

Untersuchung der Möglichkeiten einer Online-Qualitätsüberwach- ung (Quality Monitoring) basierend auf Maschinendaten

Bauerdick, Christoph; Fertig, Alexander; Wöhrle, Sonja; Abele, Eberhard
2. November 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kontakt

c.bauerdick@ptw.tu-darmstadt.de

<http://www.ptw.tu-darmstadt.de/> | <http://www.eta-fabrik.de/>

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND4.0 International <https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung / Abstract

Die Qualitätsüberwachung in Unternehmen ist heute von größter Bedeutung. Bei der Bearbeitung von Werkstücken können sowohl im Ausgangsmaterial als auch während der Bearbeitung Fehler auftreten. Um diese Fehler zu detektieren können Monitoring-Systeme genutzt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Fehler in Bauteilen und während der Bearbeitung durch Untersuchung von Maschinendaten zu detektieren. Dies basiert auf einer Recherche zu Fehlern in den typischen Vorprozessen und der Zerspanung selbst. Daraus ergibt sich die Nachbildung von verschiedenen Probekörpern in sechs Fehlerklassen mit definierten Fehlercharakteristiken. Für die Identifikation der Fehler erfolgt die Zerspanung der Probekörper mit der Aufnahme von 20 integrierten Maschinenparametern. Diese werden anschließend im Hinblick auf die Detektion und Charakterisierung der Fehler ausgewertet.

Die eingebrachten und erzeugten Fehler sowie der Verschleiß, lassen sich aus bestimmten Verläufen geeigneter Parameter detektieren. Weiterhin zeigt sich, dass nur bestimmte Parameter für eine Detektion infrage kommen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation.....	1
1.2 Online-Qualitätsüberwachung basierend auf Maschinendaten	3
2 Zerspanung und ihre Vorprozesse	5
3 Fertigungsfehler mit Fokus auf Zerspanung	7
3.1 Verfahrenstypische Fehler der Vorprozesse	7
3.1.1 Gussfehler.....	7
3.1.2 Sinterfehler	13
3.1.3 Schmiedefehler	15
3.1.4 Walzfehler	17
3.1.5 Schweißfehler	20
3.1.6 Fehler in additiv gefertigten Bauteilen.....	21
3.1.7 Festigkeitsänderungen	22
3.2 Fehler am Werkstück durch Zerspanung	24
3.2.1 Risse	24
3.2.2 Grate.....	25
3.2.3 Weiße Schicht	26
3.2.4 Überlappungen, Ausreißer und ähnliche Fehler.....	26
3.2.5 Plastische Verformung.....	29
3.2.6 Eigenspannungen.....	30
3.3 Werkzeugbedingte Fehler	31
3.3.1 Ausbrüche.....	31
3.3.2 Querrisse und Kammrisse.....	32
3.3.3 Plastische Verformungen	33
3.3.4 Aufbauschneidenbildung.....	33
3.3.5 Verzunderungen.....	34
3.3.6 Rattern.....	34
3.3.7 Fehler in der Schneidstoffauswahl.....	36

4	Auswahl und Nachbildung der Fehler	39
4.1	Kategorisierung der Fehler.....	39
4.2	Nachbildung der Fehler	39
4.2.1	Vorstellung des Proberohlings	39
4.2.2	Hohlräume.....	40
4.2.3	Risse	41
4.2.4	Einschlüsse.....	42
4.2.5	Oberflächenveränderungen	42
4.2.6	Festigkeitsänderungen	43
4.2.7	Fehler durch Verschleiß	43
5	Versuchsdurchführung	45
6	Auswertung	46
7	Fazit und Ausblick.....	49
8	Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 End-of-Line Qualitätssicherung	1
Abbildung 1-2 In-Line Qualitätssicherung	2
Abbildung 1-3 Entstehende Kosten bei späterer Erkennung der Fehler	3
Abbildung 1-4 Qualitätsüberwachung während der Bearbeitung.....	4
Abbildung 2-1 Verfahrensvarianten Drehen	5
Abbildung 3-1: Links: Außenlunker, rechts: Außenlunker an einem Bauteil	8
Abbildung 3-2: Links: Innenlunker, rechts: Innenlunker an einem Bauteil.....	8
Abbildung 3-3: Einfallstelle.....	8
Abbildung 3-4: Links: Oxideinschluss/Oxidhaut, rechts: Oxidhauteinschlüsse	10
Abbildung 3-5: Links: Schlackeneinschluss, rechts: Schwungscheibe mit Schlackeneinschluss .	10
Abbildung 3-6: Links: Sandeinschluss, rechts: Sandeinschluss in Gusseisen.....	11
Abbildung 3-7: Links: angebrannter Sand, rechts: angebrannter Sand an Gusseisen.....	11
Abbildung 3-8: Links: Rauheit, rechts: Rauheit auf einem Werkstück.....	12
Abbildung 3-9: Links: Pinholes, rechts: Pinholes an einem Gussstück.....	12
Abbildung 3-10: Links: Versatz, rechts: Versatz an einem Bauteil.....	13
Abbildung 3-11: Schmiedeüberlappung während des Gesenkschmiedens.....	16
Abbildung 3-12: Links: Naht, rechts: Großaufnahme der Naht	16
Abbildung 3-13: Delle.....	17
Abbildung 3-14: Schale in einem Blech	17
Abbildung 3-15: Sandstelle an einem Blech.....	18
Abbildung 3-16: Z-Brüchigkeit an einem Blech	18
Abbildung 3-17: Fremdkörpereinwalzung in einem Blech	19
Abbildung 3-18: Kalteindrücke in einem Blech.....	19
Abbildung 3-19: Korrosion an Blechen.....	19
Abbildung 3-20 Temperaturbereiche und Glühfarben der verschiedenen Glühverfahren	23
Abbildung 3-21: Darstellung eines Risses	24
Abbildung 3-22: Darstellung von Mikrorissen	24

Abbildung 3-23: Darstellung eines Grats	25
Abbildung 3-24: Darstellung einer weißen Schicht	26
Abbildung 3-25: Darstellung von Aufreißen.....	27
Abbildung 3-26: Darstellung einer Überlappung	27
Abbildung 3-27: Darstellung eines Einschlusses	28
Abbildung 3-28: Darstellung mehrerer Krater	28
Abbildung 3-29: Darstellung mehrerer Grübchen.....	28
Abbildung 3-30: Darstellung von Brüchen, Sprüngen, Spalten	29
Abbildung 3-31: Darstellung einer Beule.....	29
Abbildung 3-32: Plastische Verformung	30
Abbildung 3-33 Ausbruch an Schneidkante mit roter Markierung	32
Abbildung 3-34 Querrisse und Kammrissen beim Fräsen.....	32
Abbildung 3-35 Plastische Verformung am Werkzeug	33
Abbildung 3-36 Oxidationszonen am Hartmetall-Drehwerkzeug	34
Abbildung 3-37 Regeneratives Rattern.....	35
Abbildung 3-38 Rupfen.....	36
Abbildung 3-39 Schneidstoffe - Verschleißfestigkeit und Zähigkeit.....	37
Abbildung 4-1 Untersuchte Fehlerarten.....	39
Abbildung 4-2 Geschmiedeter Proberohling	40
Abbildung 4-3: CAD-Modelle der Proben	41
Abbildung 4-4 Rissprobe mit geschnittenem Riss	41
Abbildung 4-5 Schmiedeteil mit einer Delle	42
Abbildung 6-1 Hohlraumprobe 1 mm: Vergleich Proben mit und ohne Bohrung	46
Abbildung 6-2 Bearbeitung der Proben mit verschlissener Schneide	47

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Eine Fertigungslinie mit aneinander gereihten Prozessen ist typisch für die Produktion in Maschinenbauunternehmen. Die hier betrachtete Prozesskette dient zur Herstellung einer Steuerscheibe für Koaxialhydraulikpumpen und befindet sich in der ETA-Fabrik des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt (Abele und Metternich 2018). Diese Arbeit baut auf den bereits veröffentlichten Arbeiten Bauerdick et al. 2017, Bauerdick et al. 2018a und Bauerdick et al. 2018b auf.

Um die Qualität der gefertigten Werkstücke zu gewährleisten existieren unterschiedliche Anordnungen der Qualitätssicherung. Die meist verbreitete, weil günstigste, stellt die End-of-Line Prüfung (siehe Abbildung 1-1) dar. Dabei kommen die Werkstücke am Ende der Prozesskette zur Qualitätssicherung, um mögliche Fehler in den Werkstücken zu erkennen und diese anschließend, je nach Ausprägung, zur Nacharbeit zu schicken, als Ausschuss zu deklarieren oder als fehlerfrei weiter zu senden. (Schmitt und Pfeifer 2015, S. 409–414)



Abbildung 1-1 End-of-Line Qualitätssicherung

Mit diesem Vorgehen sind einige Nachteile verbunden. Kommt es in einem der ersten Prozesse zu Fehlern, welche zum Ausschuss führen, werden diese unter Umständen erst am Ende der Prozesskette entdeckt, wodurch die folgenden Prozessschritte unnötige Kosten durch die Bearbeitung der fehlerhaften Bauteile produzieren. Der damit verbundene Zeitverlust in der Produktion sowie unnötige Maschinenbelegungen resultieren ebenfalls in erhöhten Kosten. Dieser Zusammenhang ist aus Abbildung 1-3 ersichtlich. Aus diesen Nachteilen ergibt sich eine weitere Möglichkeit der Qualitätssicherung, wie sie in der Industrie zu finden ist. Bei der in Abbildung 1-2 dargestellten In-Line Qualitätssicherung erfolgt eine Untersuchung der Erzeugnisse auf Fehler nach jedem Schritt in der Prozesskette. Durch geeignete Messmittel und

Prüfvorrichtungen ist es möglich, eine Beurteilung nach jedem einzelnen Schritt in der Fertigungslinie durchzuführen. Dies ermöglicht es bereits nach jedem Arbeitsvorgang auf Nacharbeit oder Ausschuss zu entscheiden. (Schmitt und Pfeifer 2015, S. 409–414) Damit sind Kosten- und Ressourceneinsparungen möglich, da fehlerhafte Werkstücke nach jedem Prozess aussortiert werden können (siehe Abbildung 1-3). Auf der anderen Seite steigen dadurch jedoch die Kosten der Qualitätssicherung sowie die Fertigungszeit um ein Vielfaches.

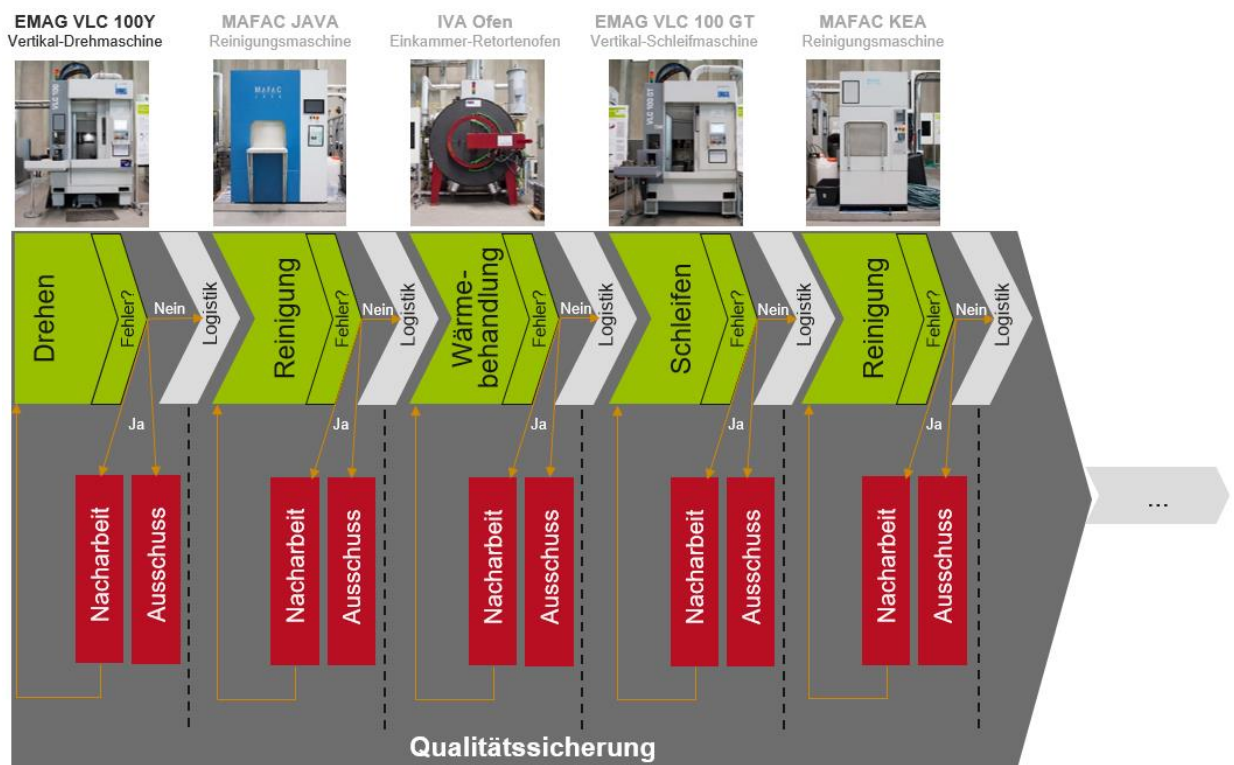


Abbildung 1-2 In-Line Qualitätssicherung

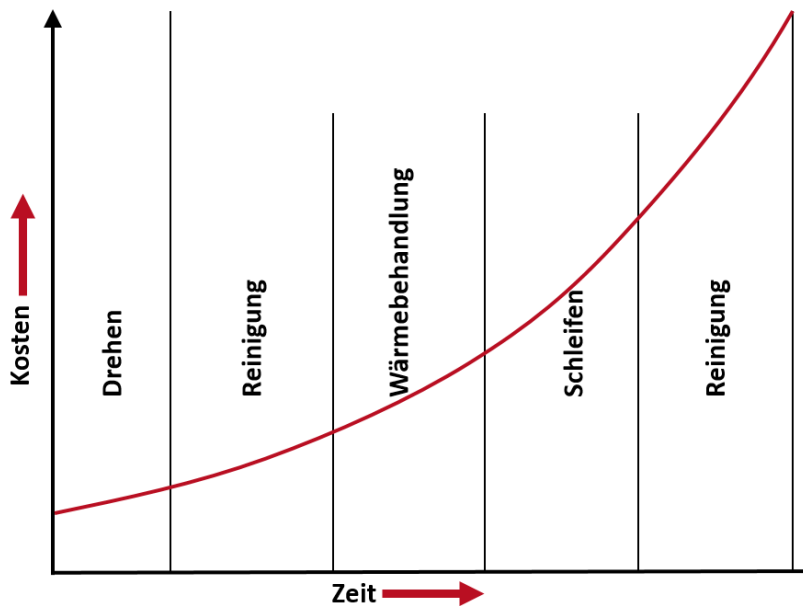


Abbildung 1-3 Entstehende Kosten bei späterer Erkennung der Fehler in Anlehnung an Anderl und Metternich
16.04.2015

Um die Kosten der Qualitätssicherung sowohl bei der End-of-Line- wie auch bei der In-Line-Kontrolle möglichst gering zu halten, werden wiederum (besonders bei Serienproduktionen eines Produkts) nur noch Stichprobenprüfungen durchgeführt. (VDMA-Einheitsblatt 24470-2, S. 2; Böge 2015, S. 76; Schäfer und Ring 2005, S. 113–115)

Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung von Folgekosten durch nicht detektierte Fehler und der Minimierung von Kosten der Qualitätssicherung auf der anderen Seite. Aus dieser Dissonanz ergibt sich das Thema dieser Veröffentlichung, das im folgenden Kapitel eingehender beschrieben wird.

1.2 Online-Qualitätsüberwachung basierend auf Maschinendaten

In dieser Veröffentlichung werden die Möglichkeiten einer Online-Qualitätsüberwachung, also die Überwachung der Werkstückqualität während der Bearbeitung, basierend auf Maschinendaten am Beispiel eines Drehprozesses betrachtet. Diese Arbeit baut auf den Erkenntnissen von (Bauerdick et al. 2017) und (Bauerdick et al. 2018b) auf und erweitert die dort benutzte Leistungsaufnahme der Spindel zur Erkennung von Bauteilfehlern um weitere 19 Parameter des Antriebsverbandes der Drehmaschine und untersucht ergänzend unterschiedliche Fehlerformen.

Drehprozesse setzen sich typischerweise aus mehreren Bearbeitungsschritten zusammen. Die Überwachung jedes dieser Bearbeitungsschritte auf Basis von Maschinendaten soll bereits während der Bearbeitung der Werkstücke mögliche Fehler und Probleme aufzeigen und so schnellstmöglich eine Beurteilung der Qualität des Werkstücks ermöglichen. Das Konzept wird

in Abbildung 1-4 dargestellt. Dadurch sollen einerseits die Kosten durch späte Fehlererkennung und andererseits, durch die Nutzung bereits vorhandener Maschinendaten, die Kosten der Qualitätssicherung bei gleichzeitiger 100 % Prüfung der Werkstücke minimiert werden. Es handelt sich demnach um eine indirekte Messung der Qualität, welche das vorhandene Sensornetzwerk nutzt um daraus auf die Qualität zu schließen. Dies fördert flexiblere Reaktionen in der Produktion und dadurch eine schnellere Ergreifung von Maßnahmen bis hin zur Verhinderung von Bearbeitungsfehlern bei der Entstehung. Das Konzept vereint damit die Vorteile der End-of-Line Qualitätssicherung mit denen der In-Line Kontrolle und treibt diese noch weiter zur 100 % - Online-Überwachung. Dadurch können Werkzeuge geschont, Maschinenzeiten reduziert, Personalkosten gesenkt und unter Umständen Werkstücke vor fehlerhafter Bearbeitung bewahrt werden.

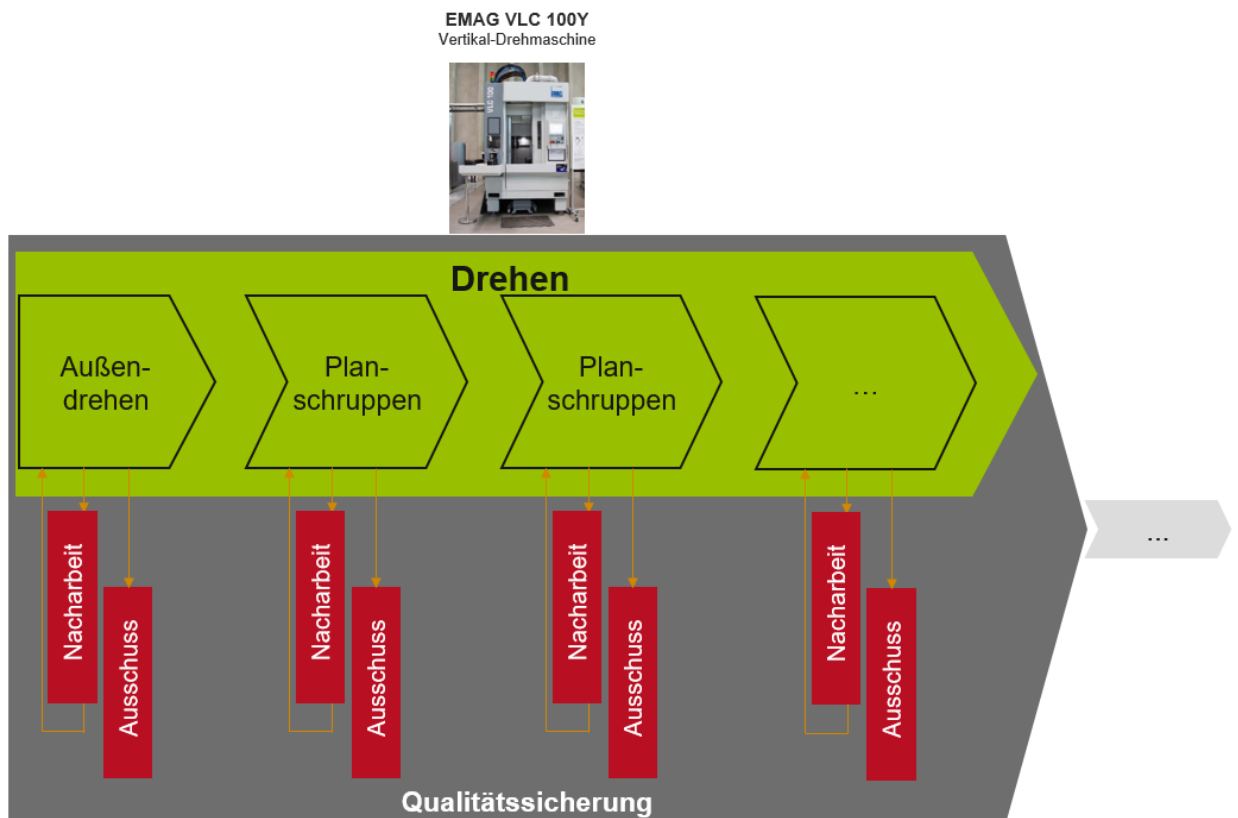


Abbildung 1-4 Qualitätsüberwachung während der Bearbeitung (Betrachtete Maschine: Vertikal-Drehmaschine des Typs EMAG VLC 100Y)

2 Zerspanung und ihre Vorprozesse

Die Zerspanung gehört zu den trennenden Fertigungsverfahren. Dabei unterteilt sich die Zerspanung in die Verfahren „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ und „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“. (DIN 8589-0, S. 8) Bei beiden Verfahrensgruppen werden Werkstoffteilchen mit einer Schneide vom Werkstückrohteil abgetragen um die gewünschte Endgeometrie zu erhalten. Jedoch ist beim Zerspanungsvorgang mit geometrisch bestimmter Schneide die Form der Schneide genau festgelegt, wohingegen bei unbestimmten Schneiden sich die Schneidenform während des Bearbeitungsvorgangs verändern kann. (Bergner et al. 2017, S. 177) Weitere Untergliederungen und Verfahrensbeispiele für die verschiedenen Gruppen lassen sich (DIN 8589-0) entnehmen. Drehen gehört zu den Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide und identifiziert sich durch eine rotatorische Schnittbewegung mit einer beliebig dazu liegenden translatorischen Vorschubbewegung. (Klocke und König 2008, S. 417) Daraus lassen sich anhand der Richtung der Vorschubbewegung und der Werkzeugmerkmale verschiedene Verfahrensvarianten ableiten. Abbildung 2-1 zeigt die nach DIN 8589-1 definierten Drehverfahren.

