flash.html)

[benz.com/content/powertrain/mpc/mpc_powertrain_website/de/home_mpc/powertrain/home_company/brochures.flash.html](http://www.powertrain.mercedes-benz.com/content/powertrain/mpc/mpc_powertrain_website/de/home_mpc/powertrain/home_company/brochures.flash.html)

[Zugriff am 23. Juni 2015].

Mutschmann, J. & Stimmelmayer, F., 2002. *Taschenbuch der Wasserversorgung*. 13. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien-Verlag.

Oelheld GmbH, 2011. *Oelheld GmbH*. [Online]

URL: http://www.oelheld.com/fileadmin/content/pages/Prospekte_pdf/oh_Senkerosion_dt.pdf

[Zugriff am 1. Juni 2014].

Padovan, S., Hübisch, B. & Fritsche, B., 2009. *Verlorener Kern*. Deutschland, Patentnr. DE 10 2008 002 376 A1.

Pahnke, H. J., 2000. *Vorrichtung zur hydromechanischen Entzunderung*. Deutschland, Patentnr. EP20000123086.

Pemtec GmbH, 2009. Die elektrochemische Werkzeugmaschine - Strom als Werkzeug. *spezial tooling - Das Fachmagazin für den Werkzeug und Formenbau*, November 2009, Ausgabe 5-6/2009, S. 16-19.

Perovic, B., 2000. *Spanende und abtragende Fertigungsverfahren: Grundlage und Berechnung*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag.

Peters, S., Kalweit, A., Paul, C. & Wallbaum, R., 2012. *Handbuch für Technisches Produktdesign*. 2. Auflage, Hrsg. Heidelberg/Dordrecht/London/New York: Springer-Verlag.

PFERD Werkzeuge, 2015. *PFERD Werkzeuge*. [Online]

URL: http://www.pferd.com/images/WZH_22_Katalog_203_72dpi_de.pdf

[Zugriff am 6. Juli 2015].

Piller Entgrattechnik GmbH, 2014. *Piller Entgrattechnik GmbH*. [Online]

URL: <http://www.piller-online.com/upload/pdf/Piller-Broschuere-2011-deutsch.pdf>

[Zugriff am 25. Februar 2014].

- Pöhlandt, K. et al., 1990. *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. 2. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Poprawe, R., 2005. *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Prüller, H., 2012. *Praxiswissen Gleitschleifen - Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.
- Radaj, D. & Vormwald, M., 2007. *Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure*. 3. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- Raedt, H. W. & Quintenz, G., 2009. FEM-optimierte Leichtbau-Hohlwelle für das Getriebe. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Dezember 2009, Band 111, Ausgabe 12, S. 922-925.
- Raedt, H. W., Speckenheuer, U. & Vollrath, K., 2012. Neue massivumgeformte Stähle: Energieeffiziente Lösungen für leistungsfähigere Bauteile. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 24 Februar, Band 114, Ausgabe 3, S. 200-205.
- Raedt, H. W., Wilke, F. & Ernst, C. S., 2014. Initiative Massiver Leichtbau: Leichtbaupotenziale durch Massivumformung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, März 2014, Band 116, Ausgabe 3, S. 58-64.
- Rau, G. & Ströbel, R., 1999. *Grundwissen für Zahntechniker: Die Metalle - Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen*. 1. Auflage, Hrsg. München: Neuer Merkur Verlag.
- Reutlinger, W. D. & Klump, H., 2013. Laufgütefragen in Fertigung und Betrieb. In: *Laufgütefragen in Fertigung und Betrieb*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 173-182.
- Rituper, R., 1993. *Beizen von Metallen*. 1. Auflage, Hrsg. Saulgau/Württ.: Eugen G. Leuze-Verlag.
- Roos, E. & Maile, K., 2015. *Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 5. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schiebold, K., 2015. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Magnetpulverprüfung*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Schiebold, K., 2015. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Schneidau, V., 2010. *Wirtschaftsvereinigung Stahl*. [Online]

URL: http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB212_Strahlen_von_Stahl.pdf

[Zugriff am 13. August 2014].

Schneidau, V., 2014. *Strahlportal*. [Online]

URL: <http://www.strahlportal.de/strahlanwendungen.99.0.html>

[Zugriff am 13. August 2014].

Schneider, H., 2013. *Auswuchttechnik*. 8. Auflage, Hrsg. Heidelberg: Springer-Verlag.

Seidel, W. & Frank, H., 2012. *Werkstofftechnik: Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung*. 9. Auflage, Hrsg. München: Carl Hanser-Verlag.

SGGT Hydraulik GmbH, 2009. *Umformtechnik*. [Online]

URL: http://www.umformtechnikmagazin.de/umformtechnik-fachartikel/neue-systemtechnik-beim-entzundern_9691_de/

[Zugriff am 25. Juni 2015].

Smith, A. E. & Slaughter, W., 1997. Neural Network Modeling of Abrasive Flow Machining. *Proc. of the Advanced Technology Program Motor Vehicle Manufacturing Technology Public Workshop, NIST Document, NISTIR*, Ausgabe 6079, S. 151-158.

SMS MEER, 2014. *SMS Meer GmbH*. [Online]

URL: http://www.sms-meer.com/fileadmin/user_upload/pdf/publication/schmiedetechnik/hydr_pressen/SMX_Radial_schmiedemachinen.pdf

[Zugriff am 29. Juli 2014].

TDK Maschinenbau GmbH, 2015. *TDK Maschinenbau GmbH*. [Online]

URL: <http://www.pinflow.de>

[Zugriff am 16. Juni 2015].

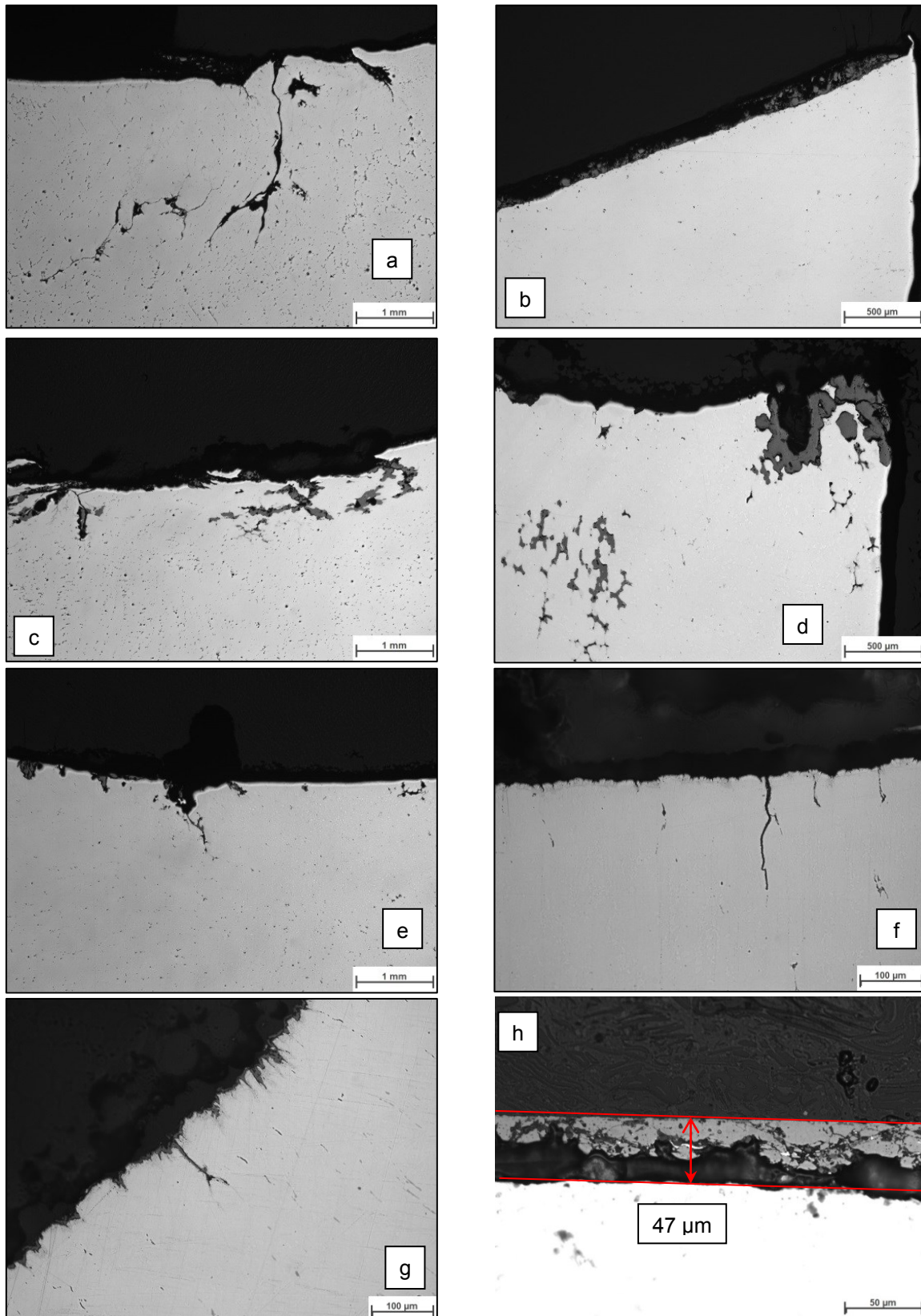
Thiel, S., 1988. *Automatisiertes Biegerichten*. 1. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Thilow, A. P. et al., 2008. *Entgrattechnik: Entwicklungsstand und Problemlösungen*. 3. Auflage, Hrsg. Renningen: Expert-Verlag.

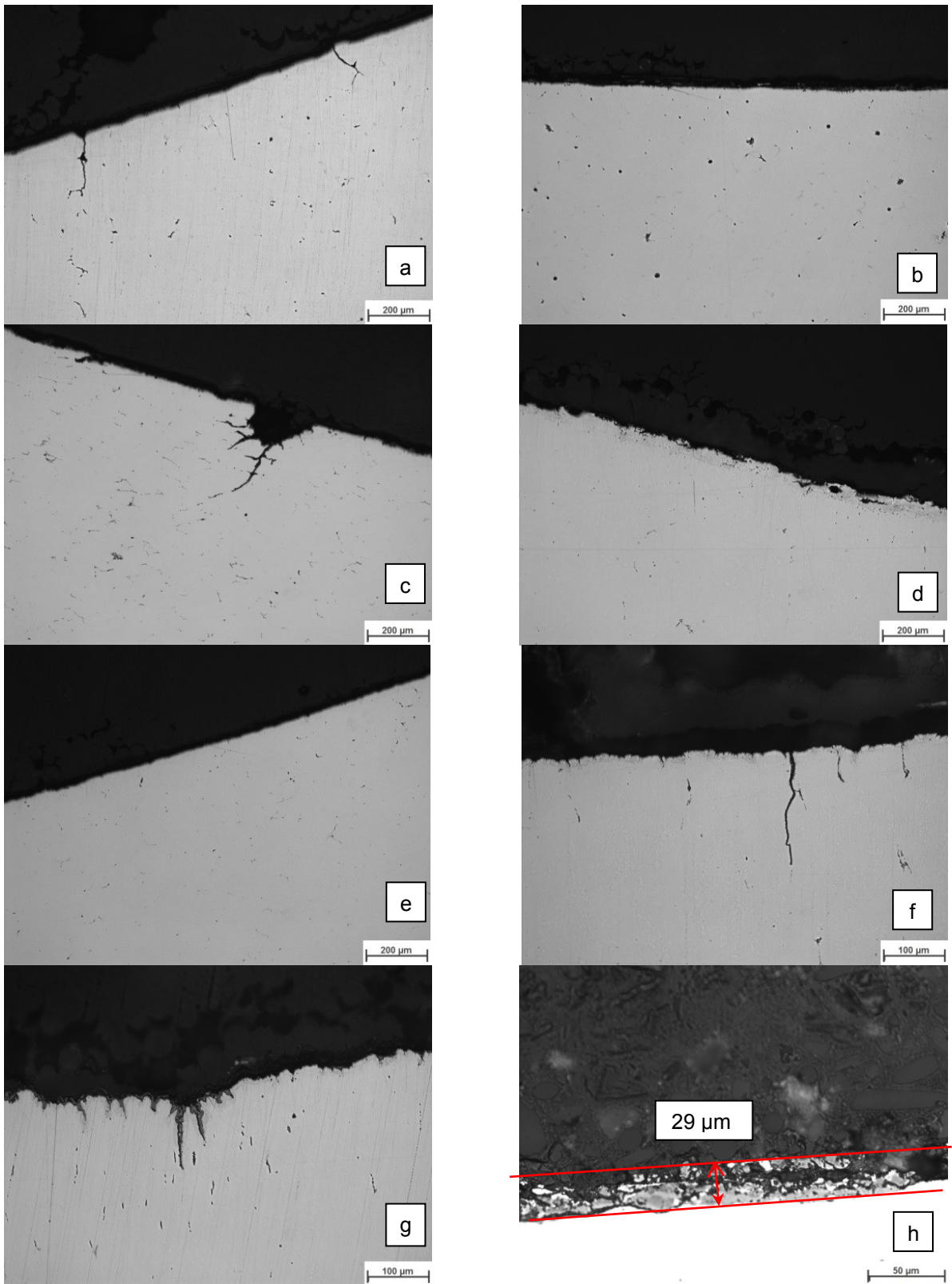
TTS Fertigungstechnologien GmbH, 2013. Kleinste Bohrungen gründlich Entgraten. *x-technik Fertigungstechnik*, November 2013, Ausgabe 6, S. 40-41.

- Väth, A., 1929. *Schleuderguss und seine metallkundliche Untersuchung, Dissertation, Technische Universität München*. Düsseldorf: Gießerei-Verlag.
- Vollrath, K., 2011. Robust und wirtschaftlich - Gängige Massivumformverfahren und typische Eigenschaften von Stahl-Schmiedeteile. *Der Konstrukteur - Magazin für Konstruktion und Entwicklung*, 27. Mai 2011, Ausgabe 6, S. 22-25.
- Vollrath, K., 2014. Erhebliche Leichtbaureserven in massivumgeformten Kfz-Bauteilen. *MaschinenMarkt*, Ausgabe 25, S. 34-36.
- VSH Siegfried Hermann e.K., 2005. Kein Rückgrat im Kreuz. *Maschine + Werkzeug*, Dezember 2005, S. 36-37.
- VSH Siegfried Hermann e.K., 2005. Maschinelles Entgraten von sich kreuzenden Bohrungen. *NC Fertigung - Das Fachmagazin für spangebende Bearbeitung*, November 2005, Ausgabe 07/2005, S. 136-138.
- Weck, M. & Brecher, C., 2005. *Werkzeugmaschinen 1: Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 6. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wegst, C. & Wegst, M., 2010. *Stahlschlüssel - Taschenbuch*. 22. Auflage, Hrsg. Marbach/N.: Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH.
- Weidel, S., 2013. Intelligenter Leichtbau durch Massivumformung. *Lightweight Design*, 1. April 2013, Band 6, Ausgabe 1, S. 34-38.
- Werkzeug Technik, 2008. Die Entgratspirale EW 100 S für die Innenentgratung durch die Zentralbohrung. *Werkzeug Technik*, 15. Dezember 2008, Ausgabe 106, S. 8.
- Werner, E., Hornbogen, E., Jost, N. & Eggeler, G., 2016. *Fragen und Antworten zu Werkstoffe*. 8. Auflage, Hrsg. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wessels, T., 2007. *Bohren in Titan- und Nickelbasislegierungen, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig*. Essen: Vulkan-Verlag.
- Westkämper, E. & Warnecke, H. W., 2010. *Einführung in die Fertigungstechnik*. 8. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.
- Wiemann, H., Eberle, U. & Soherr, A., 1992. *Metallfachkunde 5: Heizungs- und Raumlufttechnik*. 2. Auflage, Hrsg. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Wieser, R., 2005. *GFM Radial Schmieden - Technologie und Weiterentwicklung*. Teichalm, Lehrstuhl für Umformtechnik. Bruno Buchmayr, S. 229-243.

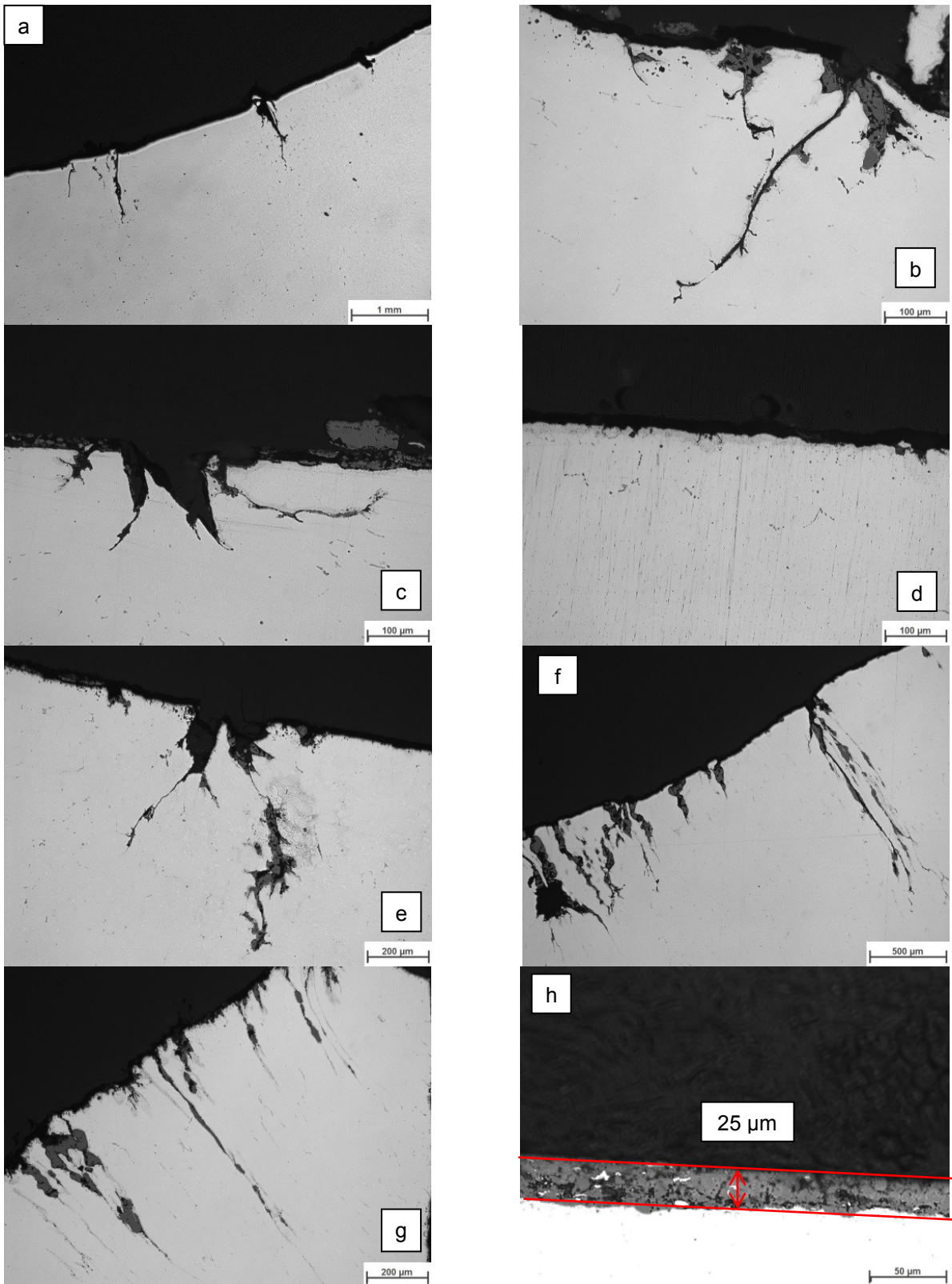
9. Anhang



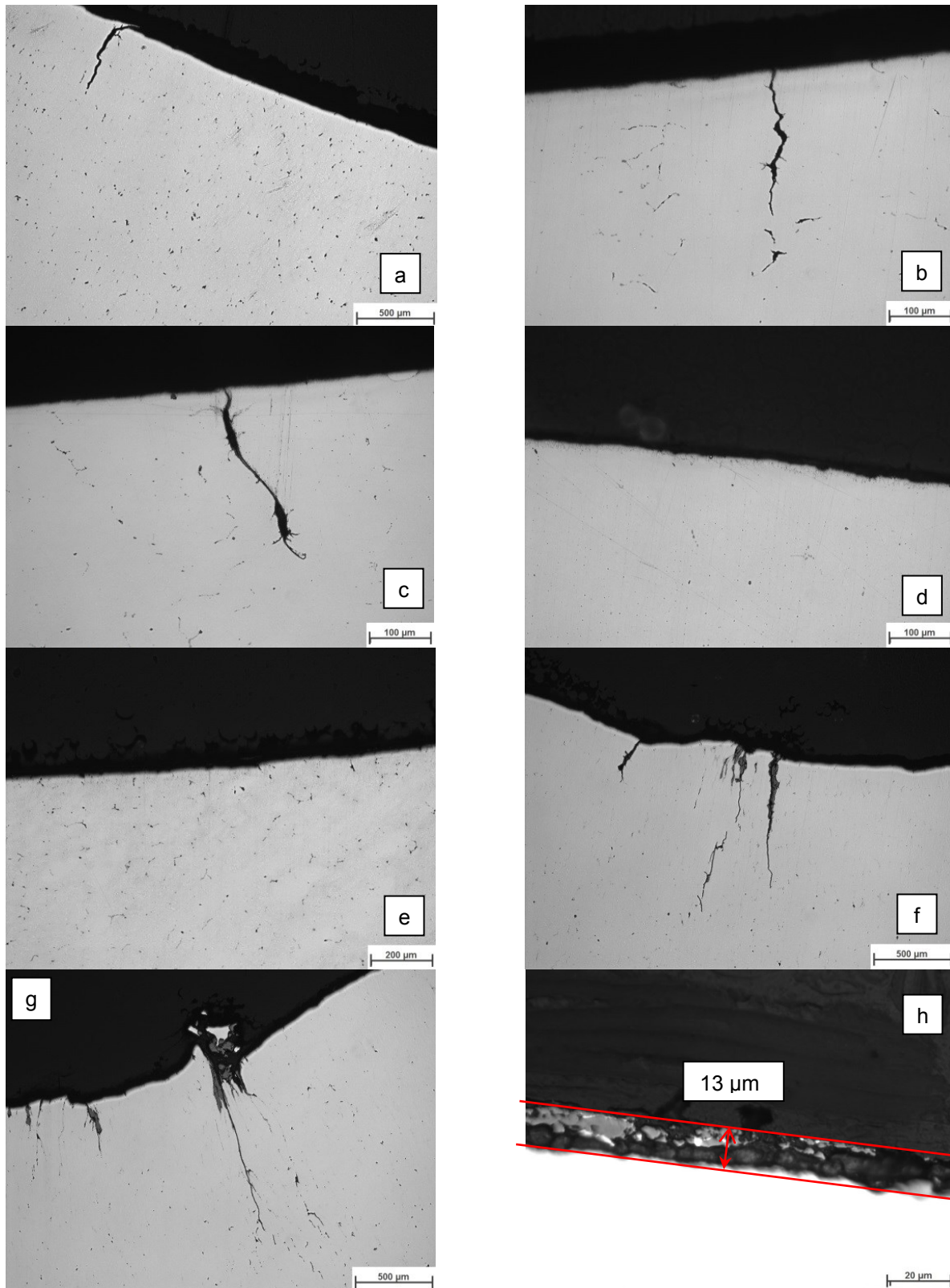
Anhang 1: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 388 bei 950 °C Schmiedetemperatur