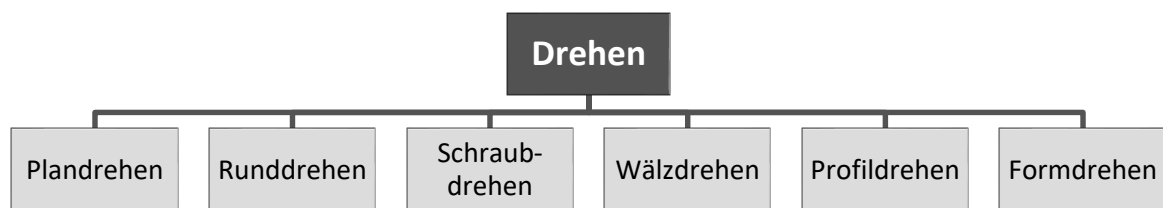


Abbildung 2-1 Verfahrensvarianten Drehen, Quelle: DIN 8589-1, S. 3–12

Die verschiedenen Erläuterungen zu den Verfahren finden sich in DIN 8589-1 und DIN 8589-3 wieder. Nahezu alle im Maschinenbau gefertigten Teile entstehen aus zuvor hergestellten Rohlingen und Halbzeugen und durchlaufen somit verschiedene Bearbeitungsschritte bis zur Zerspanung und oft auch nach der Zerspanung: Zunächst muss der Werkstoff hergestellt und das Werkstück urgeformt werden durch zum Beispiel Gießen, Sintern oder additive Fertigungsverfahren. Daraufhin kann die Bauteilgestalt durch verschiedene Umformverfahren wie Walzen, Ziehen, Strangpressen (Fließpressen) oder Schmieden verändert und angepasst werden um dadurch Halb- und Fertigerzeugnisse herzustellen. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 174) Zwecks der Erzeugung von gewünschten Stoffeigenschaften kommen außerdem unterschiedliche Verfahren der Wärmebehandlung zum Einsatz.

Der für die hier betrachtete Steuerplatte verwendete Rohling hat diese Schritte ebenfalls durchlaufen. Er wird geschmiedet und im Anschluss vergütet.

Im weiteren Verlauf wird er zerspannt und durchläuft dabei verschiedene Schritte in der Bearbeitung. Durch Runddrehen, Plandrehen, Profilfräsen und Bohren erhält die Steuerplatte ihre endgültige Form. Somit steht der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Rohling mit den dazugehörigen Prozessen für ein typisches Werkstück der Metallverarbeitung.

Weiterhin ist es möglich, dass vor oder auch nach der Zerspanung die einzelnen Werkstücke durch fügende Verfahren (hauptsächlich durch das Schweißen, da sich hier auf Stahlbauteile konzentriert wird) zu Baugruppen zusammengefügt und anschließend zerspannt werden.

Durch diese sehr große Vielfalt an Vorprozessen und möglichen Prozessketten können in jedem Prozessschritt (einschließlich der Zerspanung selbst) Fehler in den Werkstoffen oder Bauteilen entstehen, welche zu verminderter Qualität oder gar zu Ausschuss führen können. Die möglichen Fehler, welche dabei auftreten können, werden in Kapitel 3 aufgearbeitet und erläutert.

3 Fertigungsfehler mit Fokus auf Zerspanung

3.1 Verfahrenstypische Fehler der Vorprozesse

3.1.1 Gussfehler

Gussfehler besitzen innerhalb der Fertigungsverfahren einen hohen Stellenwert. Da der Gießprozess am Beginn der Fertigungsabfolge steht, wirken sich hier entstandene Fehler nicht nur auf das Gussstück aus, sondern auch auf nachfolgende Fertigungsschritte. (Colangelo und Thornton 1986, S. 314–315)

Die Anzahl an unterschiedlichen Gussfehlern ist insgesamt sehr hoch. Hasse beschreibt 50 verschiedene Gussfehler (Hasse 2003, S. 24–350). Der Gussfehler-Atlas listet darüber hinaus weit mehr als 100 unterschiedliche Gussfehler auf (Reuter und Schneider 1971, S. 11–41). Gussfehler können in sieben Kategorien eingeteilt werden (Davis 1989, S. 512; Reuter und Schneider 1971, S. 6). Diese Kategorien sind:

- Metallische Auswüchse
- Hohlräume
- Unterbrechung des Zusammenhangs
- Fehlerhafte Gussoberfläche
- Unvollständige Stücke
- Ungenaue Gestalt oder Maße
- Einschlüsse und Gefügeanomalien

Von Gussteilen werden typischerweise gute Oberflächen, Maßhaltigkeit sowie die Freiheit von Lunkern, Einschlüssen, Poren, Rissen und Spannungen gefordert (Fritz und Schulze 2015, S. 46). Im Folgenden werden einige wichtige Gussfehler näher betrachtet.

Lunker

Lunker sind Hohlräume mit rauen Wänden (Reuter und Schneider 1971, S. 18). Diese Gussfehler können potentiell durch alle Gussverfahren ausgelöst werden. Sie entstehen durch die Volumenabnahme von Schmelzen während der Erstarrung. Es gibt verschiedene Arten von Lunkern. Diese sind Außenlunker, Innenlunker und Einfallstellen. (Hasse 2003, S. 181) Auch Winkel- bzw. Eckenlunker und Kernlunker existieren (Reuter und Schneider 1971, S. 18).

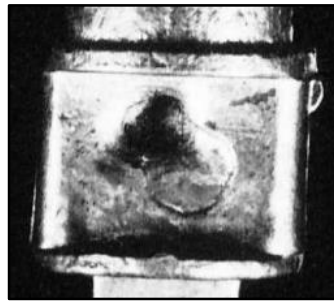
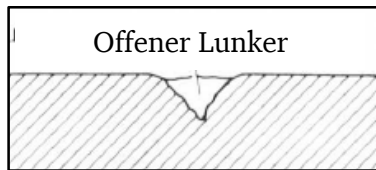


Abbildung 3-1 Links: Außenlunker, rechts: Außenlunker an einem Bauteil, Quelle: Mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus links: Hasse 2003, S. 181, rechts: Reuter und Schneider 1971, S. 128

Außenlunker befinden sich als symmetrische Hohlräume tief im Werkstück und besitzen eine Öffnung an der Werkstückoberfläche (siehe Abbildung 3-1). Bei Innenlunkern dagegen besteht keine Verbindung zur Werkstückumgebung (siehe Abbildung 3-2). (Hasse 2003, S. 181–182)

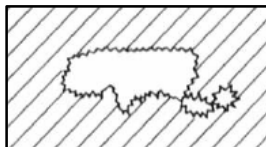


Abbildung 3-2 Links: Innenlunker, rechts: Innenlunker an einem Bauteil nach der Sichtbarmachung, Quelle: links: Hasse 2003, S. 181, rechts: Reuter und Schneider 1971, S. 139

Einfallstellen befinden sich an der Oberfläche des Werkstücks, wie in Abbildung 3-3 zu sehen. Es sind flache Mulden, deren Rauheit grundsätzlich der Werkstückoberflächenrauheit entspricht. (Hasse 2003, S. 181)



Abbildung 3-3 Einfallstelle, Quelle: Mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Hasse 2003, S. 181

Winkel- bzw. Eckenlunker befinden sich an den Werkstückecken eines Gussteils, vor allem an den zuletzt erstarrten Positionen. Normalerweise besteht eine Verbindung mit der Umgebung, zusätzlich können aber auch geschlossene, weiter innen liegende Hohlräume auftreten. (Reuter und Schneider 1971, S. 129)

Seigerungen

Unter Seigerungen werden Entmischungen der verschiedenen Legierungselemente einer Schmelze verstanden (Fritz und Schulze 2008, S. 49). Somit sind Seigerungen örtliche Anreicherungen eines Legierungsbestandteils bzw. Verunreinigungen (Klocke 2015, S. 34). Unterschieden werden dabei Makro – und Mikro-seigerungen. Zu den Makro-seigerungen gehören u.a. die Schwerseigerungen und die Blockseigerungen. Dabei handelt es sich um begrenzte lokale

Entmischungen des erstarrten Gussstückes in Bezug auf die Gesamtschmelze. (Hasse 2017e) Schwereiseigerungen ereignen sich durch Dichteunterschiede zwischen den sich trennenden Bestandteilen, wodurch die spezifisch schwereren Bestandteile absinken und die leichteren sich an der Oberfläche absetzen. (Hasse 2017d) Dagegen ist die Ursache von Blockseigerungen die schlechtere Löslichkeit von einzelnen Elementen oder Verunreinigungen in der Restschmelze im Gegensatz zum bereits erstarrten Körper. Somit entstehen Entmischungen in der noch flüssigen Restschmelze. (Hasse 2017a) Als Mikroiseigerungen oder auch Kristalliseigerungen bezeichnen sich Entmischungen von Mischkristallen. Dabei handelt es sich um Unterschiede in der Zusammensetzung in mikroskopischer Größenordnung. (Hasse 2017b)

Einschlüsse

Einschlüsse existieren beim Gießen in verschiedenen Ausprägungen. Allgemein werden diese Fehler unterteilt in unregelmäßig geformte metallische oder nichtmetallische Einschlüsse, welche in jedem Gussverfahren auftreten können. Einschlüsse können kompakt und körnig, schlierenförmig oder als Oxidnester/Oxidhäute ausgeformt sein. Sie führen bei nachfolgenden Bearbeitungsschritten zu Werkzeugverschleiß.

Metallische Einschlüsse oder auch „harte Stellen“ sind Ausseigerungen unlöslicher intermetallischer Verbindungen (Fe, Al, Mn, Si), die sich vor allem negativ auf die spanende Bearbeitung des Werkstücks auswirken. Die Entstehung dieser Einschlüsse ist auf eine zu niedrige Badtemperatur und einem daraus folgenden hohen Temperaturgradienten im Tiegelschöpfofen zurückzuführen. Als Folge treten Ausseigerungen auf, die sich anschließend ohne Änderung im Gussstück befinden. (Hasse 2003, S. 195; Reuter und Schneider 1971, S. 304) Metallische Einschlüsse können in Fremdmalleinschlüsse, Spritzkugeln und Phosphidperlen unterteilt werden (Reuter und Schneider 1971, S. 38).

Fremdmalleinschlüsse variieren in ihrer Größe und Form. Diese Einschlüsse heben sich vom Werkstückwerkstoff durch ihre Farbe und Struktur deutlich ab. Auch zufällig in die Schmelze eingedrungene Fremdmalle können während der Erstarrung der Schmelze eingeschlossen werden. Bei der weiteren Bearbeitung des Werkstücks ist zu berücksichtigen, dass auch die Eigenschaften der Einschlüsse teils stark vom Grundwerkstoff abweichen. (Reuter und Schneider 1971, S. 304–305)

Nichtmetallische Einschlüsse wirken sich auf die Bauteileigenschaften von Stahl sehr negativ aus (Wang et al. 2017, S. 108). Sie beeinflussen nicht nur die Streckgrenze eines Bauteils (Liu et al. 2009, S. 1217), sie können auch zu Rissen (Jin et al. 2010, S. 8019) oder bis zum Bruch führen (Liu et al. 2009, S. 1214). Es gibt verschiedene Arten nichtmetallischer Einschlüsse, wie Sand-, Schlacken- und Oxideinschlüsse (Reuter und Schneider 1971, S. 39–40). Bei Oxideinschlüssen

handelt es sich um Trennungen des Gefügeverbundes, die durch das Einschließen von Oxiden im Gussstück entstehen, siehe Abbildung 3-4. Sie nehmen die Gestalt von dünnen, filmartigen Häutchen an und treten oft gleichzeitig mit Gasblasen/Gasporosität auf. Sie befinden sich an der Oberfläche des Werkstücks wie auch im Inneren. Diese Art der Einschlüsse sind auf die Sauerstoffaffinität einiger Metalle zurückzuführen, deren Oxidationsneigung bei steigenden Temperaturen zunimmt. (Hasse 2003, S. 213)

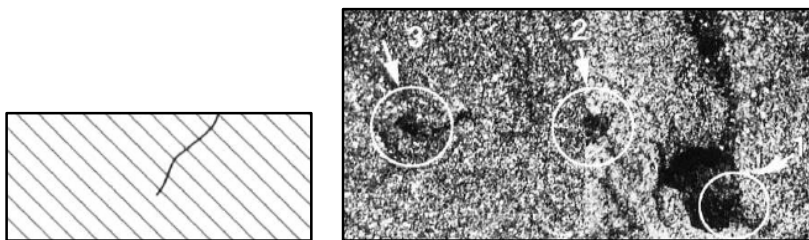


Abbildung 3-4 Links: Oxideinschluss/Oxidhaut, rechts: Oxidhauteinschlüsse, Quelle: rechts: Hasse 2003, S. 216 links: Reuter und Schneider 1971, S. 328

Schlackeneinschlüsse sind Fehler, die innerhalb aller Gießverfahren und Gusswerkstoffe auftreten können. Diese Fehler entstehen durch das Schmelzen von Schlacke, welche beim Abguss mitgerissen wird. Die mitgeschwemmten Schlacken werden daraufhin in das Werkstück eingeschlossen, siehe Abbildung 3-5. (Hasse 2003, S. 259–260)

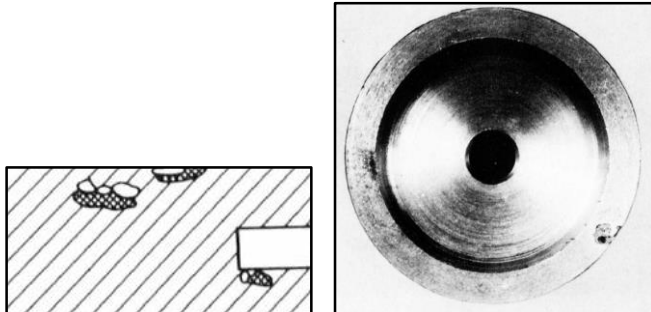


Abbildung 3-5 Links: Schlackeneinschluss, rechts: Schwungscheibe mit Schlackeneinschluss, Quelle: Reuter und Schneider 1971, S. 309–310

Sandeinschlüsse besitzen eine unregelmäßige Form und befinden sich direkt unter der Werkstückoberfläche, siehe Abbildung 3-6. Die Ursache dieser Einschlüsse liegt häufig in abgebrochenen Form- und Kernstücken sowie unsachgemäßer Gießarbeit. (Reuter und Schneider 1971, S. 319)

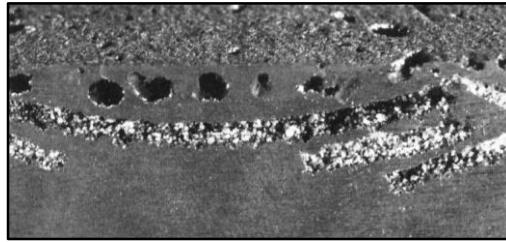
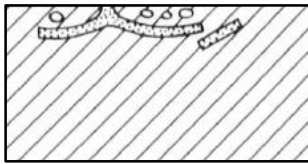


Abbildung 3-6 Links: Sandeinschluss, rechts: Sandeinschluss in Gusseisen, Quelle: Reuter und Schneider 1971, S. 319–320

Gaseinschlüsse oder Gasblasen entstehen, wenn gelöste Gase in der Schmelze während der Erstarrung nicht mehr entweichen können. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 59) Der Hintergrund dafür, ist die abnehmende Löslichkeit von Gasen in Metallschmelzen mit sinkender Temperatur. Dadurch werden besonders beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand große Mengen an Gasen freigesetzt und es entstehen Gasblasen bei zu schneller Abkühlung. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 34; Klocke 2015, S. 34) Somit resultiert ein Gefüge mit Mikroporositäten im Bereich von 0,05 mm - 0,5 mm (Campbell 2011, S. 462).

Fehlerhafte Gussoberfläche

Fehlerhafte Gussoberflächen werden durch Unebenheiten, Rauigkeiten, Defekte auf Basis von Sand, Furchen, Vertiefungen oder Oxiden verursacht (Reuter und Schneider 1971, S. 23–29).

Angebrannter Sand beschreibt das Anhaften von schmalen Sandschichten auf der Werkstückoberfläche. Die Ursache dieses Defekts ist die chemische Reaktion des Werkstückmetalls mit dem Gießformstoff. (Reuter und Schneider 1971, S. 219). Abbildung 3-7 stellt diesen Defekt dar.

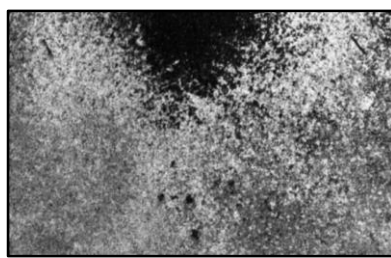
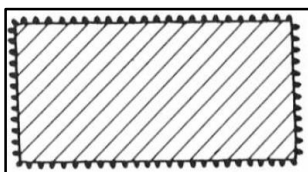


Abbildung 3-7 Links: angebrannter Sand, rechts: angebrannter Sand an Gusseisen, Quelle: Reuter und Schneider 1971, S. 219f.

Die Gestalt von Gussstückoberflächen, auf denen der Fehler Rauheit auftritt, ist nicht ideal ausgebildet. Dabei entspricht die Rautiefe der Länge von Sandkörnern. Ursachen sind bspw. eine grobe Sandkörnung, ungenügende Verdichtung sowie zu hohe Gießtemperaturen. (Reuter und Schneider 1971, S. 196). Abbildung 3-8 visualisiert diesen Fehler.

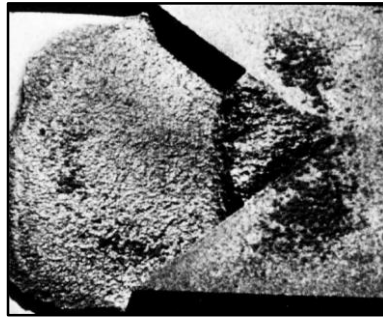
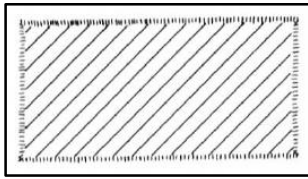


Abbildung 3-8 Links: Rauheit, rechts: Rauheit auf einem Werkstück, Quelle: Reuter und Schneider 1971, S. 196–197

Pinholes sind kleine, nadelartige Hohlräume an der Gussstückoberfläche bzw. knapp darunter (siehe Abbildung 3-9). Diese Defekte treten theoretisch an allen Werkstückbereichen großflächig auf. Entstehungsursachen sind die Formstoffeigenschaften sowie metallurgische Eigenschaften des Gussausgangsmaterials. (Hasse 2003, S. 231)

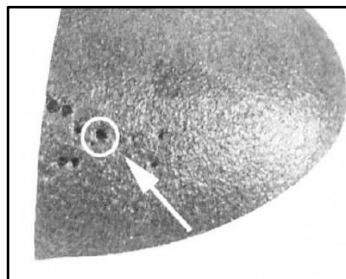
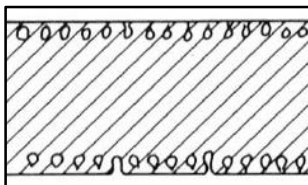


Abbildung 3-9 Links: Pinholes, rechts: Pinholes an einem Gussstück, Quelle: rechts: Hasse 2003, S. 238, links: Reuter und Schneider 1971, S. 114

Unter einer Penetration versteht sich das Eindringen von Gusswerkstoffen in oberflächennahe Formstoffpartien. (Fritz und Schulze 2008, S. 48) Diese Gussfehler sind unabhängig vom Werkstoff und können bei allen Sandformverfahren auftreten. Generell sind Penetrationen Sandanhaftungen am Gusswerkstück und führen zu rauen Oberflächen. Unterschieden kann hierbei zwischen der „echten“ Penetration (das eingedrungene Metall reagiert nicht chemisch mit dem Formstoff) und Anbränden oder Vererzungen (hier erfolgt eine chemische Reaktion des eingedrungenen Metalls mit dem Formstoff). (Hasse 2017c) Eine weitere spezielle Form der echten Penetration ist die Explosionspenetration. Explosionspenetrationen entstehen durch die explosionsartige Wasserverdampfung an Stellen, wo Metallströme zusammenfließen bzw. schneller fließen. Der durch die Verdampfung bewirkte metallodynamische Stoß drückt das Metall großflächig in die Sandporen. Dabei kann sich eine Penetrationsschale gleichmäßiger Dicke im zuletzt gefüllten Formhohlraum bilden. (Baier et al. 2005, S. 27) Weiterhin besteht die Möglichkeit der Vererzung. Bei einer Vererzung kommt es zu einer chemischen Reaktion und es entsteht ein festes Konglomerat aus Metall und Sand mit starker Haftung am Gussstück. (Baier et al. 2005, S. 117–118)

Risse an Gussstücken

An Gussstücken treten eine Vielzahl verschiedener Rissarten auf, bspw. Warmrisse, Brandrisse und Kaltrisse (Hasse 2003, S. 38, 162, 333). Warmrisse sind Trennungen des Werkstoffs, die über den gesamten Werkstoffquerschnitt verlaufen können und stark verästelt sind. Sie entstehen durch Spannungen in der Erstarrungsphase. (Hasse 2003, S. 333)

Fehler der Maßhaltigkeit

Fehler der Maßhaltigkeit sind Defekte, die sich auf unrichtige Maße des Gussteils beziehen, auf die falsche Gestalt, auf Versetzungen sowie Verzug (Reuter und Schneider 1971, S. 33–37). Sofern die Teilungsebene eines Gussstücks auf beiden Seiten um das gleiche Maß versetzt ist, handelt es sich um eine Versetzung. Ursächlich für Versetzungen sind unsaubere Modellzentrierungen oder ein zu großes Spiel des Kerns. (Hasse 2003, S. 329; Reuter und Schneider 1971, S. 288) Abbildung 3-10 stellt eine Versetzung an einem Gussstück dar.

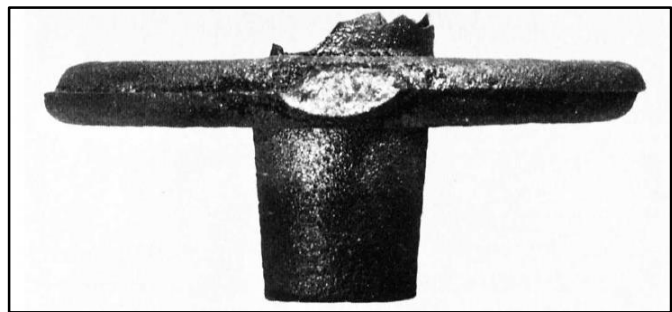
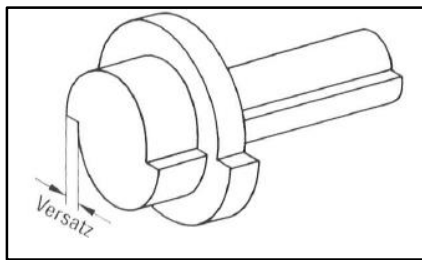


Abbildung 3-10 Links: Versatz, rechts: Versatz an einem Bauteil, Quelle: Mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus: links: Hasse 2003, S. 328, rechts: Reuter und Schneider 1971, S. 289

3.1.2 Sinterfehler

Anschmelzungen

Beim Sintern mit hohen Temperaturen können sich Anschmelzungen der Werkstückoberfläche im Kontakt mit Kohlenstoff bilden. Diese entstehen sowohl durch flächigen als auch durch punktuellen Kontakt mit kohlenstoffhaltigen Substanzen im abstützenden Granulat des Sinterkastens. (Beiss 2013, S. 209–210)

Eindellungen und Einfallstellen

Ebenfalls bilden sich Sulfide, wenn Sinterteile mit größeren Mengen Schwefel in Berührung kommen. Dabei sind Poren in den Sinterteilen mit Sulfiden gefüllt. Bei zu großen Mengen an Schwefel kommt es zu Eindellungen, Einfallstellen in der Oberfläche oder zum Schrumpfen des

ganzen Bauteiles, da Schwefel eine niedrigere Schmelztemperatur (813 °C) und Eisen bei Schwefelberührung bei 988 °C anschmilzt. (Beiss 2013, S. 216–217)

Verzüge

Pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile sind ebenfalls von Verzügen betroffen. Die Gründe hierfür sind meistens Entmischungen im Pulvertrakt, besonders beim Füllen von zugemischten Legierungsbestandteilen. Dabei haben elementares Kupfer, Nickel und Eisenphosphid den größten Einfluss auf unsystematische Maßabweichungen. (Beiss 2013, S. 217–220)

Risse

Neben den Rissen beim Gießen können während dem Sintervorgang auch ähnliche Phänomene festgestellt werden. So gehören Blährisse und Delaminationen zu den Fehlern während dem Sintervorgang, welche das Werkstück schädigen. Diese zeigen sich in Fehlstellen in der Größenordnung von 100 µm – 500 µm (abgeschätzt durch Beiss 2013, S. 203). Blährisse entstehen im Sinterofen und ereignen sich durch lokale oder vollständige Trennungen der Schichten wie Blätterteig. Weiterhin enthalten die Bauteile kleine oder größere Risse. Teilweise kann das Gefüge komplett zerkrümelt werden. Schmiermittelmangel, zu kurze Lagerung vor dem Sintern (geringe Oxidbildung), Einwirkung von Schutzgasen sind hier mögliche Ursachen. (Beiss 2013, S. 202–206) Weiterführende Informationen finden sich in Beiss, Paul (2013): Pulvermetallurgische Fertigungstechnik. 2. Aufl, S. 202-206. Unter Delaminationen verstehen sich sehr feine Trennungen zwischen den ehemaligen Pulverpartikeln senkrecht zur Pressrichtung. Sie entstehen beim Ausformen und heilen bei normalen Sintertemperaturen nicht aus. Anhand der von Beiss gezeigten Abbildungen können die Dimensionen hier im Bereich von 20 µm abgeschätzt werden. (Beiss 2013, S. 210–214)

Auf- und Abkohlungen

Durch Wechselwirkungen zwischen der Bauteiloberfläche und der Sinteratmosphäre kann es zu Gefügeveränderungen kommen. Dabei kohlen kohlenstoffarme oder -freie Stähle auf oder kohlenstoffhaltige Stähle in Atmosphären mit hohem Taupunkt ab.

Wechselwirkungen mit Stickstoff

Rostfreie Stähle mit hohem Chromgehalt können ihren Korrosionsschutz und die Rostfreiheit durch Wechselwirkungen mit Stickstoff verlieren. Die Stickstoffmoleküle der Atmosphäre spalten sich durch den Chromgehalt des Stahls bei Temperaturen von 700 °C bis 750 °C. Diese können anschließend in den Stahl eindiffundieren. Durch die absinkende Löslichkeit des Stickstoffs mit sinkender Temperatur scheiden sich Chromnitride aus dem übersättigten Gefüge aus. Außerdem

bildet sich ein streifiges Gefüge aus Stahl- und Chromnitridlamellen. Entsteht dieses Gefüge sind die Werkstoffe nicht mehr rostfrei. (Beiss 2013, S. 206–209)

Öl auf der Matrizenplatte

Befindet sich Öl auf der Matrizenplatte bilden sich möglicherweise Gefügefehler aus, welche sich manchmal bis zu makroskopischen Löchern entwickeln. Öltröpfen halten staubige Feinanteile des Pulvers, wie Graphit, Eisenphosphid, feine Nickelpartikelchen und Mangansulfid fest und akkumulieren diese. Der daraus entstehende schwarze, ölfuchte Schlamm kann beim Sintern über die Matrize ins Werkzeug fallen. Das Graphit kann sich bei hohen Temperaturen lösen und Anschmelzungen verursachen. Übrig bleiben kohlenstoffreiche Zonen und in extremen Fällen Löcher, die je nach den Pulverbestandteilen große Mengen an Graphit, Mangansulfid oder Nickelpartikelchen aufweisen. (Beiss 2013, S. 214–216)

3.1.3 Schmiedefehler

Risse

Bei allen Umformprozessen zeigen sich ebenso Möglichkeiten der Rissentstehung. So können durch Überschreitungen des Formänderungsvermögens bzw. Stauchverhältnisses, falsche Schmierung, falsche Abmaße der Rohlinge, zu geringe Duktilität des Werkstoffs, Ausbauchen der Ränder, falsche Temperaturen und Umformgeschwindigkeiten, zu kalte Innenschichten oder zu starke Kühlung der Außenschichten verschiedene Risse in Innen- und Außenbereichen entstehen. (Tschätsch 2005, S. 27–43; Kalpakjian et al. 2011, 416, 436, 457; Fritz und Schulze 2008, S. 425) Diese Risse basieren auf mechanischen Überbelastungen bzw. Mechanismen während der Umformvorgänge. (Kalpakjian et al. 2011, S. 416; Rossmann 2012a, 11.2-3 - 11.2-5)

Schmiedeüberlappungen

Schmiedeüberlappungen befinden sich an der Oberfläche geschmiedeter Werkstücke. Die Ursache für diese Fehler ist das Einfalten von heißem Metall. Zwischen diesen Schmiedefehlern und der Werkstückoberfläche befinden sich Oxide. Diese sorgen dafür, dass das Fehlermaterial während dem Schmiedeprozess zwar in die Werkstoffoberfläche eingebracht wird, jedoch keine metallurgische Verbindung eintritt. (Colangelo und Thornton 1986, S. 317) In Abbildung 3-11 ist die Bildung einer Schmiedeüberlappung dargestellt.

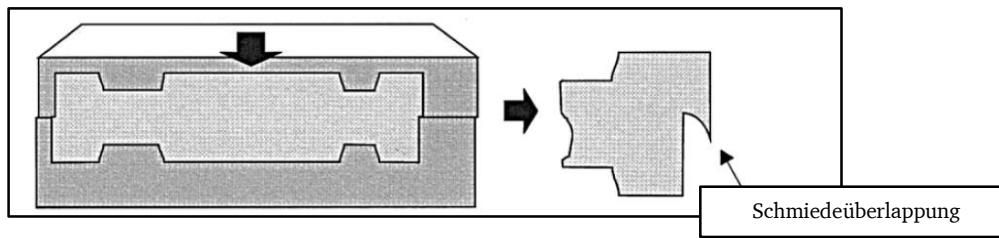


Abbildung 3-11 Schmiedeüberlappung während des Gesenkschmiedens, Quelle: Mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Schiebold 2015, S. 142

Nähte

Nähte sind längliche Oberflächenfehler geschmiedeter Werkstücke, siehe Abbildung 3-12. Sie können aus Überlappungen, Rissen oder nichtmetallischen Einschlüssen an der Werkstückoberfläche entstehen. (Colangelo und Thornton 1986, S. 317) Nähte werden durch diese Fehler, welche sich während dem Schmiedevorgang länglich verformen, begünstigt (Davis 1989, S. 439). Abbildung 3-12 zeigt eine Naht sowie deren Großaufnahme.

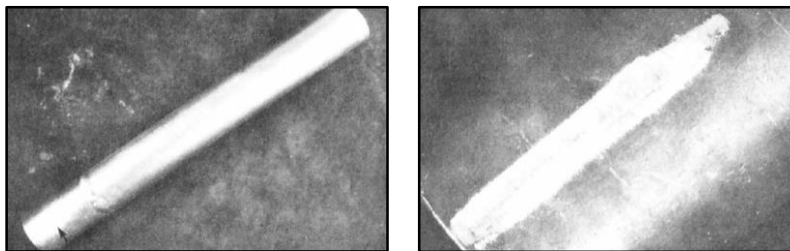


Abbildung 3-12 Links: Naht, rechts: Großaufnahme der Naht, Quelle: Colangelo und Thornton 1986, S. 331

Ausbrüche

Ausbrüche des Werkstoffmaterials folgen aus sehr hohen Zugspannungen, welche durch den Schmiedeprozess in das Werkstück eingebracht worden sind. Vor allem an Stellen, an welchen der Ausgangswerkstoff Fehler aus Vorprozessen aufweist, entstehen leicht Ausbrüche. (Colangelo und Thornton 1986, S. 317) Ausbrüche werden bspw. durch Einschlüsse oder die Porosität des Werkstoffs begünstigt (Davis 1989, S. 493).

Dellen

Dellen sind Schmiedefehler, welche auf unsachgemäße Schmiedearbeit zurückgehen (Sharma 2009, S. 255). In DIN EN ISO 8785 sind Dellen definiert als Einbuchtungen der Werkstückoberfläche, welche durch zu hohe Drücke bzw. Schläge ausgelöst worden sind (DIN EN ISO 8785, S. 74). In Abbildung 3-13 ist dieser Defekt dargestellt.

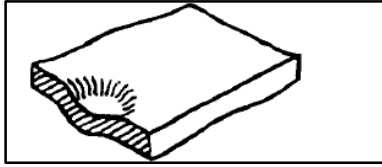


Abbildung 3-13 Delle, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 4

3.1.4 Walzfehler

Die Aufgabe des Walzprozesses ist es, Rohteile umzuformen. Diese Art der Umformung kann Oberflächenfehler oder Ebenheitsfehler des gewalzten Produktes hervorrufen. Oberflächenfehler sind hierbei schalenartige Fehler, Risse, Zunder sowie weitere mechanische Beschädigungen. Ebenheitsfehler führen zur Unebenheit des Bleches. (Verlag Stahleisen 2015, S. 16–17) Schalenartige Fehler sind Defekte wie Schalen, Blasen, Sandschalen und Schalenstreifen (längs und quer). Unter rissartigen Fehlern werden in der Walztechnik Fehler wie V-Risse, Z-Brüchigkeit, Längsrisse, Lunkerrisse, Temperaturführungsrisse und Kaltbrüchigkeit zusammengefasst. Die Fehlerart Zunder wird in Primärzundereinwalzung, Fremdzundereinwalzung und Fremdzundereindrücke gegliedert. Mechanische Beschädigungen sind bspw. Fremdkörpereinwalzungen, Kalteindrücke, Schergrate, Überwalzungen, Scherkantenbeschädigung, Kolkung, Kratzer, Riefen und Wärmeindrücke. Der Begriff Ebenheitsfehler umschreibt die Fehler der Randwelligkeit (einseitig, beidseitig), Mittenwellen, Ski am Blechkopf, Walzenschlag, Kurzwelligkeit, Querwölbung, Längswölbung sowie Kurzwelligkeit vom Quetten (Härten). (ebd.: 4-5) Zusätzlich zu den Defekten, welche durch Walzen in den Werkstoff eingebracht werden, führen auch die Lagerung oder der unsachgemäße Transport gewalzter Produkte zu Defekten. Lagerung und Transport führen bspw. zu Kratzern und Beschädigungen sowie Korrosion und Deformationen. (ebd.: 88-101)

Schalen

Schalen sind Walzfehler, welche dadurch charakterisiert sind, dass sie über das Rohteil hinwegragen, mit dem Grundmaterial aber in Verbindung stehen. Diese Fehler können alleine oder in Nestern sowie Bahnen auftreten. Die Ursache liegt in Poren, welche durch den Gießprozess ins Blech eingebracht wurden und durch das Warmwalzen zu Schalen gewalzt werden. (Verlag Stahleisen 2015, S. 21) Abbildung 3-14 zeigt eine Schale.



Abbildung 3-14 Schale in einem Blech, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 20

Sandstellen

Sandstellen sind an der Oberfläche gewalzter Produkte als Nester oder am Randbereich von Blechen zu finden. Ursache dieser Defekte ist der Einschluss des Pulvers während des Gießprozesses und anschließendes Walzen, wodurch die tiefliegenden Sandstellen an die Oberfläche gewalzt werden. (Verlag Stahleisen 2015, S. 25) Abbildung 3-15 zeigt eine Sandstelle.

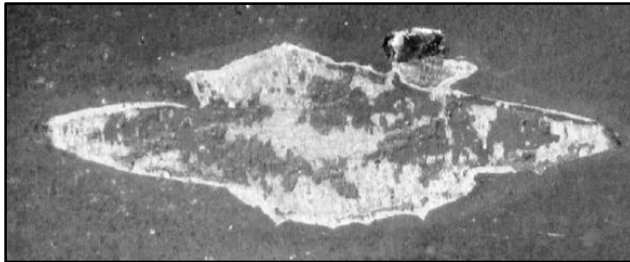


Abbildung 3-15 Sandstelle an einem Blech, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 24

Z-Brüchigkeit

Z-Brüchigkeit beschreibt die unregelmäßige Trennung von Material an den Oberflächen gewalzter Produkte, welche in Nestern oder Längsbahnen auftritt. Das Erscheinungsbild dieser Fehler ist Z- bzw. M-förmig. Diese Fehler entstehen durch die Ausbildung von Zugspannungen im Rahmen des Gießprozess und die darauffolgende Rissbildung sowie Verformung der Risse während des Walzvorgangs. (Verlag Stahleisen 2015, S. 35) Abbildung 3-16 zeigt Z-Brüchigkeit an einem Blech.



Abbildung 3-16 Z-Brüchigkeit an einem Blech, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 34

Fremdkörpereinwalzung

Fremdkörpereinwalzungen sind fremde Materialien wie z.B. Schrauben, welche wahllos auf der Oberfläche von Blechen eingewalzt worden sind. Diese sind tief in das Wälzprodukt eingewalzt, sodass die Oberfläche der Fremdkörper mit der Blechoberfläche auf einer Ebene liegt. (Verlag Stahleisen 2015, S. 47) Abbildung 3-17 zeigt bspw. eine in Blech eingewalzte Schraube.

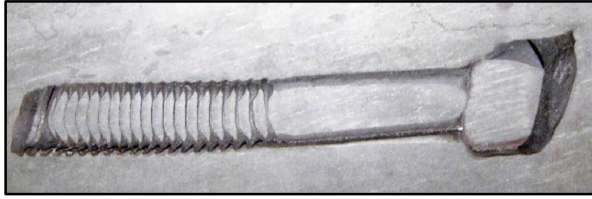


Abbildung 3-17 Fremdkörpereinwälzung in einem Blech, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 46

Kalteindrücke

Kalteindrücke sind Vertiefungen auf der Oberfläche gewalzter Produkte, wobei beide Blechseiten diese Defekte aufweisen können. Diese Fehler können wahllos auf der Oberfläche verteilt sein oder periodisch in gleichen Abständen auftreten. Zum Teil sind die entstandenen Vertiefungen mit Fremdmaterial gefüllt. Kalteindrücke werden durch geschädigte Richtrollen beim Kaltrichten auf die Blechoberflächen aufgebracht, wie auch beim Transport, Stapeln ohne Hölzer, durch Niederhalter oder Treiberrollen. Abbildung 3-18 zeigt mehrere Kalteindrücke in einem Blech. (Verlag Stahleisen 2015, S. 49)



Abbildung 3-18 Kalteindrücke in einem Blech, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 48

Korrosion

Der Vorgang der Korrosion beschreibt die Reaktion metallischer Materialien mit der Umwelt. Korrodierte Blechflächen entstehen bspw. durch unsachgemäßen Transport (Verlag Stahleisen 2015, S. 97) oder Lagerung (ebd.: 101). Abbildung 3-19 zeigt korrodierte Blechkanten.