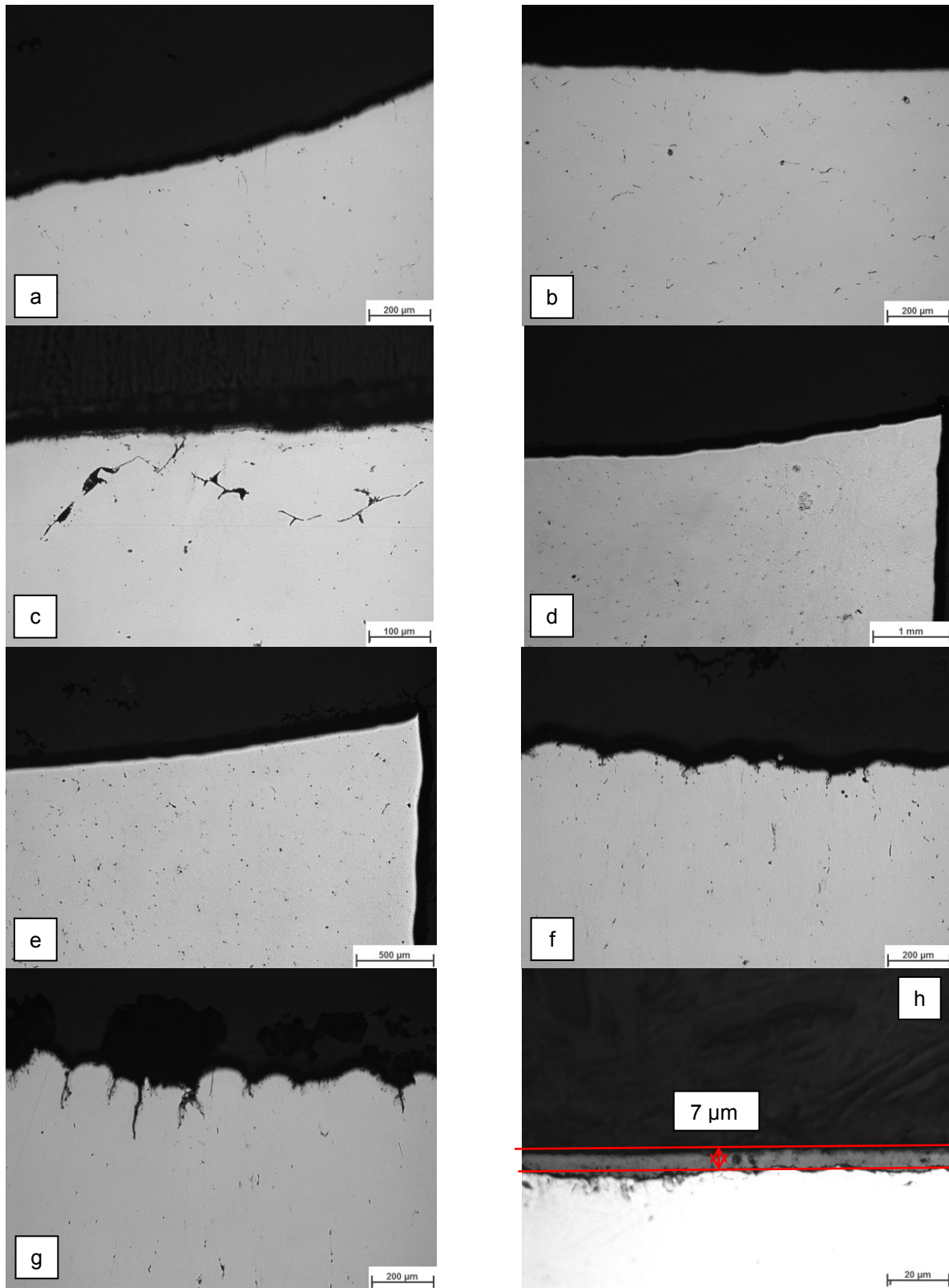
Anhang 2: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlißbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 335 bei 950 °C Schmiedetemperatur



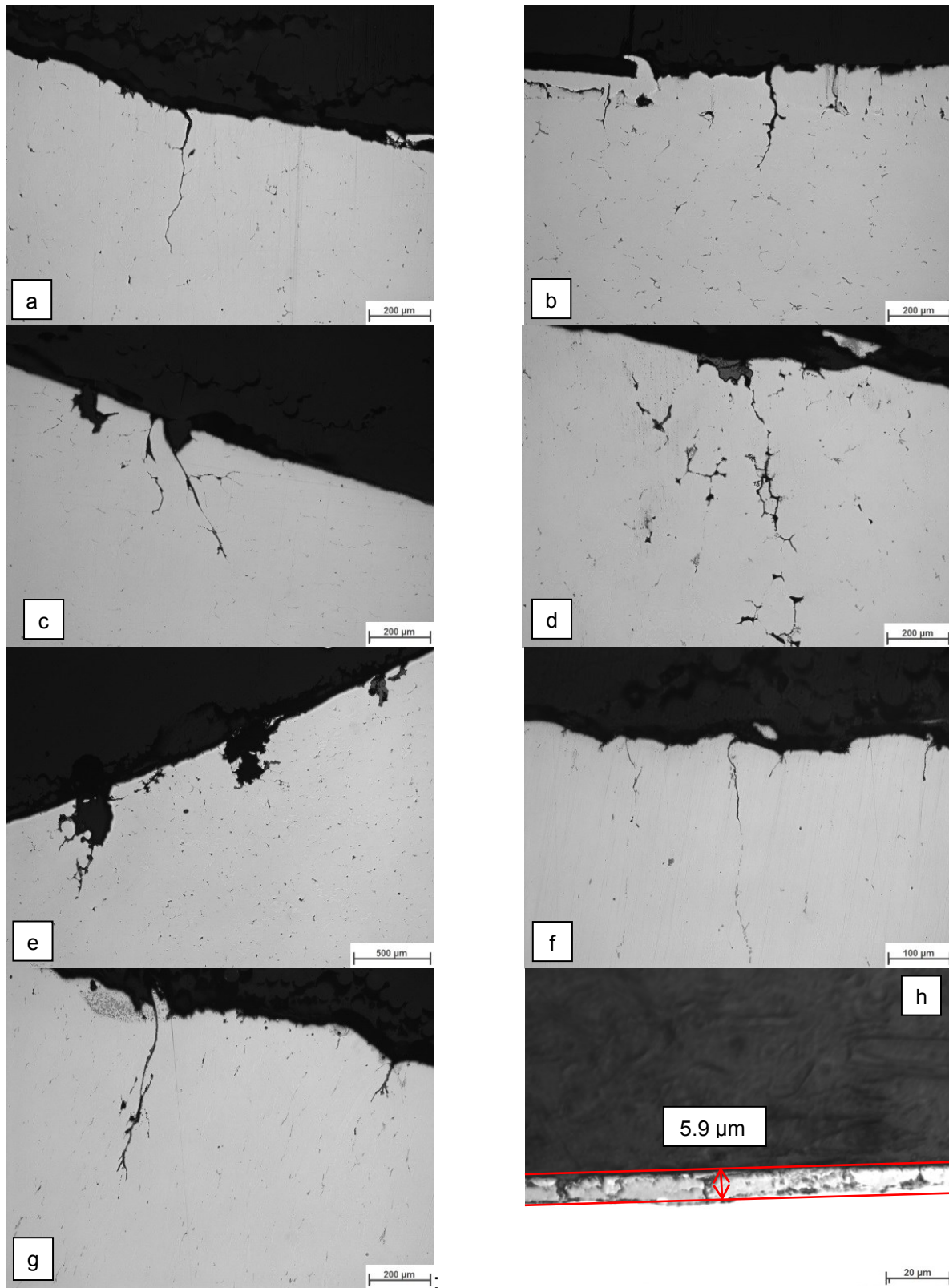
Anhang 3: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 350 bei 950°C Schmiedetemperatur mit Zunderschutzlack



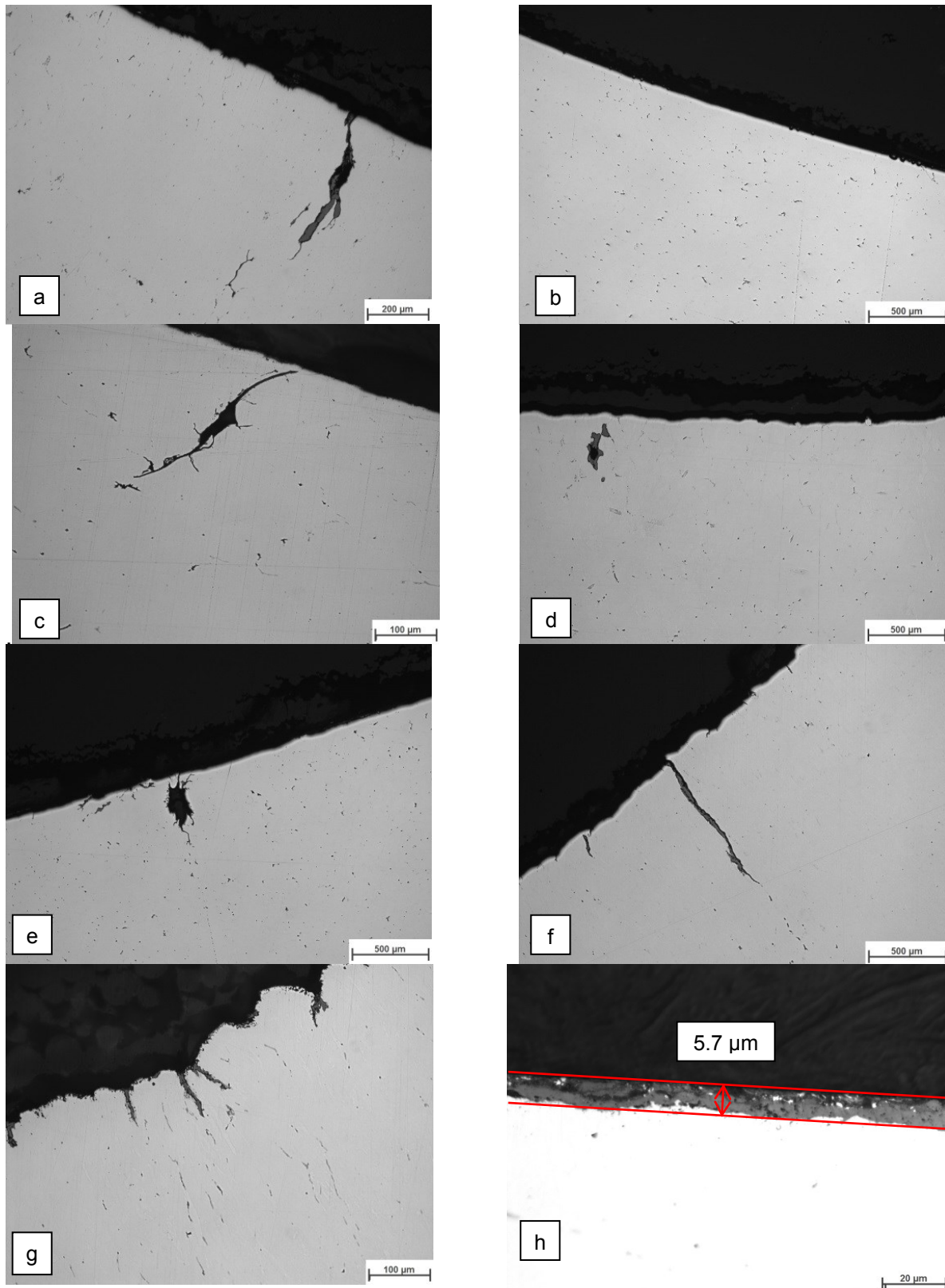
Anhang 4: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlifffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 343 bei 850°C Schmiedetemperatur



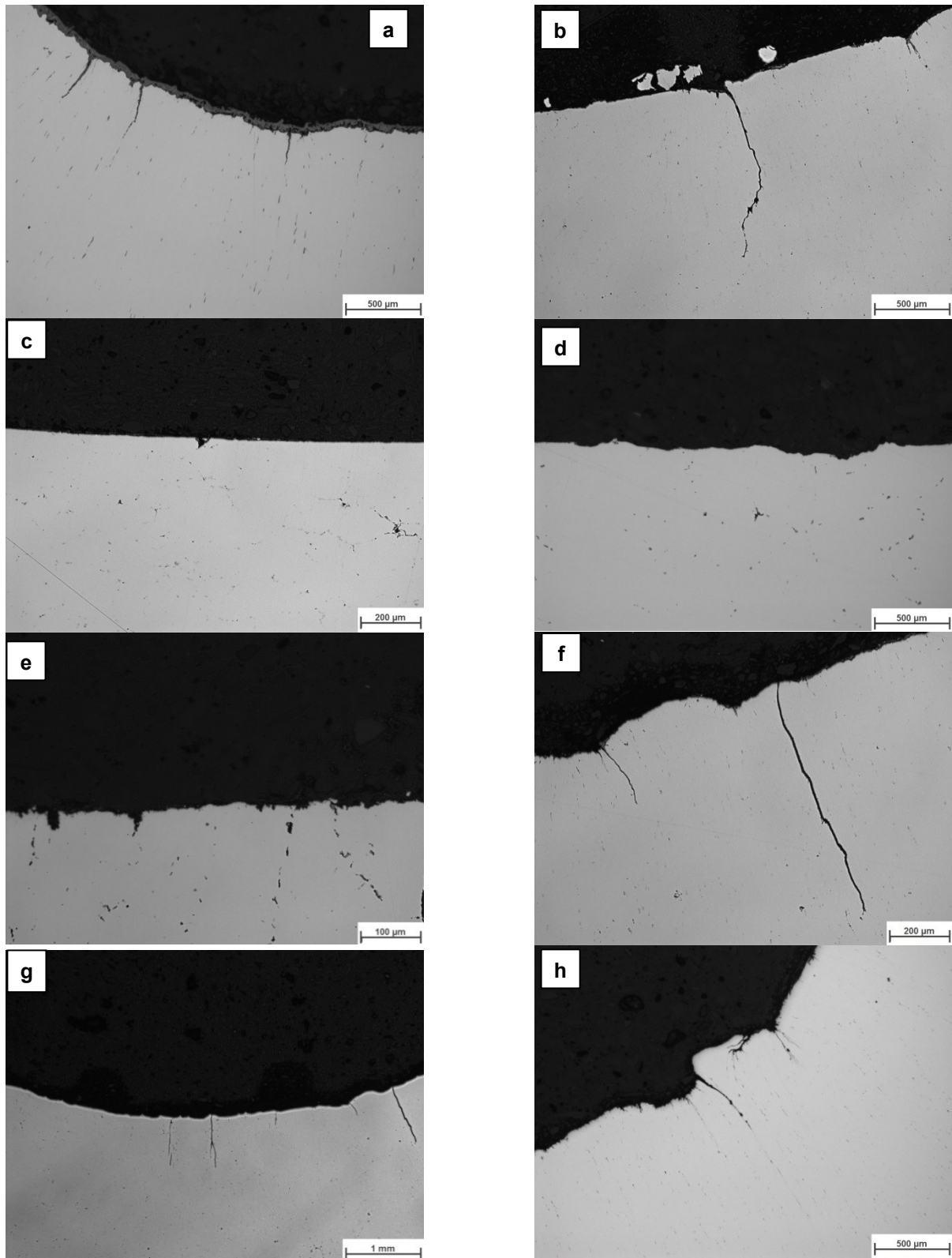
Anhang 5: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlibfbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 352 bei 850 °C Schmiedetemperatur mit Zunderschutzlack



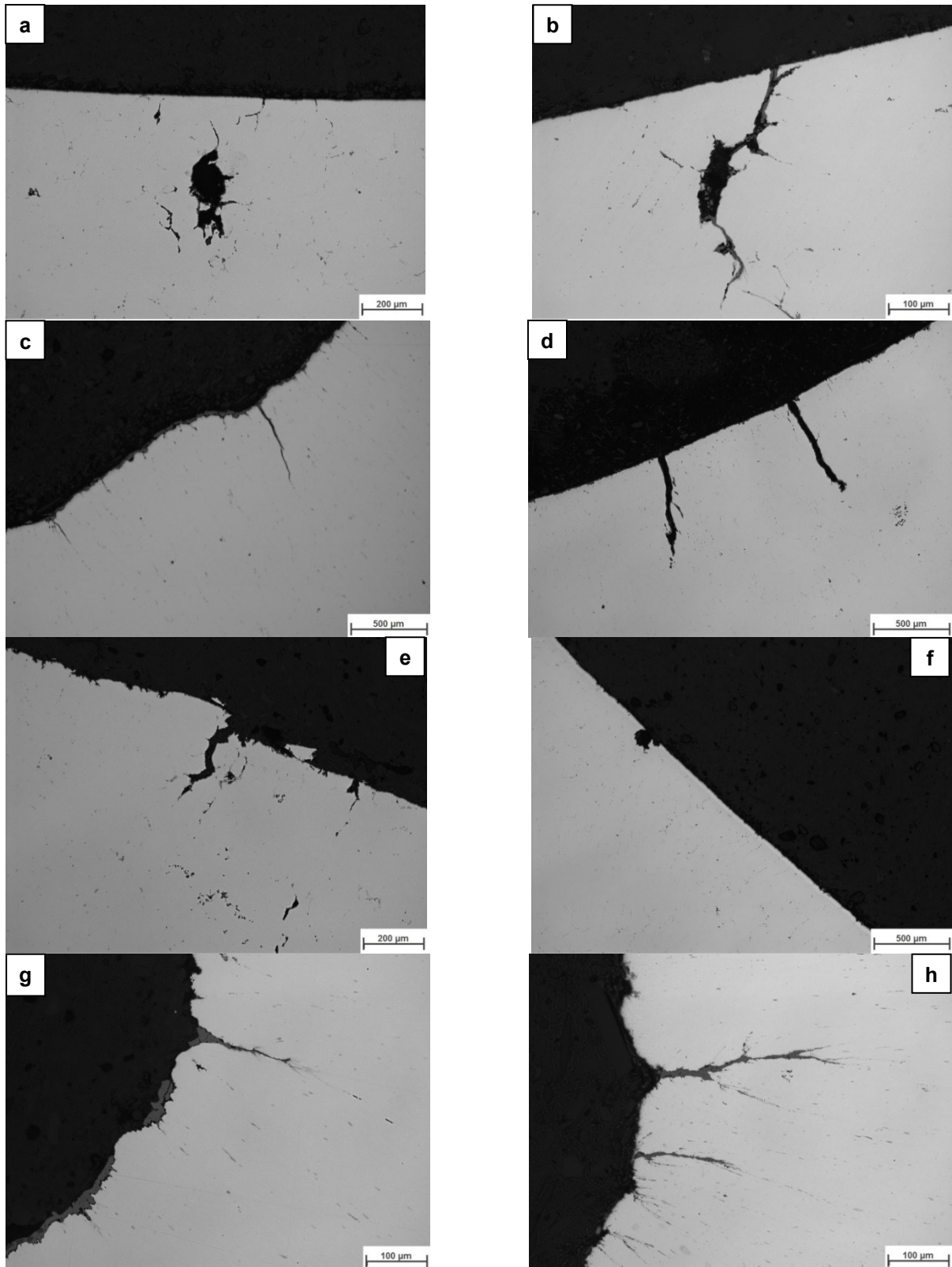
Anhang 6: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlifffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 382 bei 800 °C Schmiedetemperatur



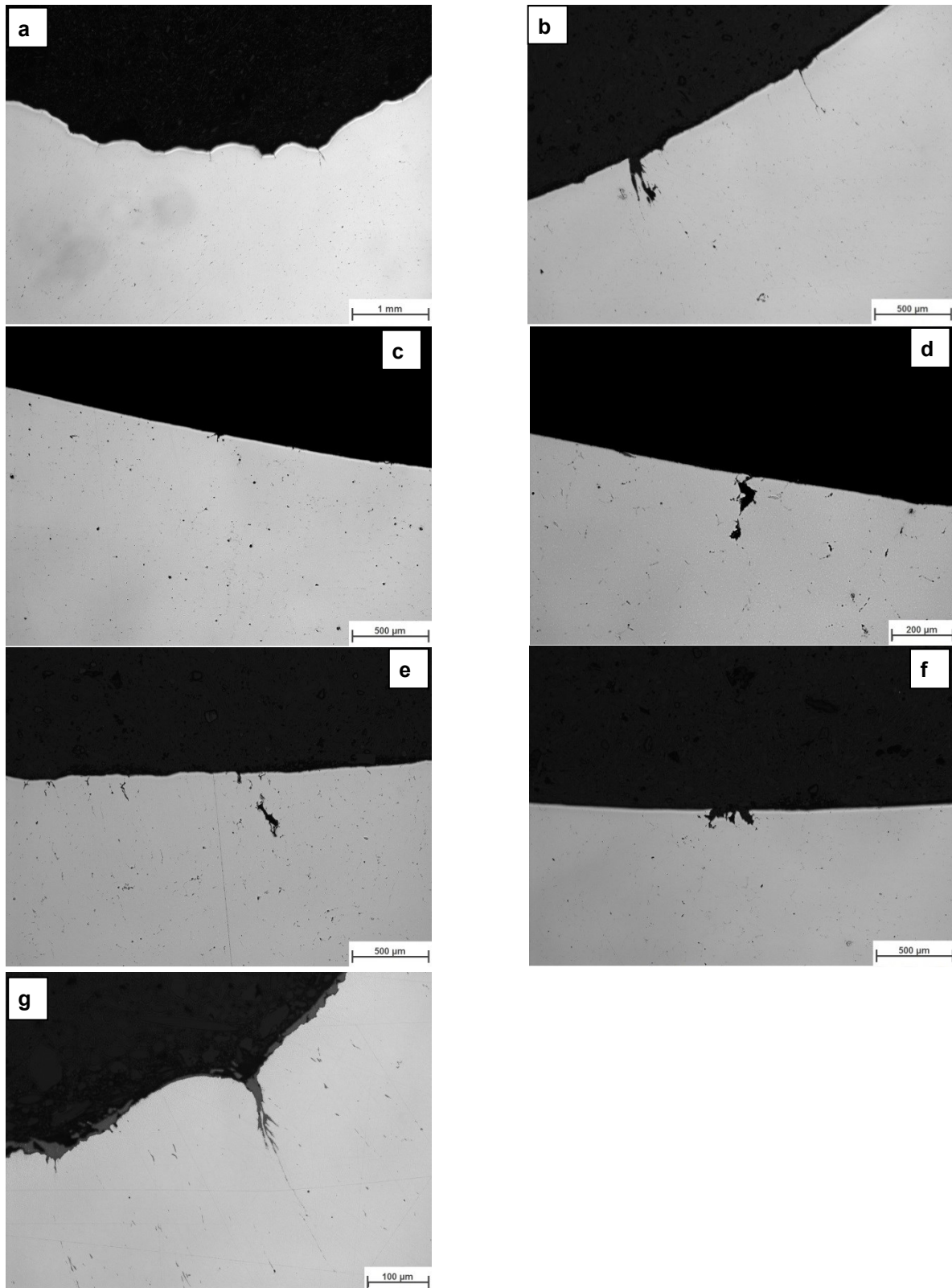
Anhang 7: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlifffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 385 bei 800 °C bei Schmiedetemperatur mit Zunderschutzlack