Abbildung 3-19 Korrosion an Blechen, Quelle: Verlag Stahleisen 2015, S. 97

3.1.5 Schweißfehler

Hohlräume

In Schweißverbindungen können sich ebenfalls Hohlräume in Form von Poren und Lunkern ausbilden (Grosch 2014, S. 214). Die Porenbildung unterliegt ähnlichen Mechanismen, wie zuvor in 3.1.1 beschrieben. Dabei entstehen die Poren, wie Kugel- oder Schlauchporen bzw. ganze Porennester, -zeilen und -ketten auf mechanische Art. Ursache dafür sind eingeschlossene Gase in der schnell erstarrenden Schmelze. (Dilthey 2005, S. 264–265) Aufgrund der sinkenden Löslichkeit von Gasen in Metallschmelzen bei sinkender Temperatur können Poren ebenfalls auf metallurgische Art entstehen. Weiterhin ist es möglich, dass sich durch Schwindung nach dem Schweißvorgang Lunker bilden. (Dilthey 2005, S. 287–291) Die Dimensionen der hier genannten Lunker können im Bereich von unter 1 mm bis hin zu mehreren mm liegen (Dilthey 2005, S. 290).

Eigenspannungen

Durch die örtliche Wärmezufuhr und das anschließende schnelle lokale Abkühlen kommt es beim Schweißen infolge der Ausdehnung und dem Zusammenziehen der Schweißnahtbereiche zu Eigenspannungen im Bauteil. Diese Eigenspannungen können ebenfalls Verzüge oder Krümmungen verursachen. (Kalpakjian et al. 2011, S. 1001–1003)

Risse

Während der Bearbeitung der Bauteile mit verschiedenen Schweißverfahren sind unterschiedliche Rissarten ebenfalls nicht auszuschließen. Dabei kann wiederum zwischen Heißrissen, wie Erstarrungsrisse, Aufschmelzungsrisse und Kaltrissen, wie Aushärtungsrisse, wasserstoffinduzierte Risse, Lamellenrisse und Ausscheidungsrisse unterschieden werden. (Dilthey 2005, S. 268–287) Für die genauere Beschreibung der jeweiligen Entstehungsursachen wird auf Dilthey 2005 verwiesen. Je nach Rissart und Entstehungsmechanismus zeigen sich die Risse mit Breiten von einigen Mikrometern bis hin zu mehreren Millimetern, bei Längen bis zu mehreren Millimetern (abgeschätzt mit (Dilthey 2005, 270,273,278).

Schweißspritzer

Bei der Wahl des falschen Verfahrens, Schweißzusatzes, Gases oder falscher Schweißparameter können Schweißspritzer und Zündstellen entstehen. Schweißspritzer sind meist kugelige und kleine Anschmelzstellen auf den Werkstückoberflächen. Dabei handelt es sich um Metalltröpfchen, die aus dem Schmelzbad heraus oder vom flüssigen Elektrodenende weggeschleudert werden. In Einzelfällen kann die Nahtqualität gemindert werden, wenn die

Schweißspritzer zu örtlichen Gefüge- und Spannungsänderungen oder Eigenschaftsänderungen führen.

Zündstellen

Zündstellen treten außerhalb der Naht durch Kontaktieren der Elektrode mit der Werkstückoberfläche oder durch Lichtbogenüberschläge aufgrund von unzureichend kontaktierten Masseanschlüssen auf. Diese können hohe Aufhärtungen verursachen, die bei speziellen Werkstoffen Ausgangspunkte für Härterisse bieten. (Dilthey 2005, S. 259–260)

Einbrand- und Randkerben

Einbrand- und Randkerben sind rinnenförmige, oft schlackengefüllte Vertiefungen am Übergang zwischen aufgeschmolzenem Grundwerkstoff und Schweißgut. Diese ereignen sich ebenfalls durch die Wahl von falschen Verfahrensparametern, wie zu hohe Schweißspannung, falsche Anstellung der Elektroden oder überhöhte Schweißgeschwindigkeiten. Durch das Auftreten dieser Kerben kann es bei späterer dynamischer Beanspruchung zu Rissen und Versagen des Bauteils führen. (Dilthey 2005, S. 260–261)

Korrosion

Während dem Schweißen können die Bauteile ebenfalls durch Korrosion beschädigt werden. Durch die verfahrenstypischen Eigenschaften führen verschiedene Mechanismen beim Schweißen zu unterschiedlichen Korrosionsarten. Beispiele hierfür sind die Kontaktkorrosion, Spaltkorrosion, Interkristalline Korrosion und die spannungsinduzierte Risskorrosion. (Dilthey 2005, S. 291–294).

3.1.6 Fehler in additiv gefertigten Bauteilen

Additive Fertigungsverfahren basieren auf dem Schichtbauprinzip und benötigen keine bauteilabhängigen Werkzeuge. Aufgrund der enormen geometrischen Freiheiten und den damit verbundenen Möglichkeiten der Herstellung komplexer Bauteile, erfährt diese Branche ein enormes Marktwachstum in den letzten Jahren. (Töppel et al. 2016, S. 176) Besonders um die Oberflächeneigenschaften additiv gefertigter Bauteile zu erhöhen, werden diese oft spanend nachbearbeitet.

Auch bei additiv gefertigten Bauteilen können Fehler in der Herstellung entstehen. Zu typischen Fehlern zählen auch hier Hohlräume, Poren und Lunker. Weiterhin spielt das Einbringen von festen Einschlüssen und Schlacken, speziell bei additiven Schweißverfahren wie Lasersintern und Laserschmelzen, eine wichtige Rolle. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus kann die Ausprägung der Fehler sehr klein und flach sein. (Zenzinger et al. 2014, S. 45) Die hohen lokalen

Temperaturgradienten führen weiterhin zu hohen lokalen elastischen und plastischen Dehnungen, wodurch unerwünschte Eigenspannungen und Verzüge bis hin zu Rissen, Delaminationen und Geometrieversätzen entstehen. (Töppel et al. 2016, S. 176–177) Das Fehlerspektrum dieser Fertigungsmethode erweitert sich durch die Neigung der Bauteile zum „Wachsen“. Dabei werden nicht zum Bauteil zugehörige Partikel des Pulverbetts über Wärmeleitung thermisch aktiviert und „kleben“ an der Kontur des Werkstückes an. Bei der Fertigung von inneren Hohlräumen können außerdem lose oder leicht angeklebte Partikel verbleiben, welche sich im Betrieb lösen können. (Gebhardt et al. 2016, S. 66)

3.1.7 Festigkeitsänderungen

Mithilfe der gezielten Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, speziell Stahlwerkstoffe, können die gewünschten mechanischen Eigenschaften wie Härte, Festigkeit und Zähigkeit beeinflusst werden. (Bergner et al. 2017, S. 79) Dadurch lassen sich Bauteile besser bearbeiten (z.B. Spanen, Umformen etc.). Weiterhin können kleine Bauteile höhere Belastungen aufnehmen oder ihre Lebensdauer durch Verschleißminderung erhöht werden. (Seidel und Hahn 2010, S. 108) Grundsätzlich existieren folgende Wärmebehandlungsverfahren: Glühen, Härten, Vergüten.

Beim *Glühen* wird das Werkstück zunächst auf Glühtemperatur gehalten und abschließend abgekühlt. Dadurch können unterschiedliche Gefügeumwandlungen erfolgen. Abbildung 3-20 zeigt die verschiedenen Temperaturbereiche und Glühfarben für die einzelnen Verfahren. Typische Glühdauern betragen 1 bis 2 Stunden. (Bergner et al. 2017, S. 79) Für die Zerspanung von besonderer Bedeutung sind Weichglühen und Grobkornglühen. Sie dienen dazu den Werkstoff leichter bzw. besser spanbar zu machen. (Bergner et al. 2017, S. 79; Seidel und Hahn 2010, S. 128–131)

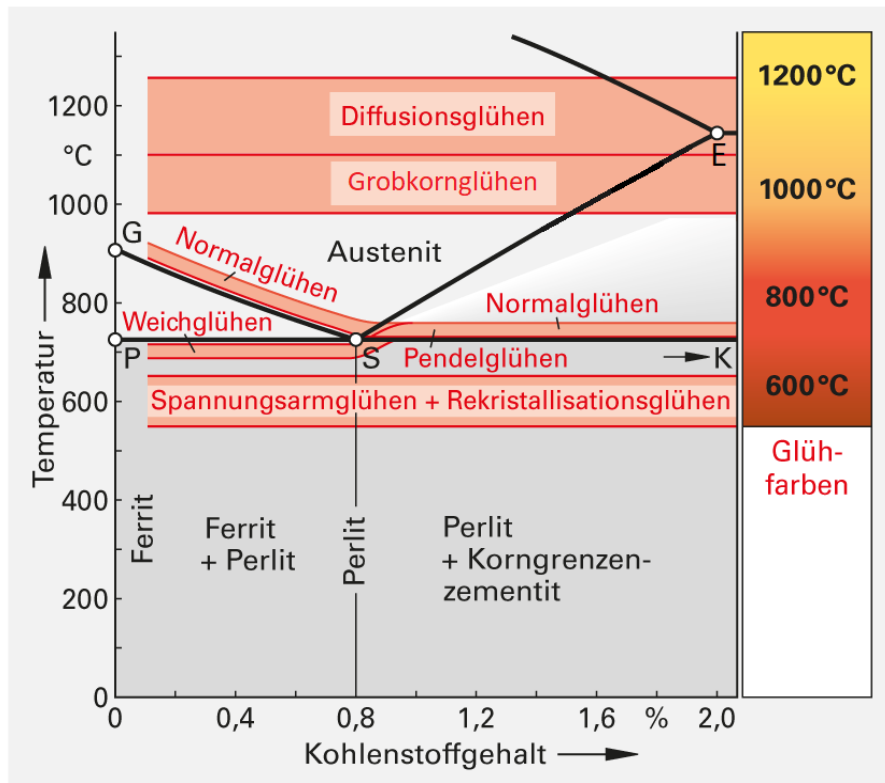


Abbildung 3-20 Temperaturbereiche und Glühfarben der verschiedenen Glühverfahren nach Bergner et al. 2017, S. 179

Das Härten dient dazu Stähle hart und verschleißfest zu machen. Außerdem verbessert es die Festigkeitseigenschaften (durch geeignetes anschließendes Anlassen) und durch das spezielle Verfahren der Randschichthärtung lässt sich die Dauerfestigkeit erhöhen. Grundprinzip hinter dem Härten ist die rasche Abkühlung (Abkühlgeschwindigkeit höher als die kritische Abkühlgeschwindigkeit) nach voriger Erwärmung in das Austenitgebiet (siehe Abbildung 3-20). Durch anschließendes Anlassen auf bestimmten Temperaturen kann die durch die Härtung hervorgerufene Sprödigkeit herabgesetzt werden. Randschichthärten stellt ein besonderes Verfahren dar, da hier nur die äußeren Randschichten einer Härtung unterzogen werden. (Bergner et al. 2017, S. 80–81; Seidel und Hahn 2010, S. 135–138) Die Kombination aus Härten und anschließendem Anlassen bei hohen Temperaturen nennt sich *Vergüten*. Dabei ist das primäre Ziel, Eisenwerkstoffe mit hoher Festigkeit und gleichzeitiger erhöhter Zähigkeit zu erhalten. (Seidel und Hahn 2010, S. 139)

Aufgrund der Tatsache, dass Werkstücke vor der spanenden Bearbeitung Wärmebehandlungen unterzogen werden, zeigen sich verschiedene Möglichkeiten von auftretenden Materialfehlern. Somit können durch falsche Parameter bei der Wärmebehandlung die zu bearbeitenden Bauteile abweichende Werkstoffeigenschaften (z.B. Härte oder Zähigkeit) zu den gewünschten besitzen.

3.2 Fehler am Werkstück durch Zerspanung

3.2.1 Risse

Risse sind nach DIN EN ISO 8785 definiert als tiefliegende Graben, welche die Form von Linien aufweisen und einen spitzen Boden besitzen (DIN EN ISO 8785, S. 4). Diese Fehler führen zu einer verschlechterten Funktionsfähigkeit von Bauteilen (Griffiths 2001, S. 170). Das Aussehen eines typischen Risses ist in Abbildung 3-21 dargestellt.

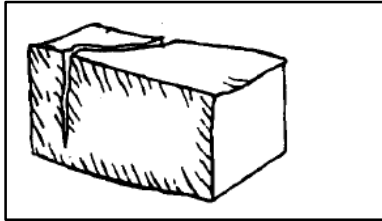


Abbildung 3-21 Darstellung eines Risses, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 4

Risse verfügen über eine geringe Breite, weisen jedoch eine erhebliche Länge und Tiefe auf (Brinksmeier 1991, S. 23). Sie können sich innerhalb des Werkstoffs oder an der Werkstoffoberfläche befinden und besitzen unterschiedliche Orientierungen (ebd.: 112). Es wird zwischen Mikro- und Makrorissen unterschieden. Diese Unterscheidung erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Sichtbarkeit. Im Gegensatz zu Makrorissen benötigt es zur Erfassung von Mikrorissen eine Vergrößerung von 10 oder höher. (Astakhov 2010, S. 9) Mikrorisse an der Oberfläche sind in DIN EN ISO 8785 definiert als Fehler an der Werkstückoberfläche, welche aus Verflechtungen flacher Vertiefungen (Ritzen) bestehen. (DIN EN ISO 8785, S. 6). Ein Netz von Mikrorissen ist in Abbildung 3-22 dargestellt.

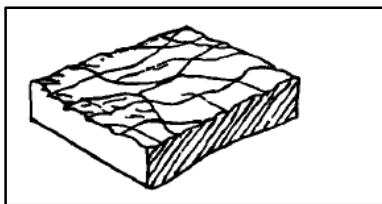


Abbildung 3-22 Darstellung von Mikrorissen, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 6

Typischerweise liegt die Ursache von Rissen im Werkstoffgefüge. Diese können sich innerhalb der Mikrostruktur des Werkstoffs oder auf der Werkstoffoberfläche befinden. (Lyon et al. 2015, S. 32) Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rissen während der Zerspanung steigt, sobald Aufbauschneidenbildung, Martensitbildung, Gratbildung (Petropoulos et al. 2010, S. 39; Grzesik et al. 2010, S. 176) oder plastische Verformungen auftreten (Griffiths 2001, S. 163). Risse werden besonders durch das Spanen im „groben“ Zustand hervorgerufen. Hierbei entstehen sie durch mechanische, thermische, mechanisch-thermische, thermisch-mechanische und chemische Beanspruchungen. (Griffiths 2001, S. 188; Petropoulos et al. 2010, S. 39) Die Rissbildung ist

allgemein auch bei niedrigen Spangeschwindigkeiten, hohen Schnitttiefen und unkontrollierten Span-Werkzeug-Kontaktlängen (Sadat und Reddy 1992, S. 286) sowie dem Spanen ohne Schmierung verstärkt (Sadat und Reddy 1993, S. 347).

3.2.2 Grate

Nach DIN ISO 13715 bestehen Grate aus Material, welches über die Kante eines Werkstücks hervortritt (DIN ISO 13715, S. 3). Das allgemeine Aussehen eines Grates ist in Abbildung 3-23 dargestellt.

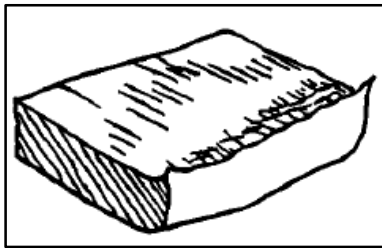


Abbildung 3-23 Darstellung eines Grats, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 5

Grate können verschiedene Formen und Maße annehmen. (Niknam und Songmene 2014, S. 894). Gillespie und Blotter teilten Grate in vier verschiedene Typen ein. Sie definierten dabei den Poisson-Grat (Englisch: poisson burr), den Überwälzungs-Grat (Englisch: roll-over burr), den Riss-Grat (Englisch: tear Burr) und den Trenn-Grat (Englisch: cut-off burr) (Gillespie und Blotter 1976, S. 4–5). Der Poisson-Grat resultiert aus der Eigenschaft von Werkstoffen sich durch eine Kompression lateral zur Seite der Arbeitskante zu wölben (Chern 2006, S. 1518). Die Kompression endet beim Poisson-Grat sobald plastische Verformung eintritt. Der Überwälzungs-Grat besteht aus einem Span, der durch die Werkzeugschneide aus dem Weg gedrückt wird anstatt abzuscheren. Dieser Typ verbleibt als langer Grat am Ende des Schneideortes. Der Riss-Grat entsteht durch Material, welches vom Werkstück losreißt anstatt abzuscheren. Der Trenn-Grat geht hervor aus der frühzeitigen Trennung von Material und Werkstück. Dabei separiert sich das Material vom Werkstück bevor der Schnitt beendet ist. Diese vier Typen treten häufig in Kombination auf. Dennoch ist eine konkrete Einordnung möglich, da normalerweise ein Grattyp dominiert. (Gillespie und Blotter 1976, S. 4–5)

In der Industrie ist die Entstehung von Graten ein zentrales Thema (Niknam und Songmene 2014, S. 894). Sie spielen in Zerspanungsprozessen wie Drehen, Bohren und Fräsen eine zu beachtende Rolle. Grate wirken negativ auf die Oberflächenintegrität ein und begünstigen die Rissbildung. (Griffiths 2001, S. 167–168) Grate beeinflussen ebenso die Werkstückgenauigkeit und Qualität wie die Montage (Dornfeld und Min 2010, 3-4). Allgemein wird die Gratbildung durch Spanen unter „groben“ Bedingungen gefördert (Griffiths 2001, S. 188).

3.2.3 Weiße Schicht

Der Begriff „Weiße Schicht“ (Englisch: white layer = WL, oder auch white etching Layer = WEL (Hosseini et al. 2015, S. 258) umschreibt eine sehr harte Werkstoffschicht, welche unter dem Mikroskop weiß erscheint. Diese Schicht wird durch die spanende Bearbeitung eines Werkstückes verursacht. (Griffiths 1987, S. 525) WL tritt linien- oder bogenförmig auf und besitzt eine höhere Härte als das Grundmaterial des Werkstücks (Grzesik et al. 2010, S. 154–155) Das Vorkommen einer weißen Schicht auf einem Werkstück wird generell als Defekt aufgefasst (Grzesik et al. 2010, S. 163). Abbildung 3-24 veranschaulicht das Aussehen einer weißen Schicht.

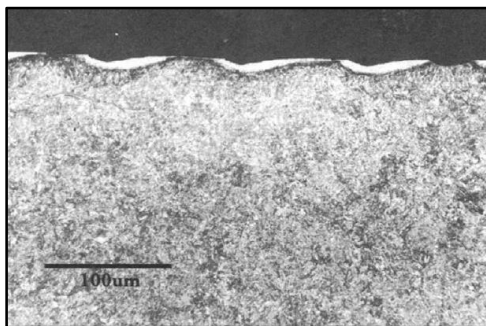


Abbildung 3-24 Darstellung einer weißen Schicht, Quelle: Griffiths 2001, S. 156 nach Machinability Data Center und Metcut Research Associates Inc 1980, S. 18–64

Weißer Schichten treten aufgrund von drei Hauptursachen auf. Diese sind hohe Temperaturen bzw. Temperaturgradienten, die Reaktion mit der Umwelt und plastisches Fließen. (Griffiths 1987, S. 526)

In der Zerspanung von Metallen sind vor allem die thermischen und mechanischen Effekte für die Bildung von WL verantwortlich (Han et al. 2008, S. 195; Hosseini et al. 2015, S. 259). Es existieren viele verschiedene Arten der weißen Schicht (Griffiths 1987, S. 525). Die Schichten variieren je nachdem welche thermischen, mechanischen oder chemischen Kräfte am Werkstück wirken (Griffiths 1987, S. 529). Das Auftreten einer WL ist vor allem beim Bohren und Hartdrehen problematisch, da hier während der Bearbeitung sehr hohe Temperaturen an den Werkstückoberflächen entstehen (Griffiths 2001, S. 162). Parameter, welche die Bildung von WL beeinflussen sind die Schnittgeschwindigkeit, der Vorschub (Zhang et al. 2016, S. 8) sowie der Schneidverschleiß (Bartarya und Choudhury 2016, S. 854-2; Bushlya et al. 2011, S. 62).