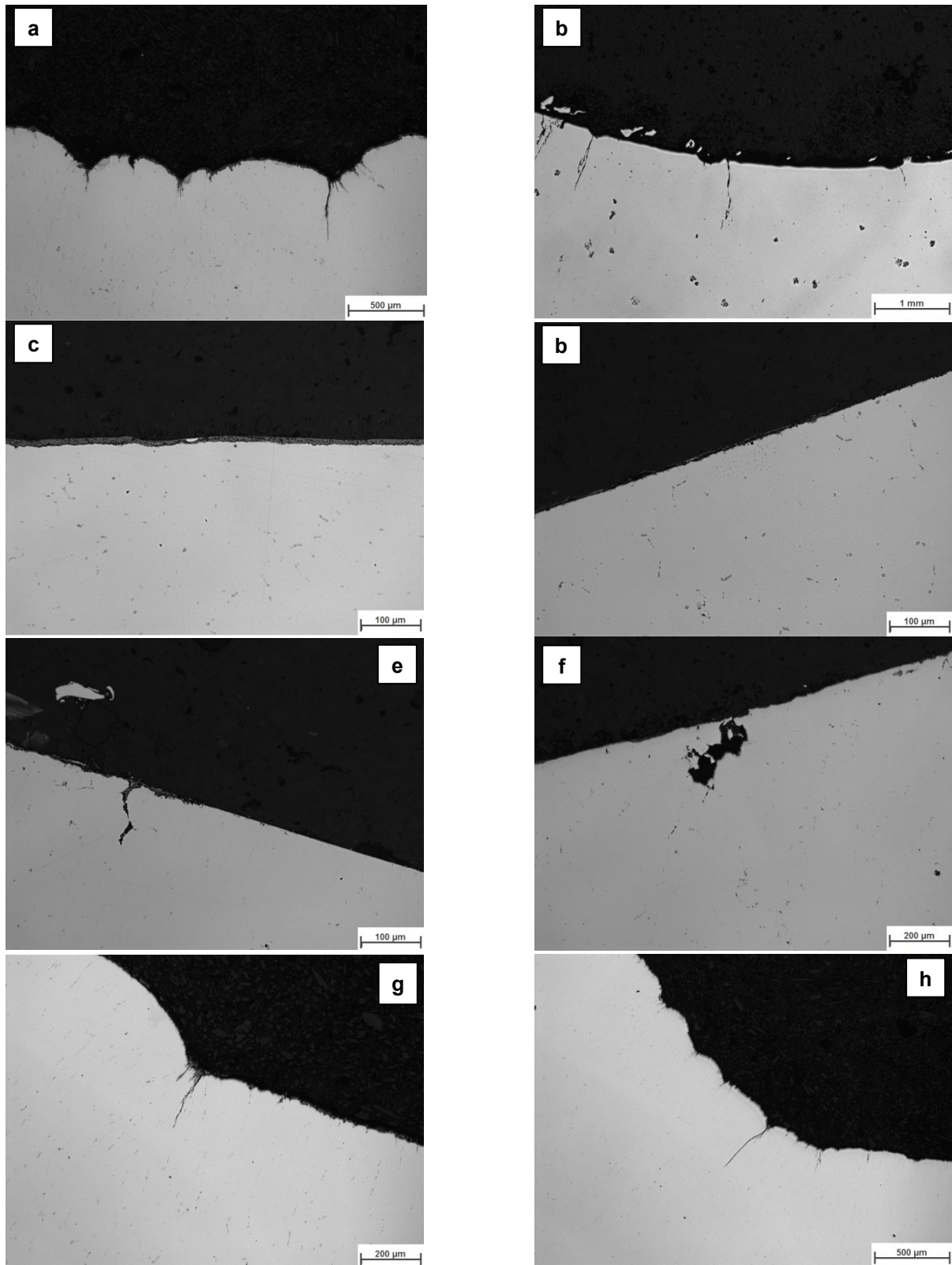
Anhang 8 Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 401 mit 650 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 850 °C; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseiten)



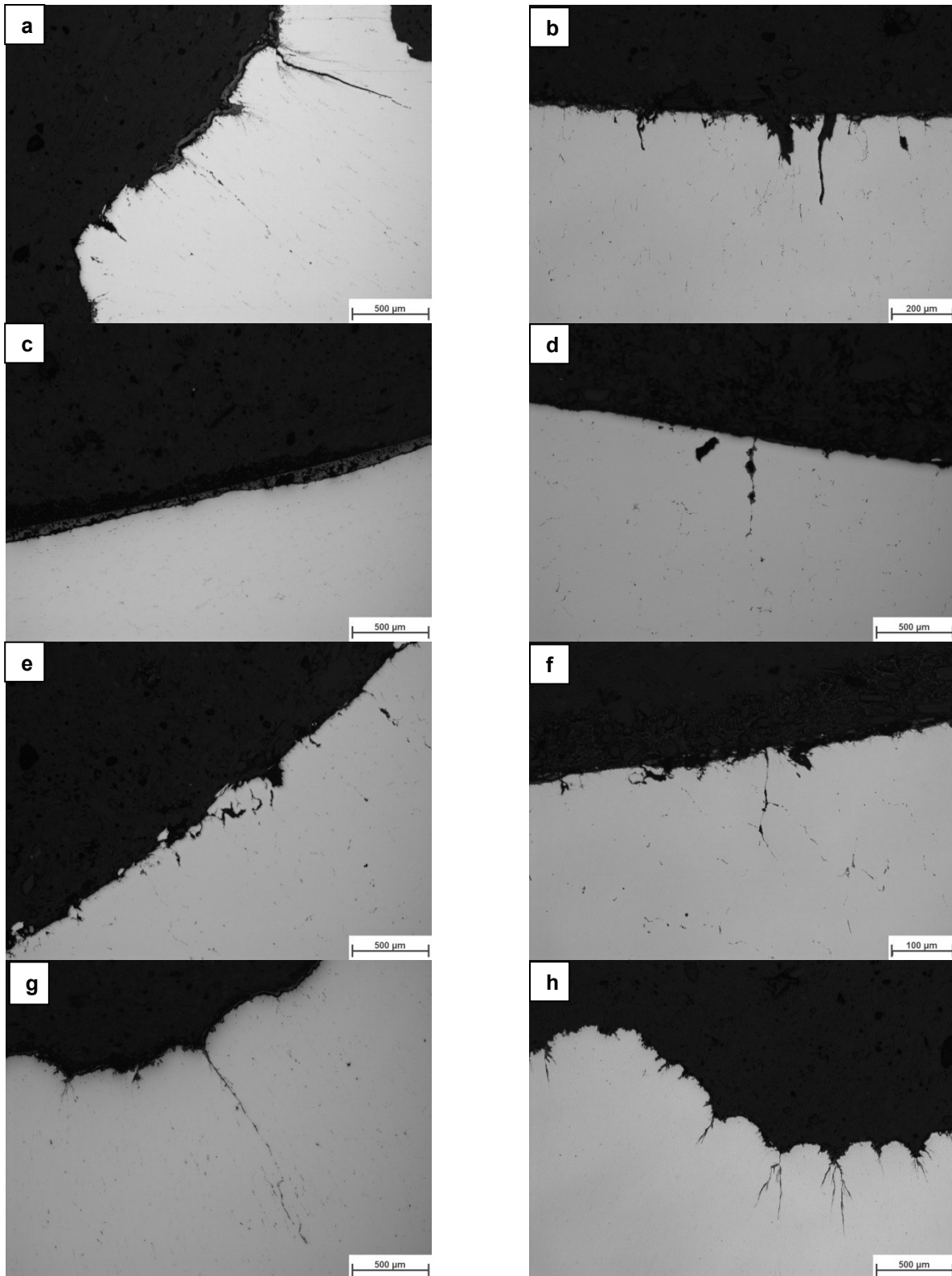
Anhang 9: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 404 mit 650 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 850 °C; einstufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



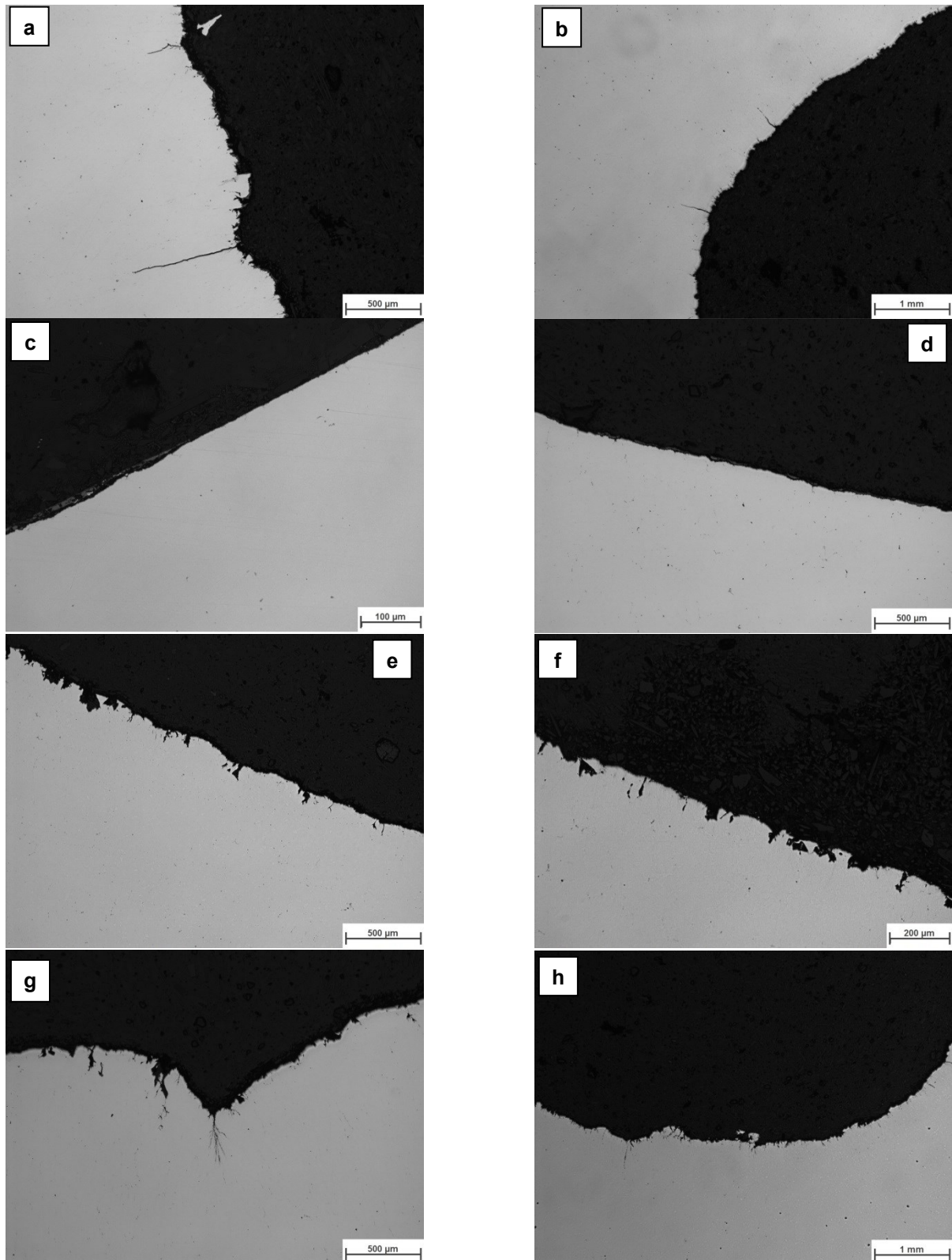
Anhang 10: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 406 mit 650 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 950 °C; einstufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