3.2.4 Überlappungen, Ausreißer und ähnliche Fehler

Weitere Fehler der Oberflächenintegrität sind Aufreißer, Überlappungen, spaltenartige Fehler, Ausstülpungen (Field und Kahles 1971, S. 153; Field et al. 1972, S. 220), Grübchen, Krater, Einschlüsse, Ablagerungen (Astakhov 2010, S. 8–10; Grzesik 2008, S. 144), Knötchen und Hohlräume (Griffiths 2001, S. 153).

Aufreißer (Englisch: tears) und Überlappungen (Englisch: laps) wurden im Sinne der Einteilung als Oberflächenfehler bereits früh von Fields et al. als Fehler der Oberflächenintegrität erwähnt (Field und Kahles 1971, S. 153). Aufreißer sind Werkstückdefekte, die sich durch abruptes entreißen von Material bilden. Sie entstehen, wenn die Adhäsion zwischen Werkzeug und Werkstückoberfläche derart hoch ist, dass das Oberflächenmaterial ausbricht. (Griffiths 2001, S. 172; DIN EN ISO 8785, S. 5). Abbildung 3-25 visualisiert das Aussehen von Aufreißern.

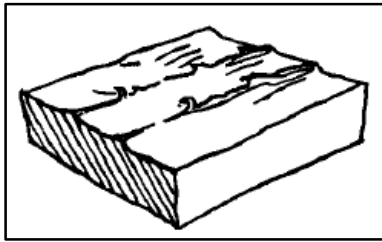


Abbildung 3-25 Darstellung von Aufreißern, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 6

Überlappungen sind in DIN EN ISO 8785 definiert als eine halb elliptische Erhebung, welche durch eine Werkstofffalte verursacht und bspw. während der Bearbeitung beim Walzen oder Schmieden in die Oberfläche hineingepresst wird (DIN EN ISO 8785, S. 5). Im Gegensatz zu Aufreißern wird bei den Überlappungen Material auf eine Werkstoffoberfläche hinzugefügt (Griffiths 2001, S. 172). Überlappungen entstehen vor allem bei hohem Schneidenschleiß (Koster und Fritz 1970, 4). In Abbildung 3-26 ist eine beispielhafte Überlappung dargestellt.

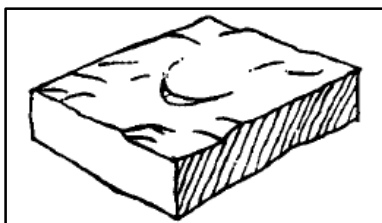


Abbildung 3-26 Darstellung einer Überlappung, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 5

Die Aufbauschneidenbildung (Englisch: build-up-edge) ist eine Form von Überlappung (Griffiths 2001, S. 172). Diese beschreibt die Anhaftung von Spanpartikeln auf dem Schneidewerkzeug, welche einen negativen Einfluss auf die zu bearbeitende Werkstückfläche hat (Dietrich 2016b, S. 27). Neben Ablagerungen auf dem Werkstück durch Aufbauschneiden kommt es teilweise auch zu Ablagerungen (Englisch: deposits) auf dem Werkstück durch abgesplitterte Partikel des Werkzeugs. Diese entstehen sobald das Werkzeug Verschleiß erfährt. Bei steigender Anzahl aufgebrachtter Partikel auf dem Werkstück steigt die Spannungskonzentration, was dazu führt, dass die Partikel aus der Werkstückoberfläche ausreißen. (Griffiths 2001, 174)

Wie bereits aufgeführt, können durch die Zerspanung am Werkstück auch Einschlüsse (Englisch: inclusion), Krater (Englisch: crater) und Grübchen (Englisch: pits) entstehen. Nach DIN EN ISO

8785 sind Einschlüsse Partikel, welche aus fremdem Material bestehen und sich in einem Werkstück befinden (DIN EN ISO 8785, S. 5). Dies sind bspw. nicht-metallische Elemente, die durch den Prozess in das Metall eingebracht werden (Griffiths 2001, S. 9). Abbildung 3-27 bildet einen Einschluss ab.

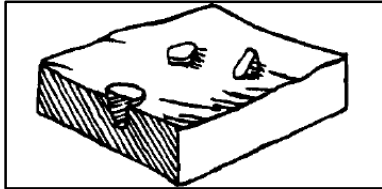


Abbildung 3-27 Darstellung eines Einschlusses, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 5

Krater sind nach DIN EN ISO 8785 kreisförmige Einbuchtungen, welche durch erhöhte Kanten an der Werkstückoberfläche abgeschlossen werden (DIN EN ISO 8785, S. 5). In Abbildung 3-28 sind einige Krater dargestellt.

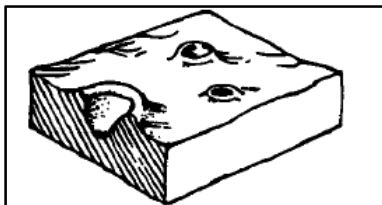


Abbildung 3-28 Darstellung mehrerer Krater, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 5

Grübchen sind nach dieser Norm kleine lochartige Defekte, welche weite Bereiche der Oberfläche eines Werkstücks betreffen können (DIN EN ISO 8785, S. 6). In Abbildung 3-29 sind Grübchen dargestellt.

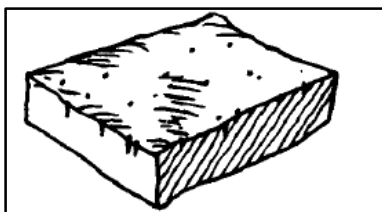


Abbildung 3-29 Darstellung mehrerer Grübchen, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 6

Brüche, Sprünge, Spalten (Englisch: crevice like defects) haben grundsätzlich ein ähnliches Aussehen und sind entsprechend wie Risse, spitze Öffnungen, besitzen jedoch eine inhomogene Form und sind flach ausgeprägt (DIN EN ISO 8785, S. 4) Die Form dieser Defekte ist in Abbildung 3-30 dargestellt.

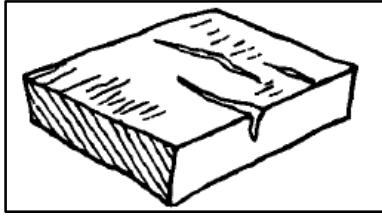


Abbildung 3-30 Darstellung von Brüchen, Sprüngen, Spalten, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 4

Beulen (Englisch: protrusions) sind Wölbungen an der Oberfläche von Werkstücken (DIN EN ISO 8785, S. 5). Eine Beule an einem Werkstück ist in Abbildung 3-31 dargestellt.



Abbildung 3-31 Darstellung einer Beule, Quelle: DIN EN ISO 8785, S. 5

Die in diesem Abschnitt erläuterten Arten von Oberflächenfehlern werden durch die Schnittgeschwindigkeit, und die Schnitttiefe beeinflusst. Generell erfolgt dabei ein Anstieg der Oberflächenfehler bei langsamen Schnittgeschwindigkeiten und hohen Schnitttiefen. (Sadat und Reddy 1992, S. 286) Demnach entstehen diese Fehler häufig unter „groben“ Zerspanungsbedingungen (Field 1973, S. 4).

3.2.5 Plastische Verformung

Plastische Verformungen sind starke Deformationen der Werkstückoberfläche. Ursachen sind zu hohe Reibungen und Kräfte im Zerspanungsprozess. (Astakhov 2010, S. 10) Um die gewünschte Form herzustellen, müssen die Zerspanungskräfte größer sein als die Werkstückfestigkeit, sodass Späne gebildet werden können (Astakhov und Shvets 2004, S. 193). Sobald diese Kräfte einen bestimmten Grenzwert der Fließspannung übersteigen, tritt plastische Verformung ein (Griffiths 2001, S. 162). Jedoch sollte ein idealer Zerspanungsprozess generell nicht mehr als die zur Zerspanung benötigte plastische Verformung im Werkstück hervorrufen, da ansonsten Prozessenergie verschwendet wird (Astakhov und Shvets 2004, S. 200).

Plastische Verformungen, wie in Abbildung 3-32 dargestellt, nehmen im Bereich der Zerspanung einen besonderen Stellenwert ein, da sie häufig der Ausgangspunkt von Werkstückfehlern sind. So erhöhen übermäßige, plastische Verformungen die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Graten, Überlappungen und Aufbauschneiden. (Griffiths 2001, S. 163) Aber auch auf atomarer Ebene üben sie einen negativen Einfluss auf die Werkstückqualität aus. Hier sind sie ursächlich für Leerstellen, Fehlstellen und Versetzungen (ebd.: 165-166).

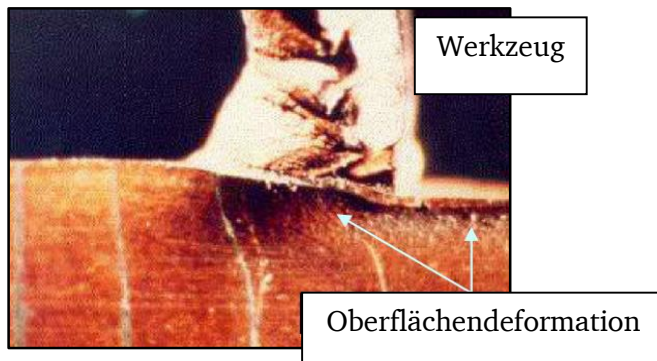


Abbildung 3-32 Plastische Verformung, Quelle: Mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Astakhov 2010, S. 12

Die Intensität einer plastischen Verformung wird beim Drehen und Hartdrehen von der Schnittgeschwindigkeit beeinflusst (Neslušán et al. 2003, S. 248; Sadat und Reddy 1993, S. 248). Gleichzeitig kann die Entstehung durch die Verwendung von Schmiermitteln verringert werden (Sadat und Reddy 1993, S. 347). Je höher der Werkzeugverschleiß wiederum, desto höher sind die plastischen Verformungen beim Bohren (Koster und Fritz 1970, 4; Martinkovič et al. 2014, S. 79–80), Drehen/Hartdrehen (Grum 2010, S. 76; Sharman et al. 2006, S. 366) und Fräsen (Koster und Fritz 1970, 7).

3.2.6 Eigenspannungen

Eigenspannungen sind Spannungen in einem gefertigten Teil, die ohne Beeinflussung durch extrinsische Kräfte im Bauteil wirken (Wolfstieg und Macherauch 1973, S. 760). Diese Spannungen können durch Zerspanungsprozesse in das Werkstück eingebracht werden (Field und Kahles 1971, S. 158).

Je nachdem welches Zerspanungsverfahren angewandt wird, unterscheiden sich die Spannungen stark. Die Spannungen befinden sich in der Oberflächenschicht des Bauteils und beeinflussen dessen funktionales Verhalten. Bei einseitiger Bearbeitung eines Werkstücks können die eingebrachten Spannungen bspw. zu deutlichem Werkstückverzug führen. (Griffiths 2001, S. 178) Aber auch die prinzipiellen Materialeigenschaften eines Werkstücks wie Spannungsrisskorrosion und Materialermüdung werden von den Eigenspannungen beeinflusst (M'Saoubi et al. 1999, S. 225).

Es gibt verschiedene Arten von Eigenspannungen. In der Zerspanungstechnik wird zwischen Zugeigenspannungen und Druckeigenspannungen unterschieden. Dabei führen Zugeigenspannungen zu einer deutlich schlechteren Oberflächenintegrität, während Druckeigenspannungen die Oberflächenintegrität teilweise verbessern, indem sie vorhandene Risse verschließen. (Griffiths 2001, S. 178)

Innerhalb von Zerspanungsprozessen gehen Eigenspannungen generell auf Kombinationen mechanischer und thermischer Effekte zurück (Abrão und Aspinwall 1996, S. 283), welche in die thermische Phasentransformation, die thermisch-plastische Deformation und die mechanisch-plastische Deformation unterteilt werden können (Griffiths 2001, S. 179; Brinksmeier et al. 1982, S. 506).

Die Ausbildung von Eigenspannungen während eines Zerspanungsvorganges wird durch verschiedene Parameter begünstigt. Bspw. beeinflusst der Werkzeugvorschub und die Schnittgeschwindigkeit die Ausbildung von Spannungen. So geht mit dem Anstieg des Werkzeugvorschubs ein Zuwachs an Zugeigenspannungen einher, während die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu einer Abnahme der Zugeigenspannungen führt. (M'Saoubi et al. 1999, S. 233) Auch die Werkzeuggeometrie und die Schmierung üben einen Einfluss aus (ebd.: 225). Bei der Zerspanung ohne Schmierung sind die Eigenspannungen bspw. niedriger als mit Schmierung (Sadat und Reddy 1993, S. 347). Generell besteht ein Zusammenhang zwischen der „groben“ Bearbeitung und dem Einbringen von Eigenspannungen. So erhöhen sich die Eigenspannungen, wenn eine stumpfe Schneide genutzt wird. (Field 1973, S. 5) Der Schneidverschleiß ist einer der wichtigsten Einflussparameter auf die Ausbildung von Eigenspannungen beim Spanen (Chen et al. 2004, S. 1). Mit Zunahme des Verschleißes kommt es zu einer Erhöhung der Zugeigenspannungen auf der Werkstückoberfläche und einem Anstieg der Druckeigenspannungen in der Oberflächenschicht (Liu et al. 2004, S. 240). Dadurch führt Verschleiß zu einem gesteigerten, negativen Einfluss durch Eigenspannungen während der Zerspanung (Tang et al. 2009, S. 4507; Brinksmeier et al. 1982, S. 505; Sharman et al. 2006, S. 366; Madariaga et al. 2016, S. 270; Abrão und Aspinwall 1996, S. 281).

3.3 Werkzeugbedingte Fehler

3.3.1 Ausbrüche

Als Ausbruch wird das Abbrechen eines Teils der Schnittkante des Werkzeugs verstanden. Dabei kann es zu kleinen (Mikroausbrüche) oder relativ großen (Makroausbrüche) Ausbrüchen kommen. Die Hauptursachen sind mechanische Stoßbelastungen und thermische Ermüdung. (Kalpakjian et al. 2011, S. 615–616) Diese sind Folgen von vielfach zu hohen Vorschüben oder zu großen Schnitttiefen, harte Fremdkörper im Werkstückstoff und ungünstigen Spannungsbedingungen. (Dietrich 2016a, S. 28–29) Weitere Ursachen von Ausbrüchen sind auf der Schneidkante aufschlagende Späne oder beim Drehen, das Einklemmen von Spänen zwischen Schneidplatte und Werkstück. Abbildung 3-33 zeigt einen Ausbruch an der Schneidkante. Häufig sind auch kleine Risse oder Defekte vorhanden, bevor es zu einem Bruch oder einer Absplitterung kommt. (Kalpakjian et al. 2011, S. 616)



Abbildung 3-33 Ausbruch an Schneidkante mit roter Markierung

3.3.2 Querrisse und Kammrisse

Querrisse entstehen durch kurzzeitig aufeinander folgende Schnittkraftwechsel. Dies geschieht vor allem beim Fräsen aufgrund des unterbrochenen Schnitts und der damit verbundenen mechanischen Wechselbeanspruchung des Werkzeugs. Querrisse können sich auch durch die schnell wechselnde Belastung bei Lamellenspannbildung beim Überschreiten der kritischen Lastspielzahl bilden. (Klocke und König 2008, S. 89–90; Heisel 2014, S. 89–90)

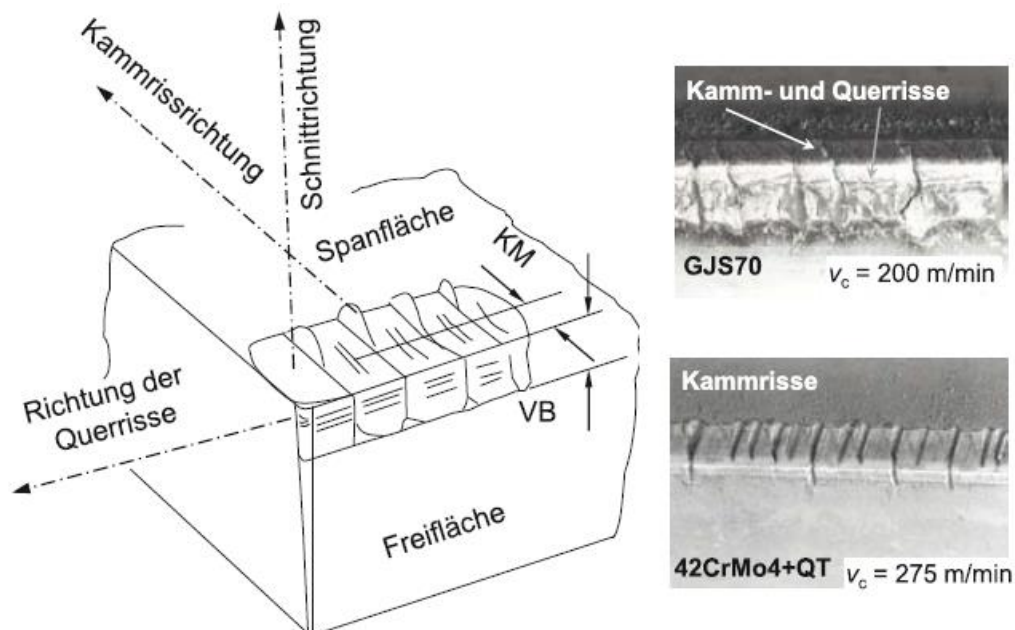


Abbildung 3-34 Querrisse und Kammrisse beim Fräsen nach Heisel 2014, S. 89; KM steht für Kolkmittenabstand und VB entspricht der Verschleißmarkenbreite

Aus Abbildung 3-34 geht hervor, dass neben der Querrissbildung auch zusätzlich noch *Kammrisse* auf der Schneide entstehen. Diese bilden sich infolge von thermischen Wechselbeanspruchungen und treten ebenfalls beim Arbeiten mit unterbrochenem Schnitt auf. Die Werkzeugschneide heizt sich während dem Eingriff durch die starke Wärmeeinwirkung schnell auf und kühlt bei Unterbrechung des Schnittvorgangs wieder stark ab. Dabei ist die Temperaturdifferenz im

Wesentlichen vom Werkstoff, den Schnittbedingungen und dem Verhältnis zwischen im Werkstoff und in der Luft zurückgelegten Wegen abhängig. Die Kühlung mit Kühlschmierstoffen bewirkt dabei eine sehr viel größere Abschreckwirkung als Luft, wodurch bei Hartmetallen und keramischen Schneidstoffen die Kammrissbildung begünstigt wird. Diese Temperaturwechselrisse, wie sie beim Fräsen oder kurzzyklischem Drehen entstehen, sind von den Thermoschockrisse zu unterscheiden. *Thermoschockrisse* entstehen durch einmalig auftretende, extreme Abkühlung des Werkzeuges. Durch den Thermoschock induzieren sich Zugspannungen, welche die Festigkeit des Schneidstoffes übersteigen und damit unmittelbar zur Bildung von Rissen führen. Die durch Risse ausgehende Kerbwirkung dient selbst wieder als Ausgangspunkt weiterer Risse. (Klocke und König 2008, S. 83–85; Heisel 2014, S. 89)

3.3.3 Plastische Verformungen

Plastische Verformungen in Werkzeugen treten auf, wenn durch die wirkenden thermischen und mechanischen Belastungen der Verformungswiderstand des Schneidstoffes überschritten wird (siehe Abbildung 3-35). Die Ursachen liegen somit in hohen Bearbeitungstemperaturen bei gleichzeitig wirkenden großen Kräften. Beeinflusst wird die plastische Verformung durch Faktoren wie die Festigkeit des Bauteilwerkstoffes, die Schnittbedingungen, die Plattengeometrie und die Hochtemperatureigenschaften des Schneidstoffes wie Härte, Druckfestigkeit und Kriechverhalten. Der Verschleiß steigt durch die Verformungen sehr stark an und es können sich als Folge Risse bilden bis hin zur Abscherung der Schneidkante. (Klocke und König 2008, S. 85; Heisel 2014, S. 90; Dietrich 2016a, S. 28)



Abbildung 3-35 Plastische Verformung am Werkzeug, Quelle: sandvik.coromant.com 2017

3.3.4 Aufbauschneidenbildung

Die Aufbauschneidenbildung ist durch die Adhäsion verursacht. Es kommt zu Aufschweißerscheinungen von Spanpartikeln auf der Schneidplatte, welche als hochverfestigte „aufgeklebte“ Schichten die Funktion der Werkzeugschneide übernehmen, wodurch es zu einer Verschlechterung der Oberfläche des Werkstückes und zu Maßungenauigkeiten kommt. Aufbauschneiden führen zu erhöhtem Freiflächenverschleiß. Die Bildung von Aufbauschneiden

wird bei relativ zähen Materialien (z. B. Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, rostfreier Stahl, Aluminium) und bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten begünstigt. (Klocke und König 2008, S. 80–82; Dietrich 2016a, S. 26)

3.3.5 Verzunderungen

Verzunderungen zeigen sich durch Anlauffarben in der Nähe von Kontaktzonen. Diese Art des Fehlers basiert auf der Oxidation des Schneidstoffes. Je nach Schneidwerkstoff und Schneidentemperatur erlangt die Verzunderung unterschiedlich starke Ausprägungen. Hartmetall beginnt schon bei 700 °C–800 °C zu oxidieren. Hartmetalle aus reinem Wolframkarbid und Kobalt oxidieren schneller als welche mit Zusätzen von Titankarbid oder anderen Karbiden. Bereits unter üblichen Schnittbedingungen bilden sich bei wolframkarbidhaltigen Werkzeugen durch die Einwirkung des in der Luft vorhandenen Sauerstoffs Oxidfilme auf der Oberfläche.

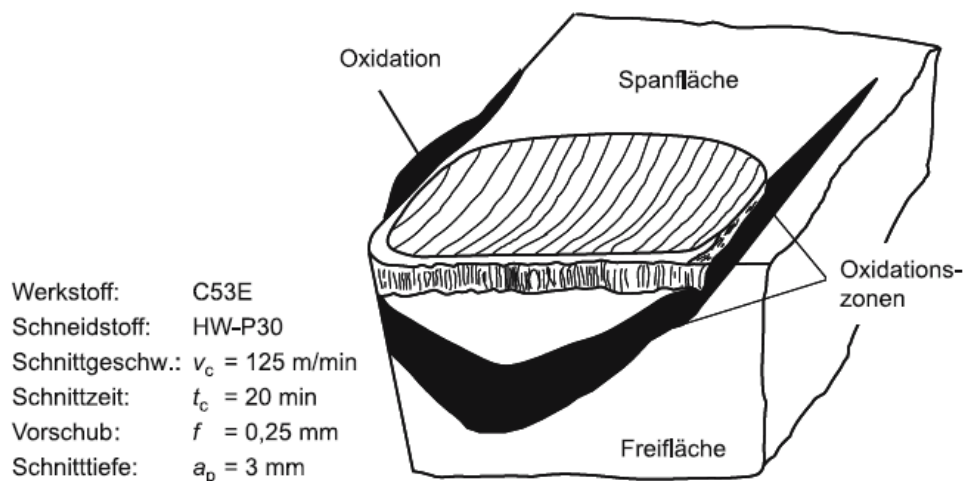


Abbildung 3-36 Oxidationszonen am Hartmetall-Drehwerkzeug, Quelle: Klocke und König 2008, S. 90

Abbildung 3-36 zeigt die Oxidationszonen am Hartmetallwerkzeug an denen der Luftsauerstoff frei herankommt. Diese Verzunderungen können sich stark ausbreiten und schließlich auch zu Ausbrüchen der Schneidenecken führen. Im Gegensatz zu Hartmetallen spielen bei Werkzeugstählen und Schnellarbeitsstählen Verzunderungen eine geringere Rolle, da zunächst ihre Warmfestigkeit überschritten wird, bevor die Oberflächen stärker oxidieren können. (Klocke und König 2008, S. 89–91; Heisel 2014, S. 94–95)

3.3.6 Rattern

Als Rattern bezeichnen sich selbsterregte Schwingungen, welche durch Wechselwirkungen des spanabhebenden Prozesses mit der Struktur der Werkzeugmaschine entstehen. Rattern beginnt gemeinhin mit einer Störung in der Schnittzone. Ursachen für die entstehenden Schwingungen sind Inhomogenitäten im Werkstückwerkstoff oder in dessen Oberflächenzustand, die Änderung der Art des Spans aufgrund der auftretenden Kraftvariationen (diskontinuierliche, gehackte

Späne neigen eher zum Rattern als ununterbrochene Späne) während der Bearbeitung und Änderungen der Reibungsbedingungen an den Grenzflächen zwischen dem Werkzeug und den Spänen. Weiterhin spielen die Zerspanungsparameter, der aktuelle Zustand des Werkzeuges und die Kühlung bzw. Schmierung (Änderung der Reibparameter) eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Ratterschwingungen. Durch die unterschiedlichen Steifigkeiten bei verschiedenen Frequenzen wirken sich Änderungen der Schneidparameter auf das Rattern aus. Diese selbsterregten Schwingungen können durch Erhöhung der dynamischen Steifigkeit oder mehr Dämpfung des Systems unter Kontrolle gebracht werden. Die Ratterneigung von Werkstücken während der Bearbeitung ist proportional zu den Schnittkräften, Schnitttiefen und Schnittbreiten. Desweiteren neigen härtere Werkstoffe in der Regel mehr zum Rattern, da sich durch deren Härte und Festigkeit die Schnittkräfte erhöhen. Unter den Ratterschwingungen finden sich zwei Hauptarten: Das regenerative Rattern und das Rupfen.

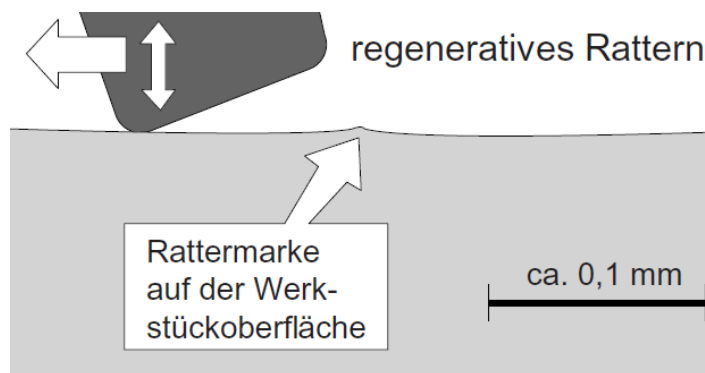


Abbildung 3-37 Regeneratives Rattern, Quelle: Rossmann 2012b, 18.5-4

Das *regenerative Rattern* (siehe Abbildung 3-37) bezeichnet eine Schwingbewegung senkrecht zur Oberfläche (Vorschubrichtung). Dabei baut sich die Schwingung bei der Zerspanung einer welligen, rauhen oder mit Störungen behaftete Oberfläche auf. Die sich daraus ergebenden Änderungen der Schnitttiefen resultieren Variationen der Schnittkraft und bringen damit das Werkzeug zum Schwingen. Dieser Vorgang setzt sich während der Bearbeitung ständig fort, weshalb diese Schwingungen als regenerative Schwingungen bezeichnet werden.

Im Gegensatz zum regenerativen Rattern verlaufen die Schwingungen beim Rupfen in Richtung der Schnittgeschwindigkeit.

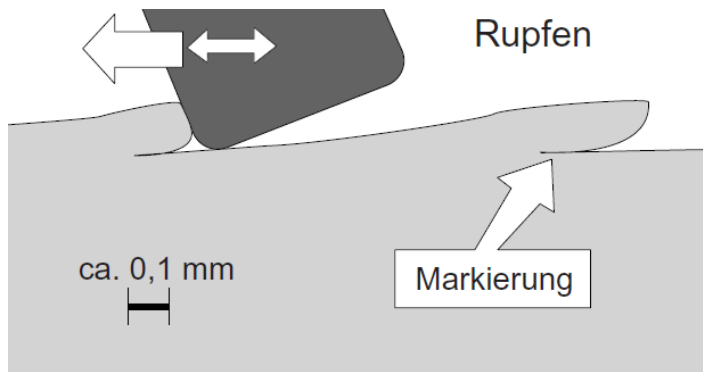


Abbildung 3-38 Rupfen, Quelle: Rossmann 2012b, S. 18.5-4

Abbildung 3-38 zeigt die großen Schädigungen, die durch das Rupfen am Werkstück entstehen. Dabei wird die Oberfläche aufgerissen und es entstehen Mikrorisse. Beim Rupfen bildet sich der sogenannte „Stick-Slip-Effekt“ aus, aufgrund der Tatsache, dass beim nach vorne schwingenden Werkzeug aufgrund von thermisch bedingten Reibverhältnissen geringere Schnittkräfte wirken als beim Zurückschwingen. Die Ursache dafür ist in diesem Fall die niedrigere effektive Schnittgeschwindigkeit. (Kalpakjian et al. 2011, S. 684–687; Rossmann 2012b, S. 18.5-5)

3.3.7 Fehler in der Schneidstoffauswahl

Zur Bearbeitung der verschiedenen Werkstoffe stehen zahlreiche Schneidstoffe zur Verfügung, welche sich in ihren spezifischen Eigenschaften unterscheiden. *Schnellarbeitsstähle (HSS)* sind hochlegierte Stähle mit den karbidbildenden Legierungselementen Chrom, Molybdän, Wolfram Vanadium und Kobalt. Schnellarbeitsstähle weisen eine höhere Warmhärte, deutlich bessere Verschleißfestigkeit und hohe Anlassbeständigkeit im Gegensatz zu herkömmlichen Werkzeugstählen auf. Verschiedene Verfahren wie Hartverchromen, Nitrieren oder Karbonitrieren schaffen noch weitere Verbesserungen der Eigenschaften, speziell in der Verschleißfestigkeit. Durch Oberflächenhartstoffschichten, wie z. B. Titanitrid, Titancarbonitrid, Titanaluminiumnitrid oder Titanaluminiumoxidnitrid sind Werkzeuge aus HSS in der Lage höhere Standzeiten zu ertragen bzw. bei gleichen Standzeiten höhere Schnittgeschwindigkeiten zu fahren. Schnellarbeitsstähle haben die größte Zähigkeit von allen Schneidstoffen (Abbildung 3-39). (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76–77; Dietrich 2016a, S. 45–47)

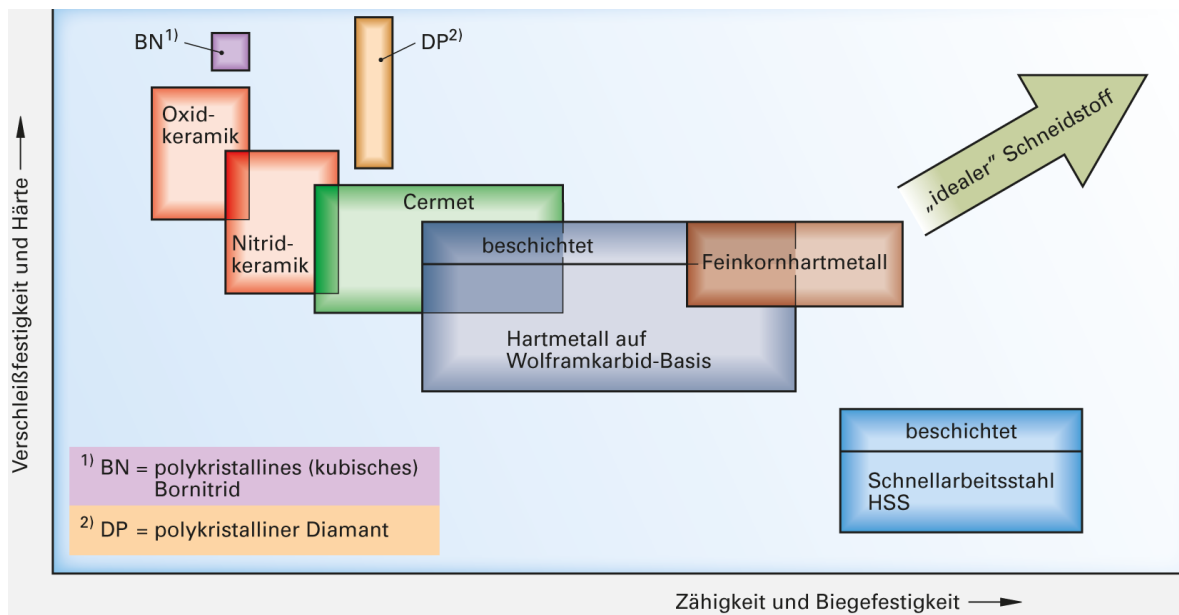


Abbildung 3-39 Schneidstoffe - Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, Quelle: Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76

Bei *Hartmetallen (HM)* handelt es sich um pulvermetallurgisch hergestellte Schneidstoffe mit ihren Hauptbestandteilen Wolframkarbid als Härte Träger und Kobalt als Bindermaterial. Um Stahl zu bearbeiten werden in kleineren Anteilen weitere Hartstoffe als Mischcarbide auf Basis von Titan, Tantal und Niob zugegeben. Durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen, Korngrößen und Beschichtungen lassen sich Hartmetalle zur Bearbeitung von nahezu allen Werkstoffen einsetzen. Je nach Zusammensetzung besitzen sie unterschiedliche Eigenschaftsprofile und können von leichten Schlichtbearbeitungen bis zu schweren Schruppoperationen eingesetzt werden. Durch Beschichtungen mit den oben genannten Stoffen können ebenfalls die Eigenschaften gezielt eingestellt werden. Eine Weiterentwicklung der Hartmetalle sind die *Cermets (Ceramic – Metal)*. Der Haupthärte Träger ist Titancarbonitrid anstelle des Wolframkarbids und der Binder ist ein Verbund aus Nickel und Kobalt. Dadurch besitzen Cermets eine höhere Warmverschleißfestigkeit, jedoch werden ihre Zähigkeitseigenschaften verringert. Ihr Einsatzgebiet sind Schlichtoperationen mit geringen Anforderungen an die Zähigkeit der Schneide. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76–77; Dietrich 2016a, S. 47–52)

Aus Abbildung 3-39 geht hervor dass Werkzeuge aus *Schneidkeramik* sehr hohe Härten, Warmhärten und Verschleißfestigkeiten aufweisen. Jedoch sind Schneidkeramiken sehr spröde und bruchempfindlich. Aufgrund ihrer Eigenschaften können aus ihnen gefertigte Werkzeuge extrem hohe Schnittgeschwindigkeiten ertragen. Dies ermöglicht den Einsatz bei der Zerspanung von Werkstücken mit hohen Oberflächengüten im Schlicht- und Feinschlichtbereich im ununterbrochenen Schnitt. Das Haupteinsatzgebiet sind Drehverfahren zur Bearbeitung von kurzspanenden Werkstoffen und Stählen mit höherer Festigkeit ($R_m > 600 \text{ N/mm}^2$).

Oxidkeramiken basieren auf Al_2O_3 mit Zusätzen an Zirkonoxid oder metallischen Hartstoffen wie Titancarbid und Titancarbonitrid. Nitridkeramiken gehören zu den nichtoxidischen Schneidstoffen auf Basis von Si_3N_4 . Charakteristisch hierfür sind die gute Bruchzähigkeit und hohe Thermoschockbeständigkeiten. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76–77; Dietrich 2016a, S. 52–53)

Polykristallines (kubisches) Bornitrid (PKB bzw. englisch CBN) ist nach Diamant der härteste Werkstoff und zeichnet sich durch seine hohe Härte und Verschleißfestigkeit bei gleichzeitig hoher Temperaturbeständigkeit aus. Es eignet sich hervorragend zum Spanen von gehärtetem Stahl. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76–77; Dietrich 2016a, S. 56–58)

Schneiddiamanten bestehen aus reinem Kohlenstoff sind die härtesten und dichtesten Werkstoffe. Aufgrund ihrer Affinität zum Eisen kommt es bei Bearbeitung von eisenhaltigen Werkstoffen zur Auflösung der Schneide in Form von chemischem Verschleiß. Deshalb werden Diamanten für die Bearbeitung von nichteisenhaltigen Werkstoffen eingesetzt. Unterschieden können monokristalline Diamanten mit ihren speziellen Haltern und polykristalline Diamanten. Polykristalline Diamanten sind nach dem natürlichen Diamanten die mit Abstand härtesten Schneidstoffe und den höchsten Verschleißbeständigkeiten. Sie werden als sehr viele kleine Diamanten im Schneidenbereich auf HM Grundkörper aufkristallisiert und verwendet. (Bartenschlager und Dillinger 2014, S. 76–77; Dietrich 2016a, S. 53–57)

Aus den vorangegangenen Ausführungen geht hervor, dass jeder Schneidstoff unterschiedliche Eigenschaften in der Bearbeitung von verschiedenen Werkstoffen aufweist. Kommt es zu einem Fehler in der Auswahl des Schneidstoffes, durch beispielsweise Montage eines Werkzeuges aus einem anderen Schneidstoff, oder Auswechslung von Schneidplatten aus verschiedenen Schneidstoffen, werden die gewünschten Eigenschaften in Bezug auf die Oberflächengüte, Schnittgeschwindigkeiten und Verschleißfestigkeiten nicht eingehalten. Somit ergibt sich eine weitere Fehlerquelle während der Bearbeitung.

4 Auswahl und Nachbildung der Fehler

4.1 Kategorisierung der Fehler

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen die große Anzahl an möglichen Fehlern, die in Werkstücken und Werkzeugen im Rahmen eines Zerspanprozesses auftreten können. Für die Kategorisierung der Fehler werden zwei Auswahlkriterien als Grundlage herangezogen. Zunächst zeigen sich ähnliche Auswirkungen und Ausprägungen der Fehler, wodurch einige Defekte zusammengefasst werden können. Daraufhin lassen sich Fehler aussortieren, welche in der Anwendung geringere Rollen einnehmen bzw. geringere Auswirkungen haben. Die verfahrenstypischen Fehler der Vorprozesse aus 3.1 lassen sich demnach in die sechs folgenden Überkategorien einteilen. Hohlräume, Risse, Einschlüsse, Oberflächenveränderungen, Festigkeitsänderungen und Fehler durch Verschleiß.



Abbildung 4-1 Untersuchte Fehlerarten, Quellen für Darstellungen: Hasse 2018a, 2018b, 2018c, 2017f

4.2 Nachbildung der Fehler

4.2.1 Vorstellung des Proberohlings

Abbildung 4-2 zeigt den eingesetzten geschmiedeten Proberohling. Seine Ausgangsdimensionen betragen ca. 94 mm im Außendurchmesser bei einer Höhe von ca. 16 mm. Er besteht aus dem Werkstoff 8CrMo16 + QT. Der Rohling wird von beiden Seiten in zwei nacheinander folgenden Aufspannungen zerspannt. In dieser Arbeit beschränkt sich die Untersuchung der Fehler auf die Bearbeitung der ersten Seite. Speziell werden hier die ersten drei Prozessschritte Runddrehen, Plandrehen1 (Schruppprozess) und Plandrehen2 (Schruppprozess) der Bearbeitung an der Drehmaschine untersucht (siehe Kapitel 5). Dabei wird im Außendrehvorgang radial ca. 1,7 mm bis zu einer Tiefe von 10,55 mm Material abgetragen. Der Planschruppprozess unterteilt sich wie

bereits erwähnt in zwei Schritte. Im ersten Prozess wird die OP10 Seite mit einer Zustellung von 1,3 mm plangeschruppt. Daraufhin erfolgt mit einer Zustellung von 1,5 mm der zweite Schruppprozess.