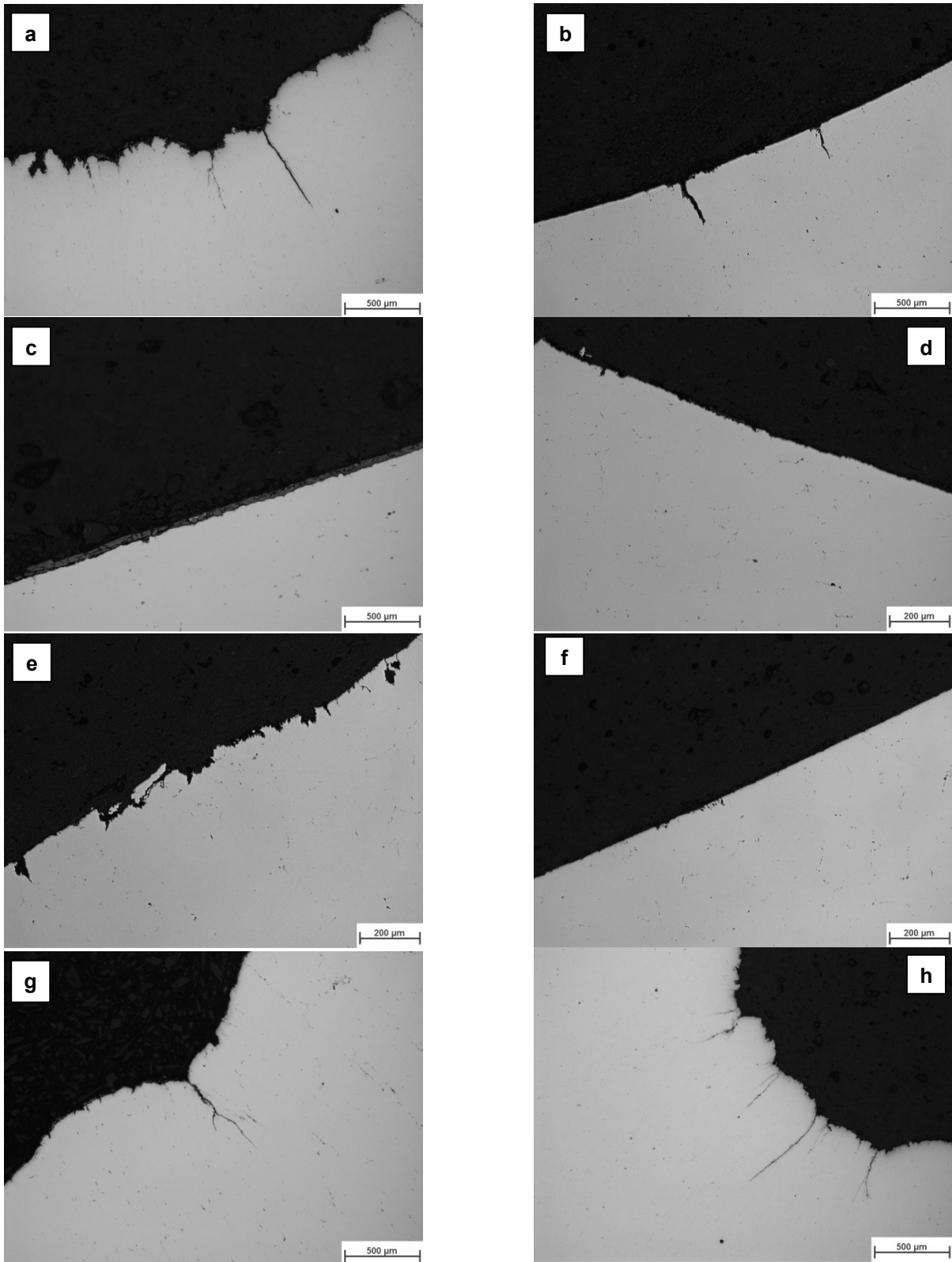
Anhang 11: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 409 mit 650 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 950 °C; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



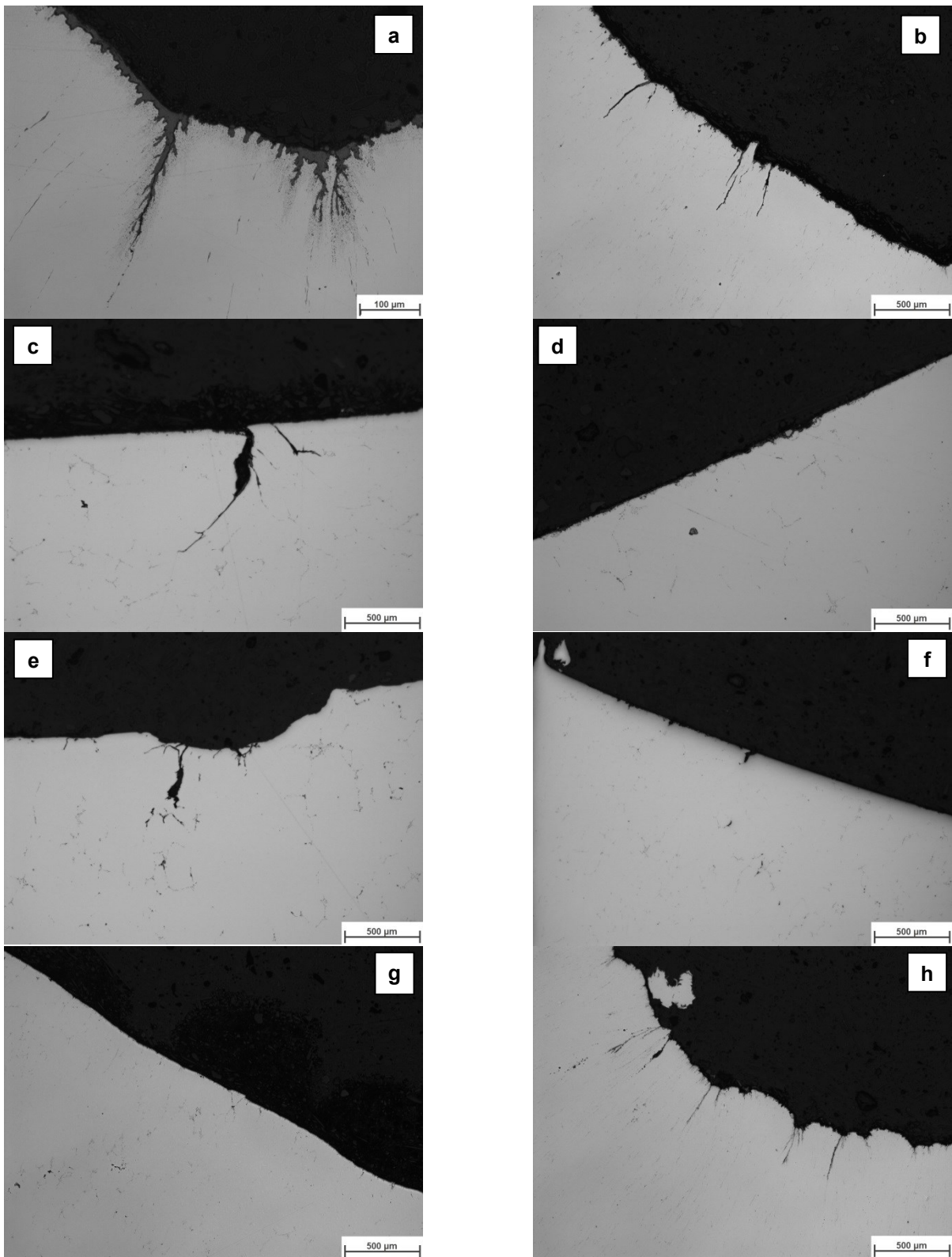
Anhang 12: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 411 mit 950 °C Ofenvorwärmung (ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten); einstufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



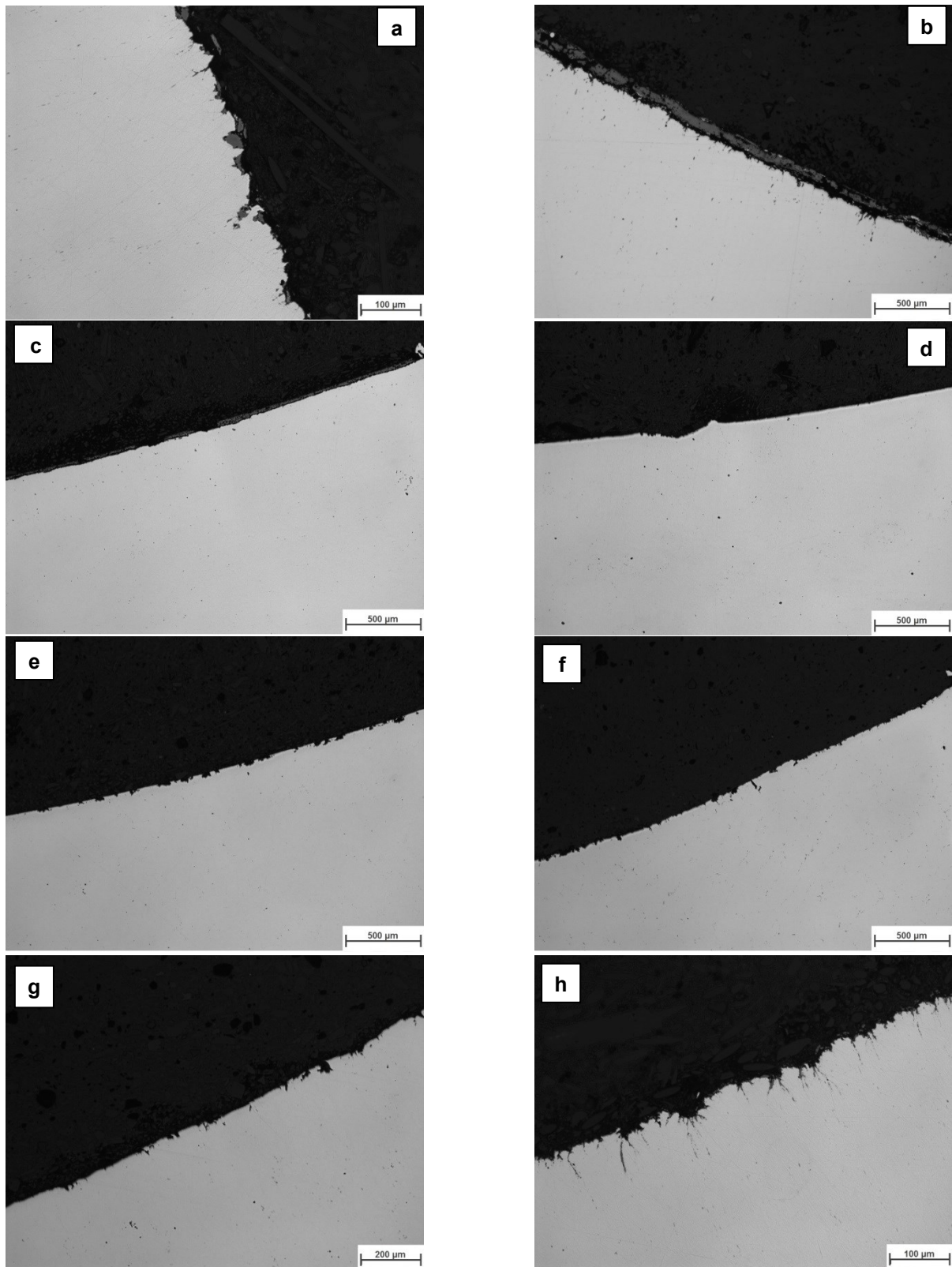
Anhang 13: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlifffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 415 mit 950 °C Ofenvorwärmung (ohne Nacherwärmung der beiden Werkstückseiten); zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Wellenseite)