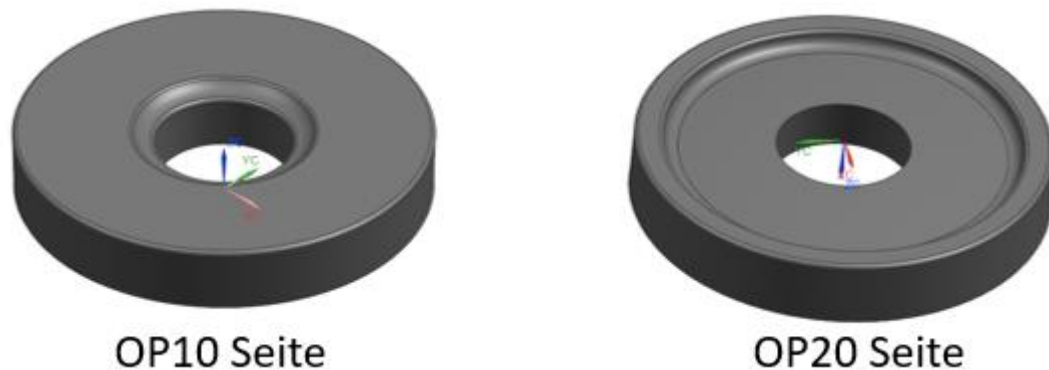


Abbildung 4-2 Geschmiedeter Proberohling

4.2.2 Hohlräume

Nach Bauerdick et al. 2018a wurden für die Nachbildung unterschiedlicher Hohlräume zunächst verschiedene Bohrungen in den Rohling eingebracht. Die erste Probe weist Bohrungen mit 1 mm Durchmesser und Tiefen von 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm auf, um zu gewährleisten, dass während des ersten und zweiten Plandrehens die Zustelltiefe sowohl größer als auch kleiner als die Tiefe der Fehlstellen ist. Um noch kleinere Hohlräume zu untersuchen, wurden in die zweite Probe Bohrungen mit 0,5 mm Durchmesser mit den gleichen Tiefen eingebracht (Abbildung 4-3 (b)).

Weiterhin wurden in einer weiteren Probe auf der Außenseite des Werkstücks Bohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm eingebracht. Die Position dieser Bohrungen wurde so gewählt, dass sie sich unterhalb der abzutragenden Fläche (Abbildung 4-3 (a)) aber sich im abzutragenden Bereich befinden. Dadurch konnten oberflächenferne Hohlräume simuliert werden.

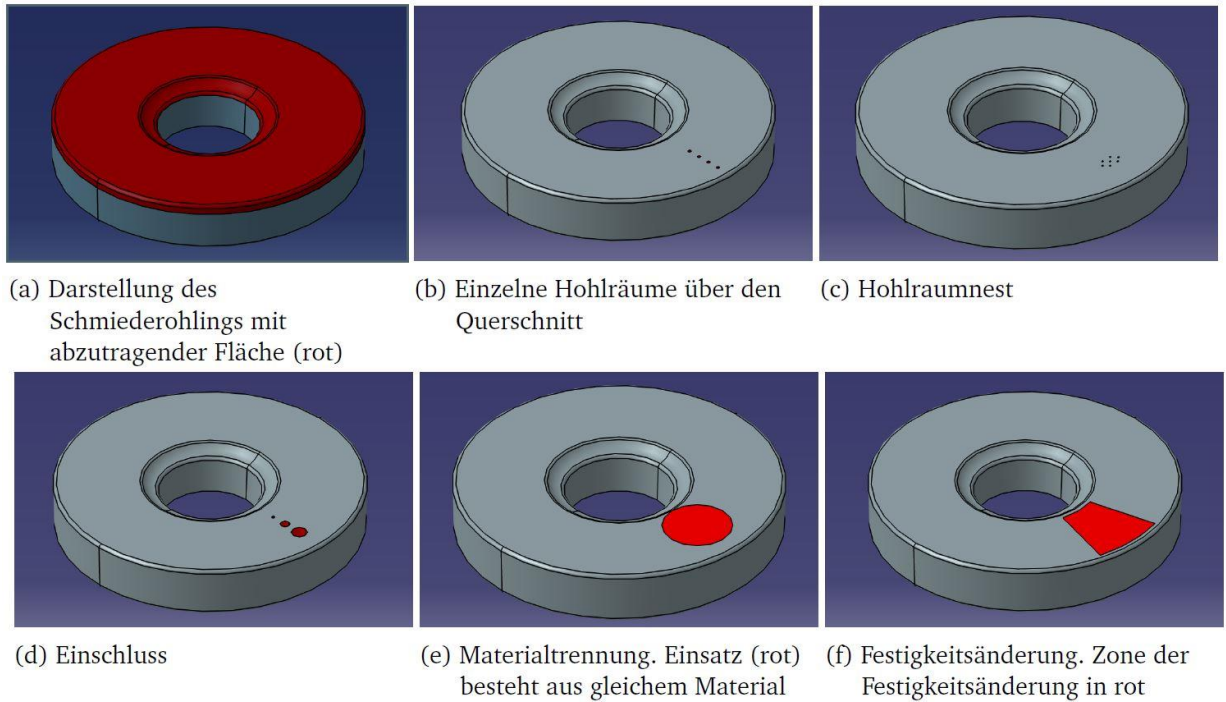


Abbildung 4-3 CAD-Modelle der Proben, Quelle: Bauerdick et al. 2018a

4.2.3 Risse

Risse können auf unterschiedliche Arten nachgebildet werden. Die erste untersuchte Probengeometrie ist durch einen geschnittenen Riss mit Hilfe einer Puksäge entstanden (siehe Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4 Rissprobe mit geschnittenem Riss

Um feinere Risse nachzubilden wurde in Bauerdick et al. 2018a eine weitere Probe definiert: Bei dieser Probe wurde ein Stift aus dem Ausgangsmaterial der Probe mit zwei unterschiedlichen Passungen in ein Probeteil eingepresst. Durch die Presspassung auf der einen Seite des Probeteils wird der Stift in einer Bohrung im Probeteil fixiert. Die Spielpassung auf der anderen Seite sorgt für einen minimalen Spalt zwischen Stift und Probeteil, der damit den Riss simuliert. Abbildung 4-3 (e) zeigt ein CAD-Modell der Probe.

4.2.4 Einschlüsse

In Bauerdick et al. 2018a wurde zur Nachbildung von Einschlüssen eine Probe nach Abbildung 4-3 (d) gefertigt. Dazu wurden Stifte der Durchmesser 1 mm, 3 mm und 5 mm aus zwei unterschiedlichen Werkstoffen (je in ein Probeteil) eingepresst. Die zylinderförmigen Stifte bestehen dabei aus ungehärtetem Stahl nach DIN 2338 und härterem Stahl nach DIN 8734. Dadurch können sowohl weichere als auch härtere Einschlüsse simuliert werden. Die Härtebereiche der Materialien können DIN 2338 und DIN 8734 entnommen werden.

Um weiterhin Einschlüsse im Material nachzubilden wurden von der Rückseite des Probeteils Bohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm bis ca. 2 mm und 1 mm unter die abzutragende Oberfläche eingebracht und mit einem Silberhartlot mit der Bezeichnung L-AG44 von Felder Löttechnik und einem Weichlot aus Sn60PbCu2 ausgefüllt (je ein Probeteil).

4.2.5 Oberflächenveränderungen

Als eine mögliche Fehlerart durch Oberflächenveränderung kann Korrosion angesehen werden. Im Rahmen der Zerspanung ist jedoch nur tiefe Korrosion bis in den Bearbeitungsbereich von Bedeutung. Dennoch wurden korrodierte Probestücke mit geringeren Korrosionsschichtstärken untersucht, um die Sensitivität des Verfahrens für Oberflächenveränderungen zu testen.

Für eine Nachbildung von Pinholes in der Oberfläche von Werkstücken wurden, mit Hilfe eines Körners, kleine Einschlüsse in die Oberfläche des Probeteils eingebracht. Die Tiefe dieser Einschlüsse liegt dabei deutlich unter der Schnitttiefe der Zerspanung.

Weiterhin enthielt die gelieferte Charge an Rohteilen mehrere Bauteile mit Dellen (siehe 3.1.3), die durch den Schmiedeprozess entstanden sind. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hier um einen real entstandenen Fehler handelt, wurden Werkstücke mit diesem Fehler ebenfalls untersucht. Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch die Ausprägung des Schmiedefehlers.



Abbildung 4-5 Schmiedeteil mit einer Delle

4.2.6 Festigkeitsänderungen

Um Festigkeitsänderungen in den Probestücken nachzubilden wurde in Bauerdick et al. 2018a mit Hilfe eines Brenners gezielt in einem Bereich der Probeteile (siehe Abbildung 4-3 (f)) eine Wärmebehandlung durchgeführt. Dazu wurden zwei Ansätze erfolgt: Zum einen erfolgt eine Erhitzung auf 800 °C mit anschließender kontrollierter Abkühlung auf 600 °C. Die restliche Abkühlung geschieht an Luft. Der zweite Verlauf entspricht dem eines Härteprozesses. Dabei erfolgt die Erhitzung auf 950 °C mit abschließender Abschreckung der Probe in Wasser. Diese Temperaturangaben beziehen sich auf das Werkstoffdatenblatt von 8CrMo16 (Deutsche Edelstahlwerke GmbH 2017).

Weiterhin wurden im Rahmen dieser Arbeit Probeteile in einem Gasnitrierprozess von 5h Haltezeit oberflächengehärtet. Die Prozessparameter können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 4-1 Verlauf Nitrierprozess

Bezeichnung des Verfahrens	Sollwert Temperatur in °C	Haltezeit in Minuten	Laufzeit in Minuten
Start	20	1	1
Heizen	400	1	32
Voroxidieren	400	30	30
Spülen	400	30	30
Festmenge	520	1	8
Festmenge	520	30	30
Festmenge	550	1	3
Festmenge	550	360	360
Festmenge	400	1	9
Kuehlen RT Spuelen	270	1	12
Kuehlen RT Spuelen	55	1	64
Ende	55	1	

4.2.7 Fehler durch Verschleiß

Bei den Fehlern durch Verschleiß kommen zwei Strategien zum Einsatz. Zum einen werden die Rohlinge mit einer bereits verschlissenen Schneide bearbeitet und mit Rohlingen, die durch scharfe bzw. neue Schneiden bearbeitet wurden, verglichen. Zum anderen kann realer Verschleiß

durch die Bearbeitung zahlreicher Werkstücke herbeigeführt werden. Dadurch lassen sich Verläufe des Verschleißes erkennen und evtl. Grenzen festlegen, ab denen die Schneide gewechselt werden muss. Beide Konzepte werden im Rahmen dieser Untersuchung verfolgt. Es ist zu erwähnen, dass hier kein Verschleißmodell für den Prozess entwickelt wird, da der Fokus dieser Arbeit auf der Detektion von Fehlern liegt. Deshalb beschränken sich die Untersuchungen auf mögliche Folgen des Verschleißes in den Maschinenparametern.

5 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden alle am Drehbearbeitungszentrum EMAG VLC 100Y in der ETA-Fabrik in der ersten Aufspannung zerspannt (OP10: Zerspannung der ersten Seite). Zusätzlich zu den eigenen Versuchsreihen wurden die Daten von Bauerdick et al. 2018a untersucht.

Bei den Versuchen wurden 20 vorausgewählte Sercos-Parameter, also Antriebsparameter der Achsen X, Y, Z und Spindel (Sc), mit 250 Hz mit Hilfe der Efficiency Workbench (EWB) aufgezeichnet und als csv-Dateien abgespeichert. Darüber hinaus wird der Maschinencode (NC/G-Code) mit Bearbeitungszeiten in einer xls-Datei abgespeichert. Die Funktion der EWB kann Bauerdick et al. 2017 entnommen werden.

6 Auswertung

Fehlerdetektion

Die Bohrungen in den Werkstücken können bis zu einem Durchmesser von 1 mm mithilfe der Maschinendaten detektiert werden. Dabei schlagen vor allem die Parameter der X- und der Z-Achse an. Dies gilt für die Betrachtung der Messdaten sowohl in der Zeitreihe wie auch in der Ableitung. Die Hochpassfilterung verdeutlicht die Sichtbarkeit der Auswirkungen noch einmal. Abbildung 6-1 zeigt die Ausreißer beim Überfahren der Bohrungen (rote Linien stellen die Mittelpunkte der Bohrungen dar) mit der Schneide im ersten Plandrehprozess. Bohrungen mit 0,5 mm Durchmesser lassen sich mit den hier verwendeten Methoden nicht detektieren.

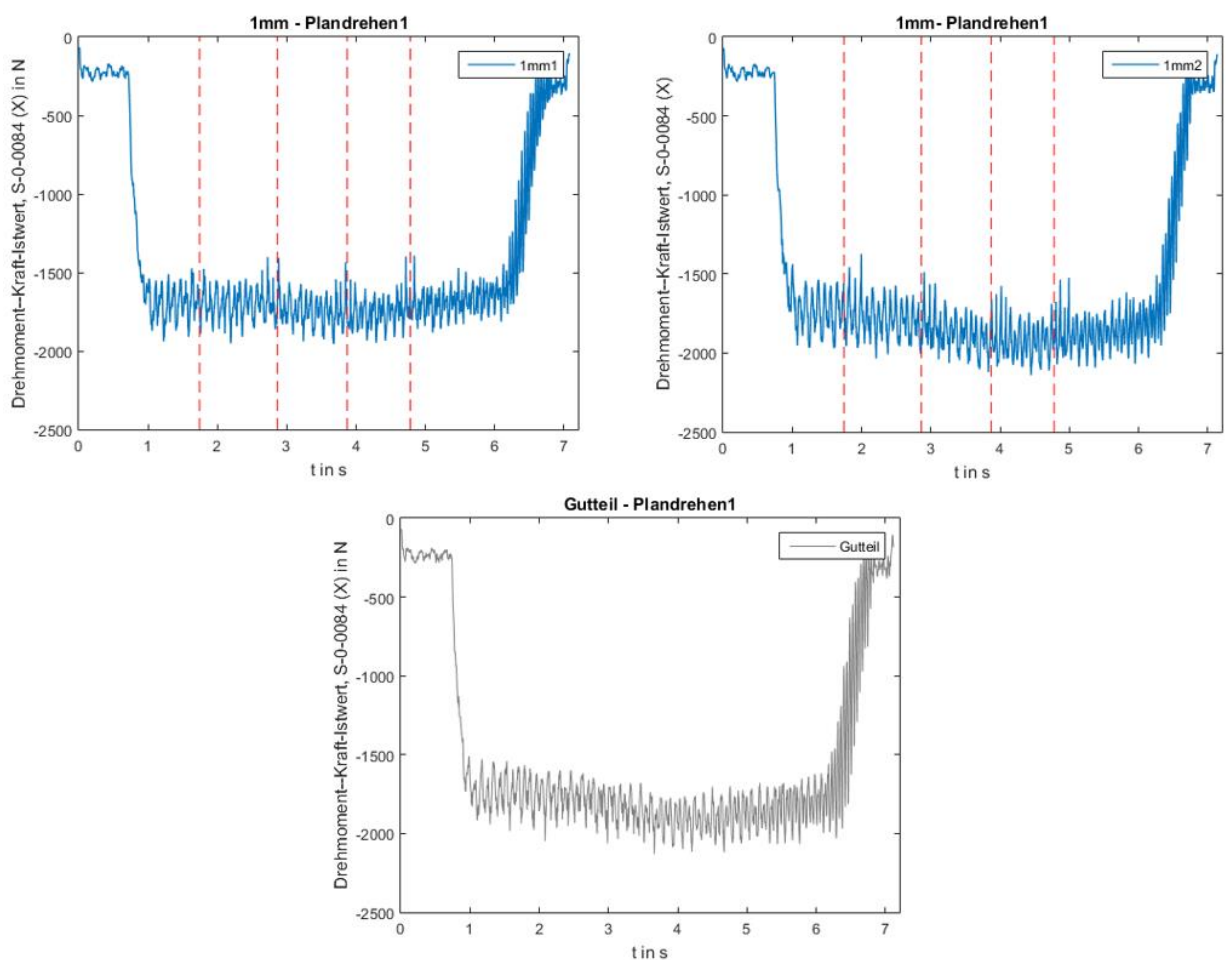


Abbildung 6-1 Hohlraumprobe 1 mm: Vergleich Proben mit und ohne Bohrung

Die Hohlräume unter der Oberfläche lassen sich ebenfalls aus den Maschinendaten lesen. Aufgrund der größeren Abmaße und der geometrisch verbundenen Periodizität der Fehlstelle schlagen deutlich mehr Parameter aus. In 18 von 20 Parametern können die Bohrungen parallel zur Oberfläche detektiert werden.

Die eingepressten Stifte lassen sich sowohl in den Kraftparametern und Stromparametern der X und Z-Achse als auch im Lagegeber der Z-Achse erkennen. Dabei zeigen die unterschiedlich harten Stifte ähnliche Ausprägungen in den Messdaten. Generell dominieren bei der Betrachtung der Messdaten zu diesem Fehler die Parameter der Z-Achse. Weiterhin resultieren ebenfalls Möglichkeiten die von der Unterseite eingegossenen Lote zu detektieren, jedoch sind die Auswirkungen weniger ausgeprägt, da das zerspannte Volumen der Fehlstelle aufgrund der gewählten Geometrie kleiner ist. Im Gegensatz dazu induzieren die angelassenen und gehärteten Bereiche in den Proben sehr deutliche Unterschiede zu nicht behandelten Rohlingen. In 18 von 20 Parametern konnten diese bei der Bearbeitung der angelassenen Proben nachgewiesen werden. Im Fall der gehärteten Bereiche haben alle 20 untersuchten Parameter angeschlagen.

Die Werkstücke, welche mit verschlissener Schneide zerspannt wurden, sind vor allem in den betragsmäßig größeren Phasenströmen während der Bearbeitung zu erkennen (siehe Abbildung 6-2). Weiterhin konnte mithilfe weiterer Auswerteverfahren (Varianzberechnung, Maximalwertbestimmung) gezeigt werden, dass die Messdaten deutlich größeren Schwankungen unterliegen, wenn eine verschlissene Schneide zum Einsatz kommt.

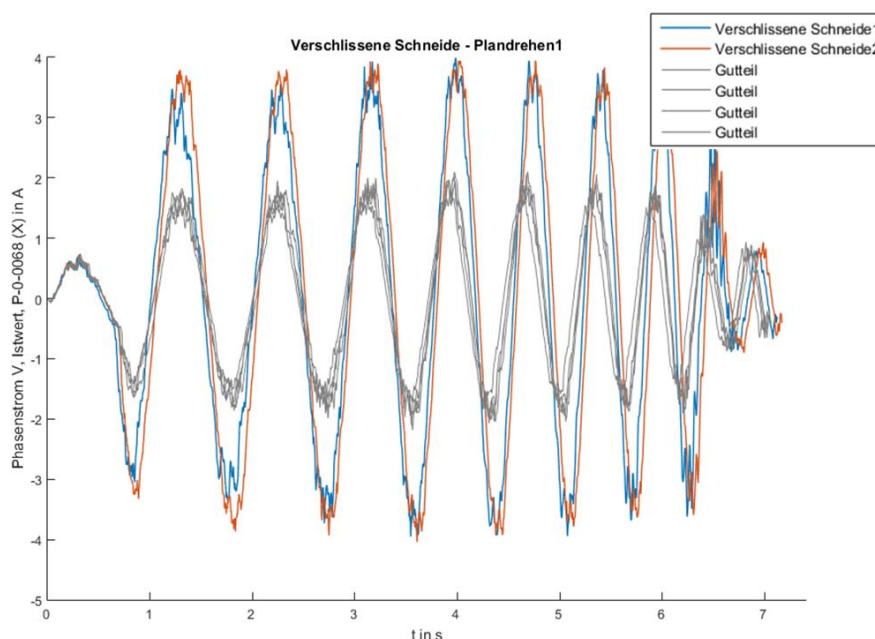


Abbildung 6-2 Bearbeitung der Proben mit verschlissener Schneide

Fehlercharakterisierung (Ausblick)

Neben der reinen Fehlererkennung wurde im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit untersucht Fehler anhand der Daten zu charakterisieren und somit zu identifizieren. Dazu wurde neben der visuellen Untersuchung der Zeitreihen auf charakteristische Verläufe das in Tabelle 2 dargestellte Verfahren angewandt.

Tabelle 2: Charakterisierung der Fehlerarten

	Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Fehler 4
Drehmoment SC			•	•
Kraft X	•		•	
Kraft Y	•		•	•
Kraft Z	•	•	•	•
Lage X	•			
Lage Y		•	•	
Lage Z	•	•	•	•
...				

Bei der Auswertung der Fehlerdaten konnte festgestellt werden, dass sich die unterschiedlichen Fehler anders auf die verschiedenen Daten der Parameter auswirken. Die Kombination der fehleranzeigenden Parameter könnte eine Art Fingerabdruck des Fehlers ergeben (siehe Tabelle 2). Diese Vermutung konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden.