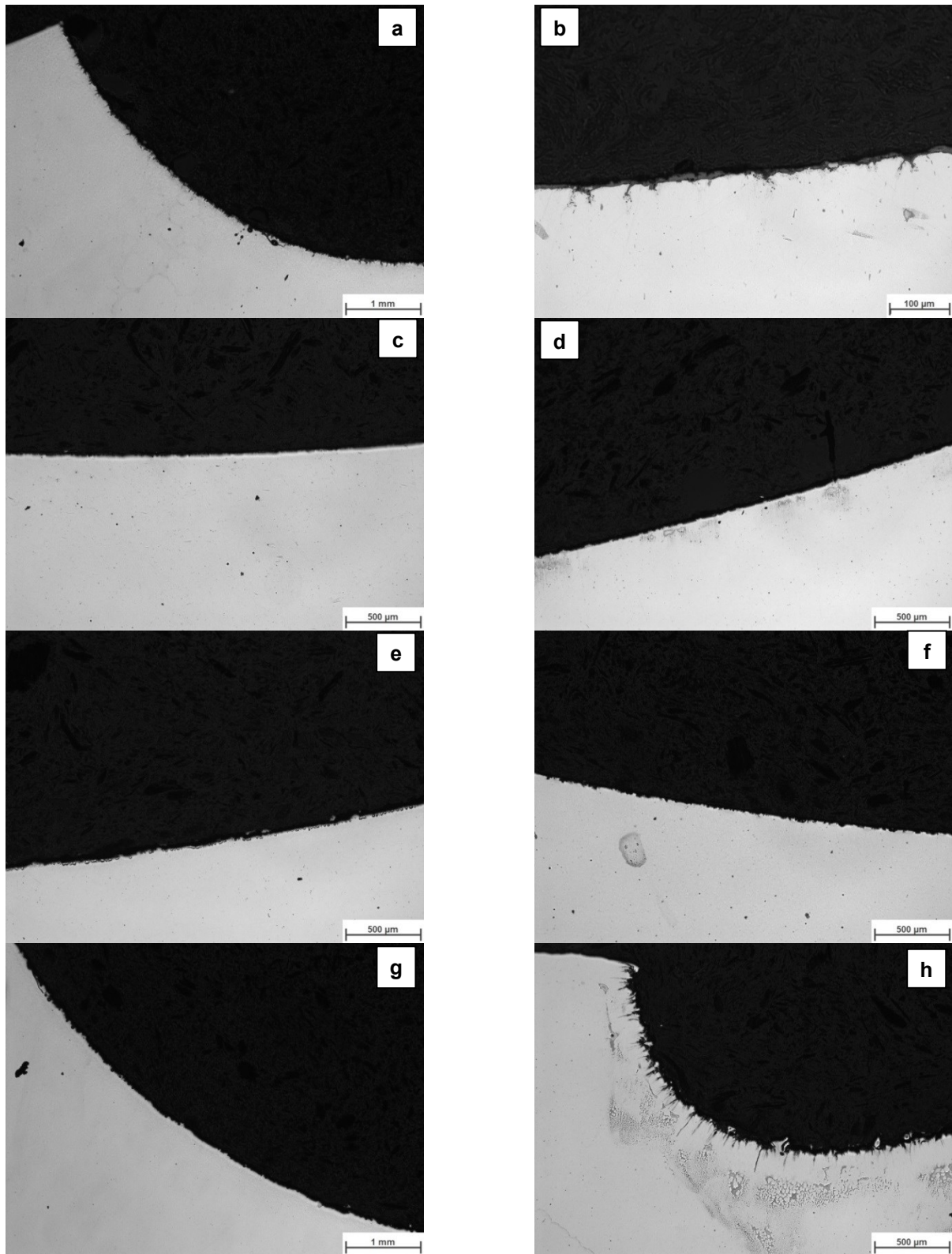
Anhang 14: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 419 mit 800 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 1000 °C; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



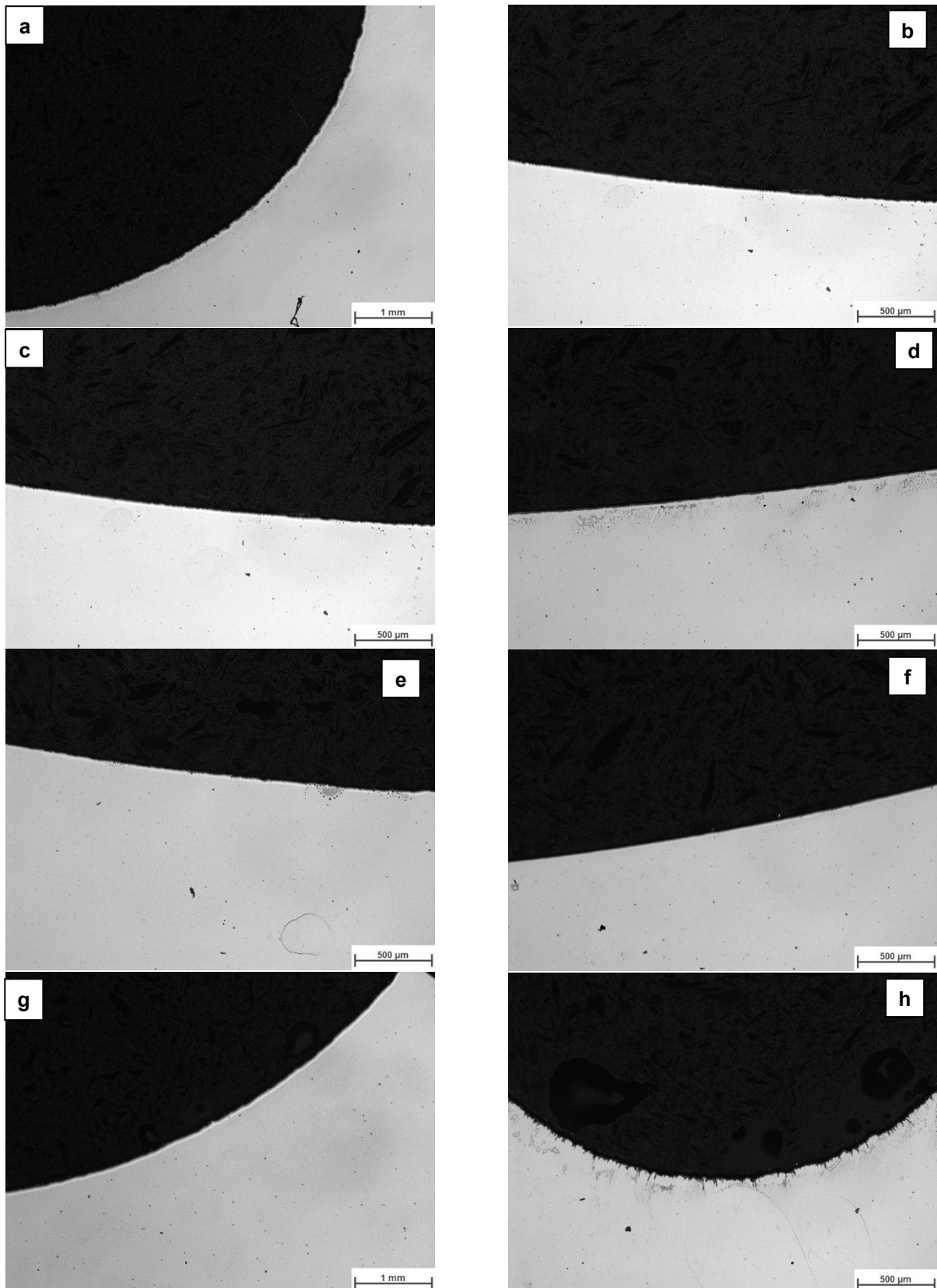
Anhang 15: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 422 mit 1000 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung der zweiten Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 1000 °C; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



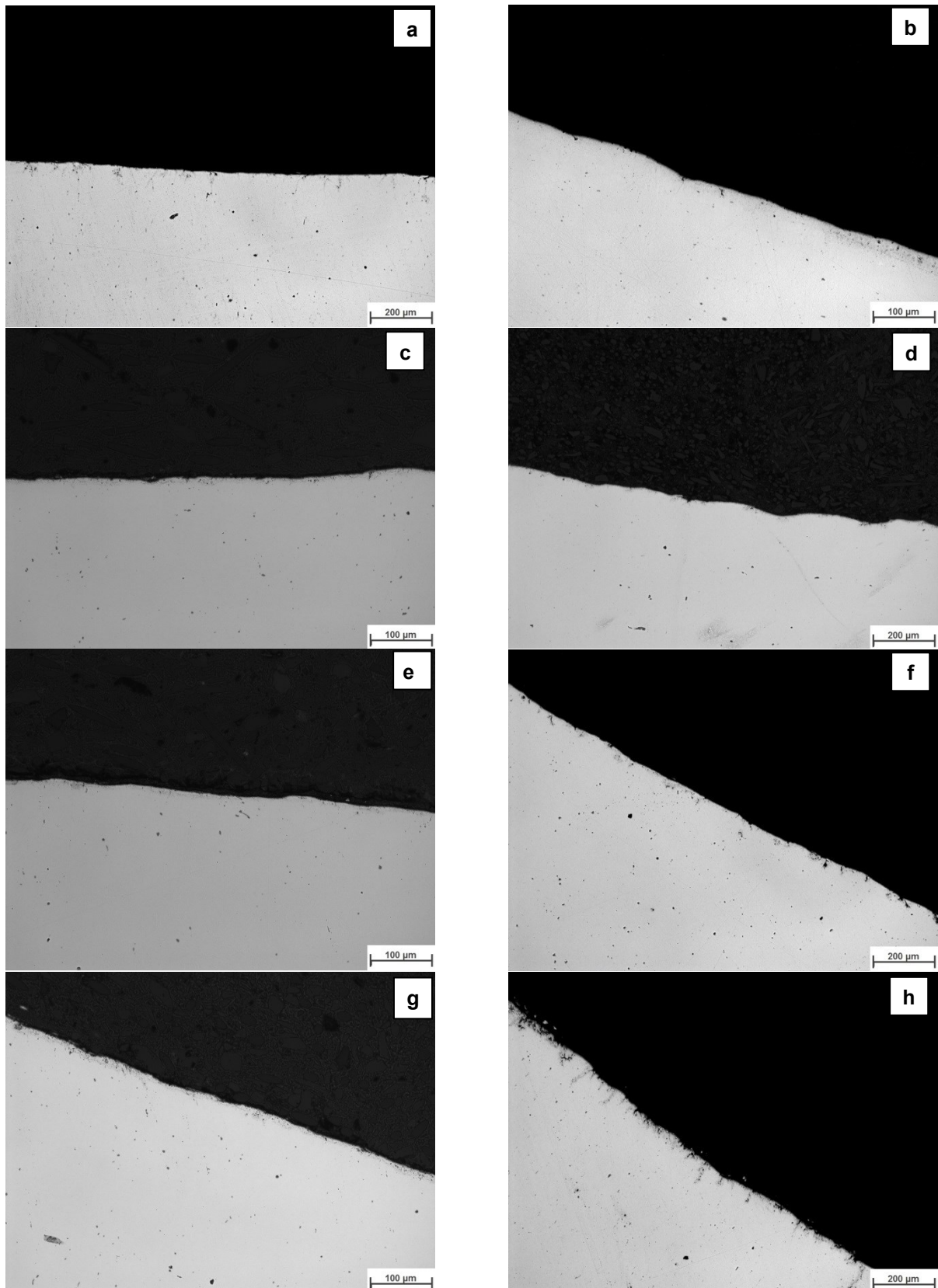
Anhang 16: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 423 (Halbzeug: Stahlrohr aus Ck35) mit 800 °C Ofenvorwärmung und Induktionserwärmung beider Werkstückseiten unmittelbar vor dem Schmieden auf 1000 °C; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



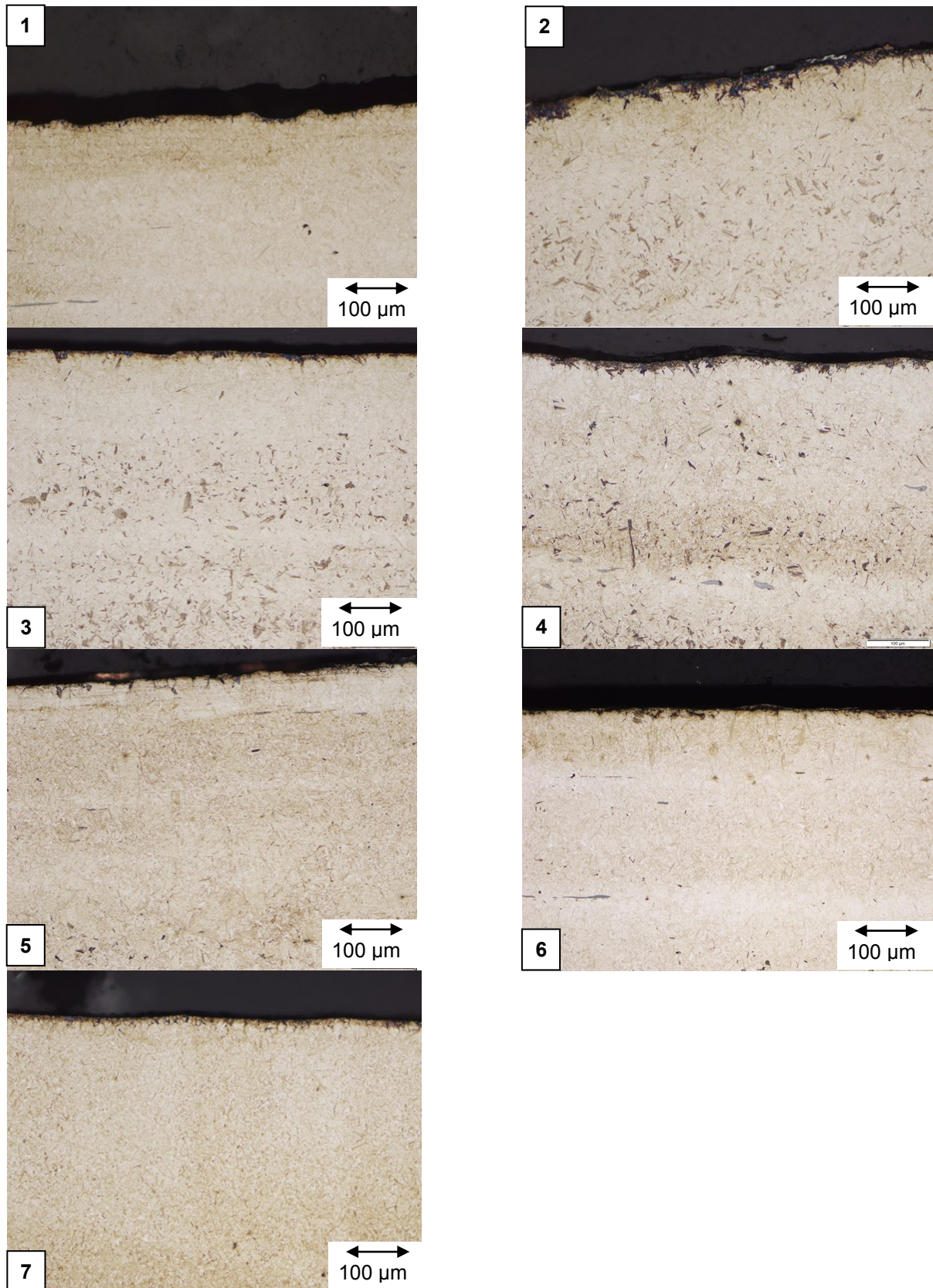
Anhang 17: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlibfbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 438 mit Ofenvorwärmung auf 800 °C, Induktionserwärmung Wellenseite 1 (935 °C) und 2 (950 °C) unmittelbar vor dem Schmieden; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