7 Fazit und Ausblick

Ergebnisse dieser Arbeit

Die Anzahl an möglichen Fehlern an Zerspanungsteilen sind vielfältig. Vorprozesse aber auch die Zerspanung selbst beeinflussen die Qualität des Produkts. Um die für diese Arbeit benötigte Fehlernachbildung zu ermöglichen wurden die recherchierten Fehler in sechs Klassen nach ihren geometrischen und physischen Eigenschaften eingeteilt: Hohlräume, Risse, Einschlüsse, Festigkeitsänderungen und Fehler durch Verschleiß. Für jede dieser Klassen wurden exemplarische Fehler am Rohteil nachgebildet und diese anschließend zerspannt. Die dabei aufgezeichneten Daten für die Bearbeitungsschritte Außendreihen und Schruppen 1 und 2 wurden dann auf Auffälligkeiten im Vergleich zu den Daten der Zerspanung von fehlerfreien Rohteilen untersucht.

Es können folgende Ergebnisse der Machbarkeitsuntersuchung festgehalten werden:

- Fehler aus allen definierten Fehlerklassen lassen sich detektieren.
- Je kleiner ein Fehler desto schwieriger ist die Detektion. Eine Erhöhung der Abtastfrequenz könnte hier einen positiven Einfluss haben.
- Die geometrische Dimension eines Fehlers lässt sich durch die Daten abschätzen.
- Die Art des Fehlers kann nicht aus den Daten mit den hier durchgeführten Methoden ermittelt werden. Jedoch könnte dies auf Basis größerer Datenmengen möglich werden.
- Sercos-Parameter aller Hauptbearbeitungsachsen (X, Y, Z und Sc) eignen sich zur Detektion von Fehlern.
- Einige Sercos-Parameter eignen sich besser als andere zur Detektion von Fehlern.

Ausblick

Um ein Echtzeit Quality Monitoring System wie in der Einleitung angesprochen zu implementieren und die großen Datenmengen zu beherrschen, bedarf es einer automatisierten Auswertung. Dadurch kann die Maschine in der Produktion die hier in dieser Arbeit ausgeführte manuelle Auswertung während der Bearbeitung im Prozess durchführen und Rückschlüsse auf Fehler bzw. Probleme ziehen. Dabei können die Ergebnisse aus dieser Ausarbeitung helfen, die Charakteristiken und Einflüsse von Fehlern auf die Messdaten zu verstehen.

8 Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Metternich, Joachim (2018): ETA Fabrik. Hg. v. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Darmstadt. Online verfügbar unter <http://www.eta-fabrik.de/>, zuletzt geprüft am 04.04.2018.
- Abrão, Alexandre M.; Aspinwall, David K. (1996): The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. In: *Wear* 196 (1-2), S. 279–284. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06927-X.
- Anderl, Reiner; Metternich, Joachim (16.04.2015): Vernetzte Produktentstehungsprozesse. Vorlesung1. Technische Universität Darmstadt.
- Astakhov, Viktor P. (2010): Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: J. Paulo Davim (Hg.): *Surface Integrity in Machining*. London: Springer London, S. 1–35.
- Astakhov, Viktor P.; Shvets, S. (2004): The assessment of plastic deformation in metal cutting. In: *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2), S. 193–202. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.015.
- Baier, Jörg; Köppen, Martin; Grefhorst, Cor; Kleinmann, Walter; Podobed, Oleg (2005): *Handbuch der Gußfehler. Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung*. 3. Auflage. Marl: S&B industrial Minerals GmbH.
- Bartarya, Gaurav; Choudhury, S. K. (2016): Effect of tool wear on white layer thickness and subsurface hardness on hard turned EN31 steel. In: *IJMMM* 18 (5/6), S. 483. DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078993.
- Bartenschlager, Jörg; Dillinger, Josef (2014): *Metalltechnik Grundbildung*. 7. Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel (Europa-Fachbuchreihe für metalltechnische Berufe).
- Bauerdick, Christoph; Fischer, Benjamin; Hahn, Moritz; Knöller, Philipp; Schönherr, Josef (2018a): *Charakterisierung und Modellierung von Bauteilfehlern - Qualitätsüberwachung*. Veröffentlichung. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Online verfügbar unter https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7719/1/180824_Charakterisierung_Bu.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- Bauerdick, Christoph J.H.; Helfert, Mark; Menz, Benjamin; Abele, Eberhard (2017): *A Common Software Framework for Energy Data Based Monitoring and Controlling for Machine Power*

Peak Reduction and Workpiece Quality Improvements. In: *Procedia CIRP* 61, S. 359–364. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.226.

Bauerdick, Christoph J.H.; Helfert, Mark; Petruschke, Lars; Sossenheimer, Johannes; Abele, Eberhard (2018b): An automated procedure for workpiece quality monitoring based on machine drive-based signals in machine tools. In: *Procedia CIRP* 72, S. 357–362. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.245.

Beiss, Paul (2013): Pulvermetallurgische Fertigungstechnik. 2. Aufl. s.l.: Springer-Verlag.

Bergner, Oliver; Fehrmann, Michael; Hillebrand, Thomas; Ignatowitz, Eckhard; Kluge, Manfred; Kinz, Ullrich et al. (2017): Metalltechnik. Metallbau- und Fertigungstechnik : Grundbildung. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.

Böge, Alfred (Hg.) (2015): Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 424 Tabellen. 22., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Siemens).

Brinksmeier, E.; Cammett, J. T.; König, W.; Leskovar, P.; Peters, J.; Tönshoff, H. K. (1982): Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes. In: *CIRP Annals* 31 (2), S. 491–510. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60172-3.

Brinksmeier, Ekkard *1952 (1991): Prozeß- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung Ekkard Brinksmeier. Düsseldorf: VDI-Verl.

Bushlya, V.; Zhou, J. M.; Lenrick, F.; Avdovic, P.; Ståhl, J-E. (2011): Characterization of White Layer Generated when Turning Aged Inconel 718. In: *Procedia Engineering* 19, S. 60–66. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.080.

Campbell, John (2011): Complete casting handbook. Metal casting processes, metallurgy, techniques and design. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10533748>.

Chen, L.; El-Wardany, T. I.; Harris, W. C. (2004): Modelling the Effects of Flank Wear and Chip Formation on Residual Stresses. In: *CIRP Annals* 53 (1), S. 95–98. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60653-2.

Chern, Gwo-Lianq (2006): Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (12-13), S. 1517–1525. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006.

-
- Colangelo, Vito J.; Thornton, Peter A. (1986): Failures of Forgings. In: Gordon W. Powell (Hg.): Metals Handbook. Failure Analysis and Prevention. 9. Aufl. Metals Park, Ohio: American Soc. for Metals, S. 314–342.
- Davis, Joseph R. (1989): Metals handbook. Nondestructive evaluation and quality control. 9. Aufl. Metals Park, Ohio: American Soc. for Metals (17).
- Deutsche Edelstahlwerke GmbH (2017): Werkstoffdatenblatt 8CrMo16. Nitrodur 8524.
- Dietrich, Jochen (2016a): Praxis der Zerspantechnik. Verfahren, Werkzeuge, Berechnung. 12., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Dietrich, Jochen (2016b): Praxis der Zerspantechnik [Elektronische Ressource]. Verfahren, Werkzeuge, Berechnung. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg.
- Dilthey, Ulrich (2005): Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2. Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 3., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- DIN 2338, Februar 1998: Zylinderstifte aus ungehärtetem Stahl und austenitischem nichtrostendem Stahl.
- DIN 8589-0, September 2003: Fertigungsverfahren Spanen.
- DIN 8589-1, September 2003: Teil 1: Drehen Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8589-3, September 2003: Teil 3: Fräsen Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8734, März 1998: Zylinderstifte aus gehärtetem Stahl und martensitischem nichtrostendem Stahl.
- DIN EN ISO 8785, Oktober 1999: Oberflächenunvollkommenheiten - Begriffe, Definitionen und Kenngrößen, zuletzt geprüft am 11.2016.
- DIN ISO 13715, Dezember 2000: Technische Zeichnungen - Werkstückkanten mit unbestimmter Form - Begriffe und Zeichnungsangaben, zuletzt geprüft am 11.2016.
- Dornfeld, David; Min, Sangkee (2010): A Review of Burr Formation in Machining. In: Jan C. Aurich und David Dornfeld (Hg.): Burrs - Analysis, Control and Removal. Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer, 3-11.
- Field, M.; Kahles, J. I.; Canmett, J. (1972): A Review of Measuring Methods for Surface Integrity. In: *Ann CIRP* 21 (2), S. 219–238.

-
- Field, Michael (1973): Surface integrity - a new requirement for improving reliability of aerospace hardware. Proceedings of 18th Annual National SAMPE Symposium, 1973.
- Field, Michael; Kahles, John F. (1971): REVIEW OF SURFACE INTEGRITY OF MACHINED COMPONENTS. In: *Ann CIRP* 20 (2), S. 153–163. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0015206279&origin=inward&txGid=548b2015ca4097eb5019ff6d99958340>.
- Fritz, Alfred Herbert; Schulze, Günter (Hg.) (2008): *Fertigungstechnik*. 8., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Fritz, Alfred Herbert; Schulze, Günter (2015): *Fertigungstechnik* [Elektronische Ressource] von Alfred Herbert Fritz ; herausgegeben von Günter Schulze. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg.
- Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Thurn, Laura (2016): *3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Gillespie, L. K.; Blotter, P. T. (1976): The Formation and Properties of Machining Burrs. In: *J. Eng. for Industry* 98 (1). DOI: 10.1115/1.3438875.
- Griffiths, B. J. (1987): Mechanisms of White Layer Generation With Reference to Machining and Deformation Processes. In: *J. Tribol.* 109 (3), S. 525. DOI: 10.1115/1.3261495.
- Griffiths, Brian (2001): *Manufacturing surface technology. Surface integrity & functional performance*. London: Penton.
- Grosch, Johann (2014): *Schadenskunde im Maschinenbau. Charakteristische Schadensursachen, Analyse und Aussagen von Schadensfällen ; mit 14 Tabellen*. 6., neu bearb. Aufl. Renningen: expert-Verl. (Kontakt & Studium, 308).
- Grum, Janez (2010): Residual Stresses and Microstructural Modifications. In: J. Paulo Davim (Hg.): *Surface Integrity in Machining*. London: Springer London, S. 67–126.
- Grzesik, Wit (2008): *Advanced machining processes of metallic materials. Theory, modelling and applications*. Oxford, Boston: Elsevier. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=218768>.
- Grzesik, Wit; Kruszynski, Bogdan; Ruszaj, Adam (2010): Surface Integrity of Machined Surfaces. In: J. Paulo Davim (Hg.): *Surface Integrity in Machining*. London: Springer London, S. 143–179.

Han, Sangil; Melkote, Shreyes N.; Haluska, Michael S.; Watkins, Thomas R. (2008): White layer formation due to phase transformation in orthogonal machining of AISI 1045 annealed steel. In: *Materials Science and Engineering: A* 488 (1-2), S. 195–204. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.081.

Hasse, Stephan (2003): Guß- und Gefügefehler. Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Schiele & Schön.

Hasse, Stephan (2017a): Gießerei-Lexikon. Blockseigerung. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/blockseigerung-74/>, zuletzt geprüft am 09.10.2017.

Hasse, Stephan (2017b): Gießerei-Lexikon. Mikroseigerung. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/mikroseigerung-340/?cHash=8c3511114fe6444473a90857e21d80db>, zuletzt geprüft am 22.10.2018.

Hasse, Stephan (2017c): Gießerei-Lexikon. Penetration. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/penetration-325/>, zuletzt geprüft am 10.10.2017.

Hasse, Stephan (2017d): Gießerei-Lexikon. Schwereigerung. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/schwerseigerung-444/>, zuletzt geprüft am 09.10.2017.

Hasse, Stephan (2017e): Gießerei-Lexikon. Seigerung. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/seigerung-721/>, zuletzt geprüft am 09.10.2017.

Hasse, Stephan (2017f): Gießerei-Lexikon. Warmriss. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E). Online verfügbar unter <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/warmriss-536/>, zuletzt geprüft am 05.03.2018.

Hasse, Stephan (2018a): Gießerei-Lexikon. Gasporosität. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E), zuletzt geprüft am 24.10.2018.

-
- Hasse, Stephan (2018b): Gießerei-Lexikon. Pinholes. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E), zuletzt geprüft am 24.10.2018.
- Hasse, Stephan (2018c): Gießerei-Lexikon. Warmriss. Hg. v. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E), zuletzt geprüft am 24.10.2018.
- Heisel, Uwe (2014): Handbuch Spanen. 2., vollst. neu bearb. Aufl. München: Hanser (Ed. Handbuch der Fertigungstechnik).
- Hosseini, S. B.; Klement, U.; Yao, Y.; Rytberg, K. (2015): Formation mechanisms of white layers induced by hard turning of AISI 52100 steel. In: *Acta Materialia* 89, S. 258–267. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.075.
- Jin, T. Y.; Liu, Z. Y.; Cheng, Y. F. (2010): Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (15), S. 8014–8021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.089.
- Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R.; Werner, Ewald A. (2011): Werkstofftechnik. [1. dt.-spr. Ausg.]; 5., aktualisierte Aufl. [der amerikanischen Ausg.]. München: Pearson Studium (ing - Maschinenbau).
- Klocke, Fritz (2015): Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Klocke, Fritz; König, Wilfried (2008): Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Koster, W. P.; Fritz, L. J. (1970): Surface Integrity in Conventional Machining. In: Volume 1B: General. ASME 1970 International Gas Turbine Conference and Products Show. Brussels, Belgium, Sunday 24 May 1970: ASME, V01BT02A033.
- Liu, Meng; Takagi, Jun-ichiro; Tsukuda, Akira (2004): Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel. In: *Journal of Materials Processing Technology* 150 (3), S. 234–241. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.038.
- Liu, Shaojun; Huang, Qunying; Li, Chunjing; Huang, Bo (2009): Influence of non-metal inclusions on mechanical properties of CLAM steel. In: *Fusion Engineering and Design* 84 (7-11), S. 1214–1218. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.037.
- Lyon, K. N.; Marrow, T. J.; Lyon, S. B. (2015): Influence of milling on the development of stress corrosion cracks in austenitic stainless steel. In: *Journal of Materials Processing Technology* 218, S. 32–37. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.038.

-
- M'Saoubi, R.; Outeiro, J. C.; Changeux, B.; Lebrun, J. L.; Morão Dias, A. (1999): Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. In: *Journal of Materials Processing Technology* 96 (1-3), S. 225–233. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00359-3.
- Machinability Data Center; Metcut Research Associates Inc (1980): *Machining Data Handbook*. 3. ed., 5. print. Cincinnati, Ohio.
- Madariaga, A.; Kortabarria, A.; Hormaetxe, E.; Garay, A.; Arrazola, P. J. (2016): Influence of Tool Wear on Residual Stresses When Turning Inconel 718. In: *Procedia CIRP* 45, S. 267–270. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.359.
- Martinkovič, Maroš; Pokorný, Peter; Bodišová, Petra (2014): Influence of Drill Wear to Local Plastic Deformation in the Wall of Drilling Hole. In: *KEM* 606, S. 77–80. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.606.77.
- VDMA-Einheitsblatt 24470-2, September 2002: Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk Fähigkeitsnachweis bei Spritzgießmaschinen. Online verfügbar unter http://www.vdma.org/documents/105628/2244593/Inhalt+VDMA+24470-2_de.pdf/d6dfd51d-40fe-4800-89e9-1be2a4522b57, zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- Neslušán, M.; Mrkvica, I.; Čep, R.; Čilliková, M. (2003): Influence of cutting speed on intensity of the plastic deformation during hard cutting. In: *Materials and technology* 47 (6), S. 745–755.
- Niknam, Seyed Ali; Songmene, Victor (2014): Milling burr formation, modeling and control. A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 229 (6), S. 893–909. DOI: 10.1177/0954405414534827.
- Petropoulos, Georgios P.; Pandazaras, Constantinos N.; Davim, J. Paulo (2010): Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. In: J. Paulo Davim (Hg.): *Surface Integrity in Machining*. London: Springer London, S. 37–66.
- Reuter, H.; Schneider, Ph (1971): *Gussfehler-Atlas*. 2. Aufl. Düsseldorf: Giesserei-Verlag GmbH.
- Rossmann, Axel (Hg.) (2012a): Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen. Fertigung: Typische verfahrensspezifische Fehler, Probleme, Mechanismen, Ursachen. Verpackung und Lagerung. Reparatur: Grenzen, Entwicklung, Zulassung, Eignungsnachweis/Erprobung, Verfahren. 4 Bände. Karlsfeld: Turbo Consult (3A).
- Rossmann, Axel (Hg.) (2012b): Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen. Qualitätssicherung: Strategien und Vorgehen, "Surface Integrity". Prüfverfahren: Probleme und Grenzen, Kennzeichnen von Bauteilen, Nacharbeit. Fertigungsbedingte Effekte; Grate, Rauigkeit, Verunreinigungen, Eigenspannungen, Überhitzung, Beschädigung, Verzug... 4 Bände. Karlsfeld: Turbo Consult (4B).

Sadat, A. B.; Reddy, M. Y. (1992): Surface integrity of inconel-718 nickel-base superalloy using controlled and natural contact length tools. part I. Lubricated. In: *Experimental Mechanics* 32 (3), S. 282–288. DOI: 10.1007/BF02319367.

Sadat, A. B.; Reddy, M. Y. (1993): Surface integrity of inconel-718 nickel-base superalloy using controlled and natural contact length tools. Part II. Unlubricated. In: *Experimental Mechanics* 33 (4), S. 343–348. DOI: 10.1007/BF02322151.

sandvik.coromant.com (2017): Verschleiß an den Schneidkanten. Hg. v. Sandvik Coromant. Online verfügbar unter https://www.sandvik.coromant.com/de-de/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx, zuletzt geprüft am 14.04.2018.

Schäfer, Günter; Ring, Christopher (2005): Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal Nr. 30. Hg. v. Peter Dietz. Insitut für Maschinenwesen TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld. Online verfügbar unter https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Forschung/InstMitt/2005/Instmit_komplett_2005_ohne_presse.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2018.

Schiebold, Karlheinz (2015): Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Magnetpulverprüfung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Schmitt, Robert; Pfeifer, Tilo (2015): Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446440821>.

Seidel, Wolfgang W.; Hahn, Frank (2010): Werkstofftechnik : Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung. 8., neu bearb. Aufl. München. Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3374639&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Sharma, P. C. (2009): A Textbook of production technology. Manufacturing processes. 7. ed [revised reprint with correction]. INDIA: Chand (S.) & Co Ltd, India.

Sharman, A.R.C.; Hughes, J. I.; Ridgway, K. (2006): An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718™ when turning. In: *Journal of Materials Processing Technology* 173 (3), S. 359–367. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.12.007.

Tang, Z. T.; Liu, Z. Q.; Pan, Y. Z.; Wan, Y.; Ai, X. (2009): The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (9), S. 4502–4508. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.034.

-
- Töppel, Thomas; Müller, Bernhard; Hoeren, Karlheinz P. J.; Witt, Gerd (2016): Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen. In: *Schweißen und Schneiden* 68 (4), S. 176–186, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Tschätsch, Heinz (2005): Praxis der Umformtechnik. Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Vieweg Praxiswissen).
- Verlag Stahleisen (2015): Fehlerkatalog Grobblech. Catalogue of heavy plates defects / Catalogue of Heavy Plate Defects. 1. Auflage. Düsseldorf: Stahleisen. Online verfügbar unter <http://api.vlb.de/api/v1/asset/mmo/file/43aa5f19-878a-45e0-81ed-04b4e2af56e7>.
- Wang, Tingli; Yao, Shan; Tong, Qiang; Sui, Longfei (2017): Improved filling condition to reduce casting inclusions using the submerged gate method. In: *Journal of Manufacturing Processes* 27, S. 108–113. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.01.013.
- Wolfstieg, U.; Macherauch, E. (1973): Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen. In: *Chemie Ing. Techn.* 45 (11), S. 760–770. DOI: 10.1002/cite.330451103.
- Zenzinger, Günter; Bamberg, Joachim; Hess, Thomas; Ladewig, Alexander (2014): Online Prozesskontrolle bei der additiven Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen. In: *ZfP-Zeitung* (140), S. 45–48, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Zhang, Xiao-Ming; Chen, Li; Ding, Han (2016): Effects of Process Parameters on White Layer Formation and Morphology in Hard Turning of AISI52100 Steel. In: *J. Manuf. Sci. Eng.* 138 (7), S. 74502. DOI: 10.1115/1.4032769.