Anhang 18: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schlißbildern von ausgewählten Bereichen nach dem Schmieden der Welle 439 mit Ofenvorwärmung 650 °C, Induktionserwärmung Welleseite 1 (900 °C) und Seite 2 (870 °C) unmittelbar vor dem Schmieden; zweistufiges Schmieden über Dorn DB (zweite Werkstückseite)



Anhang 19: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen der fertigbearbeiteten Welle 442 (zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung Wellenseite 1 (950 °C) und 2 (950 °C) unmittelbar vor dem Schmieden; Entzündert durch Kugelstrahlen)



Anhang 20: Ergebnis der metallografischen Untersuchung mit Schliiffbildern von ausgewählten Bereichen der fertigbearbeiteten Getriebewelle Nr. 441; zweistufiges Schmieden über Dorn DB, Vorwärmtemperatur im Ofen 800 °C, Induktionserwärmung beider Wellenseiten auf 950 °C unmittelbar vor dem Schmieden; Entzündert durch Kugelstrahlen. (Quelle: Daimler AG, Getriebewerk Gaggenau-Rastatt)

Teile Nr.	Öfentemp.	Öfenliege-dauer	Nachwärmten 1Seite	Nachwärmten 2 Seite	Rundlauf		Restunwucht						Finale Unwucht						Veränderung Restunwucht -> finale Unwucht						Veränderung Restunwucht -> finale Unwucht					
					RL1	RL2	RL3	erreichte Güte	Ebene1	Ebene2	Statisch	Moment	Güte	1/min	Ebene1	Ebene2	Statisch	Moment	Güte	Ebene1	Ebene2	Statisch	Moment	Güte	Ebene1	Ebene2	Statisch	Moment	Güte	Ebene1
307	950	95	nein	nein	0,4	0,5	0,5	G 13,2	2179	455,8	137,1	583,1	168,1	G 19,0	1512	656,6	52,8	616,3	349,3	5,8	200,9	-84,2	33,2	181,2	44,1%	-61,5%	5,7%	107,8%	43,9%	
310	950	125	nein	nein	0,2	0,7	0,5	G 11,3	2539	391,1	180,1	402,5	228,4	G 14,0	2052	483,9	214,4	355,0	329,4	2,7	92,8	34,2	-47,4	101,0	23,7%	19,0%	-11,8%	44,2%	23,9%	
311	950	90	nein	nein	0,2	1,0	0,6	G 13,3	2160	459,7	262,8	674,3	162,9	G 20,1	1436	691,5	157,8	665,7	375,1	6,8	231,8	-105,1	-8,6	212,3	50,4%	-40,0%	-1,3%	130,3%	51,1%	
319	950	80	nein	nein	0,3	0,6	0,2	G 12,0	2396	414,4	158,3	508,2	183,9	G 18,3	1570	632,4	170,0	518,1	383,8	6,3	218,0	11,7	9,9	199,9	52,6%	7,4%	2,0%	108,7%	52,5%	
324	950	100	nein	nein	0,1	0,6	0,7	G 9,9	2911	341,2	232,2	467,9	174,4	G 15,6	1842	539,0	164,8	534,8	295,6	5,7	197,9	-67,4	66,8	121,2	58,0%	-29,0%	14,3%	69,5%	57,6%	
327	950	90	nein	nein	0,4	1,0	0,9	G 14,3	2017	492,2	285,9	763,3	127,9	G 21,9	1314	755,5	144,4	798,9	369,1	7,6	263,3	-141,5	35,6	241,3	53,5%	-49,5%	4,7%	188,7%	53,1%	
331	950	90	nein	nein	0,5	0,9	0,6	G 9,8	2932	338,7	208,6	541,0	77,1	G 15,3	1878	528,8	83,1	611,6	223,0	5,5	190,1	-125,5	70,5	146,0	56,1%	-60,2%	13,0%	189,4%	56,1%	
337	950	110	nein	nein	0,4	0,8	0,7	G 7,6	3798	261,4	70,9	281,1	130,1	G 10,1	2853	348,0	131,5	392,0	228,4	3,2	108,8	-49,5	20,8	78,2	35,5%	-35,1%	5,6%	52,0%	36,0%	
338	950	120	nein	nein	0,3	0,7	0,7	G 8,9	3236	306,9	141,0	371,2	150,3	G 12,1	2388	415,7	91,5	297,5	217,0	2,5	86,6	60,6	16,4	86,9	33,1%	85,5%	5,8%	66,8%	32,9%	
341	950	110	nein	nein	0,4	0,7	0,4	G 11,5	2496	397,8	201,6	199,7	299,1	G 16,1	1783	556,9	291,5	282,5	421,4	4,6	159,0	89,9	82,9	122,3	40,0%	44,6%	41,5%	40,9%	40,0%	
342	950	120	nein	nein	0,3	0,9	0,3	G 10,2	2810	353,4	247,5	573,4	104,3	G 16,0	1797	552,4	111,7	547,3	289,7	5,8	199,0	-135,8	-26,0	185,4	56,3%	-54,9%	-4,5%	177,8%	56,9%	
344	850	100	nein	nein	1,0	1,4	0,4	G 10,5	2752	360,8	40,6	356,4	184,8	G 14,6	1975	502,7	197,4	307,3	349,6	4,1	141,9	156,8	-49,1	164,8	39,3%	386,7%	-13,8%	89,2%	39,0%	
349	950	90	nein	nein	0,4	0,8	0,3	G 5,7	5053	157,1	196,5	39,4	176,8	G 4,1	6969	142,5	132,7	19,8	137,4	-1,6	-14,6	-63,8	-19,7	-39,5	-9,3%	-32,5%	-49,9%	-22,3%	-28,1%	
357	800	150	nein	nein	0,4	1,2	0,9	G 12,2	2353	422,0	179,0	571,9	152,6	G 17,4	1654	600,3	127,7	595,0	315,9	5,2	178,2	-51,3	23,1	163,3	42,2%	-28,7%	4,0%	107,0%	42,6%	
358	800	160	nein	nein	0,4	1,1	0,3	G 14,2	2031	488,9	46,4	534,2	221,9	G 20,8	1387	715,7	167,4	560,8	437,6	6,6	226,8	121,0	26,6	215,7	46,4%	260,4%	5,0%	97,2%	46,5%	
383	800	100	nein	nein	0,6	1,3	0,5	G 12,6	2277	436,0	84,1	484,0	200,1	G 19,1	1507	658,6	160,6	501,8	408,5	6,5	222,6	76,5	17,8	208,4	51,0%	91,0%	3,7%	104,2%	51,6%	
384	800	110	nein	nein	0,6	1,0	0,6	G 7,7	3737	265,7	47,2	305,9	114,1	G 9,8	2936	382,2	91,4	274,8	206,1	2,1	72,5	44,1	-31,1	92,0	27,3%	93,5%	-10,2%	80,7%	27,3%	
386	950	90	nein	nein	0,8	0,9	0,3	G 7,7	3732	266,1	115,2	285,6	147,1	G 10,3	2793	355,6	131,0	280,4	228,3	2,6	89,5	15,7	-5,2	81,2	33,6%	13,6%	-1,8%	55,2%	33,8%	
387	950	100	nein	nein	0,4	0,7	0,4	G 10,9	2641	376,0	58,3	379,8	190,6	G 14,6	1977	502,2	201,2	301,6	351,6	3,7	126,1	142,8	-78,3	160,9	33,5%	244,9%	-20,6%	84,4%	33,9%	
424	1000	110	nein	nein	0,8	1,2	0,65	G 14,1	2044	485,9	87,1	572,4	199,7	G 20,3	1420	699,0	172,2	542,5	430,8	6,2	213,2	85,2	-30,0	231,0	43,9%	97,8%	-5,2%	115,7%	44,0%	
425	1000	120	nein	nein	0,6	0,9	0,7	G 12,6	2293	433,0	268,9	701,6	82,6	G 18,9	1520	653,1	53,2	607,8	349,7	6,3	220,1	-215,7	-93,8	261,0	50,8%	-80,2%	-13,4%	323,4%	50,0%	
426	1000	130	nein	nein	0,5	0,4	0,3	G 9,0	3196	310,7	307,1	616,3	21,6	G 14,7	1956	507,6	112,6	612,4	203,5	5,7	196,9	-194,5	-4,0	181,9	63,4%	-63,3%	-0,6%	840,3%	63,3%	
427	1000	140	nein	nein	0,4	0,7	0,4	G 12,2	2365	419,8	272,0	690,8	76,3	G 18,8	1530	648,8	80,9	695,7	304,5	6,6	229,0	-191,1	5,0	228,2	54,6%	-70,3%	0,7%	299,0%	54,1%	
435	800	90	960	940	0,25	1,3	0,4	G 12,8	2250	441,4	277,6	717,4	85,3	G 19,4	1482	669,7	49,1	664,6	339,2	6,6	228,3	-226,5	-52,8	253,9	51,7%	-82,3%	-7,4%	297,8%	51,6%	
436	800	100	960	940	0,25	0,6	0,3	G 14,6	1972	503,4	141,9	607,2	211,2	G 22,5	1277	777,3	137,0	672,0	445,6	7,9	273,9	-4,9	64,8	234,4	54,4%	-3,5%	10,7%	111,0%	54,1%	
441	800	110	960	940	0,15	0,9	0,25	G 13,6	2111	470,2	176,0	638,0	155,8	G 20,6	1398	710,2	106,8	629,2	398,6	7,0	239,9	-69,1	-8,8	242,8	51,0%	-39,3%	-1,4%	155,8%	51,5%	
442	800	90	920	880	0,15	0,45	0,3	G 33,5	858	1156,3	372,4	1528,4	392,3	G 51,4	560	1772,2	212,3	1560,5	992,0	17,9	615,9	-160,2	32,1	589,7	53,3%	-43,0%	2,1%	152,9%	53,4%	
Mittelwerte					0,41	0,86	0,49	G 12,1	-	415,0	177,6	533,2	162,7	G 17,6	-	607,9	138,8	535,0	347,4	G 5,6	192,9	-38,9	1,9	183,8	44,1%	21,2%	-0,9%	150,7%	43,4%	

Anhang 22: Ergebnis des Auswuchtens der Wellen nach dem zweiten Richten