

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
der Technischen Universität München

Methodik für gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden

Peter Sachnik

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

Die Dissertation wurde am 19.05.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.01.2017 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, gilt mein Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Bearbeitung. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls, für die herzliche Aufnahme in die utg-Gemeinschaft und die freundliche Einführung am Lehrstuhl bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, Ordinarius des Institutes für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Mein Dank gilt in gleichem Maße Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, Ordinarius des Lehrstuhls für Maschinenelemente (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau) der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Diese Dissertation basiert auf den Ergebnissen des öffentlich geförderten Forschungsprojektes „Gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden“. Der europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. (EFB) sei für die finanzielle Unterstützung herzlich gedankt. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Cord-Hinrich Bremer, Herrn Dirk Hansper und Herrn Václav Šípek bzw. der Firma Stueken GmbH & Co. KG für die Unterstützung und Fertigung des Versuchswerkzeuges. Sie standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite und haben einen großen Anteil an dem Gelingen der experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen meiner Forschungsarbeit durchgeführt wurden.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls und Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für die fruchtbaren Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester für die immerwährende Unterstützung durch die ich diese Arbeit mit Zuversicht beginnen und erfolgreich abschließen konnte. Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht, mich stets in allen Lebenssituationen unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt gegeben.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Freundin Alexandra. Mit ihr konnte ich die vielen schönen Momente teilen und bei ihr in schwierigen Zeiten Rückhalt und fortwährende Unterstützung finden.

München, im Mai 2016

Peter Sachnik

Förderkreis

Amberger Werkzeugbau GmbH, Sulzenbach-Rosenberg

Bayerische Motorenwerke AG (BMW Group), München

Brökelmann Alutec GmbH & Co. KG, Dortmund Wickede

Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e. V., Düsseldorf

Eifeler Lasertechnik GmbH, Ingersheim

Hans Berg GmbH & Co. KG, Reichshof

Hubert Stueken GmbH & Co. KG, Rinteln

Jugard + Künstner GmbH, München

KME Germany GmbH & Co. KG, Osnabrück

Scheuermann + Heilig GmbH, Buchen-Hainstadt

Systeme + Steuerungen GmbH, Grafenau

Volkswagen AG (VW), Wolfsburg

Paul Hettich GmbH & Co. KG, Kirchlengern

Resümee

Das Scherschneiden stellt das am häufigsten verwendete, spanlose Trennverfahren in der Blechverarbeitung, insbesondere der Automobilindustrie dar. Ein stabiler Scherschneidprozess und genaues Prozessverständnis sind hierbei für eine gleichbleibende Bauteilqualität und hohe Stückzahlen von entscheidender Bedeutung. Die Interdependenzen auf den internationalen Märkten bedingen kontinuierlich die Fertigungsprozesse unter der Fokussierung des Wirtschaftlichkeitskriteriums zu überprüfen. Die oftmals geforderte Gratfreiheit schergeschnittener Bauteile steht grundsätzlich im Gegensatz zum Ziel der Ressourcenminimierung, da industrielle Entgratungsverfahren zusätzliche Ressourcen binden. Gegenwärtig existiert bei hohen Qualitätsanforderungen an die Schnittfläche keine Alternative die kosten- und zeitintensiven Entgratungsprozesse zu vermeiden. Demzufolge besteht die Herausforderung darin, durch genaues Prozess- und Werkstoffverständnis alle am Schneidverfahren beteiligten Parameter und Einflussgrößen so zu konfigurieren, dass die Nachbearbeitungsprozesse möglichst entfallen.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, eine Methodik für gratfreie Schnittflächen zu erforschen. Mit Hilfe einer Kerbeinprägung im Bereich potenzieller Gratbildung erfolgt im nachfolgenden Scherschneidprozess eine frühzeitige Werkstofftrennung ohne Grat. Aufgrund des Prägenvorgangs wird das neue Verfahren Präge-Scherschneiden genannt. Unter der Prämisse adäquater Einstellungen aller Kerb- und Schneidparameter sowie der genauen Abstimmung von Präge- und Schneidstufe führt das Präge-Scherschneiden zu ansatzlos gratfreien Schnittflächenausprägungen. Trotz der geforderten Toleranzen für die industrielle Serienfertigung ist das Prozessfenster für gratfreies Scherschneiden unter Beachtung der nötigen Konfigurationsparameter zu realisieren. Für ein gratfreies Scherschneiden muss neben der Konfiguration der Kerbgeometrie die Positionierung der Kerbe adäquat gesetzt sein. Eine eindeutige Abhängigkeit der Kerb- und Schneidparameter von der Duktilität des Blechwerkstoffes ist nachgewiesen. Die grundlegend neuen Erkenntnisse für ein gratfreies Schneiden verbessern gerade in hochindustrialisierten Ländern den Ressourceneinsatz und tragen somit zur ganzheitlichen Optimierung der Prozesskette des Trennens bei.

Executive Summary

In the automotive industry, shear cutting is the most commonly used chipless separation method in sheet metal processing. In order to achieve both a consistent quality and high number of sheet metal components, a robust process and an exact understanding of the cutting mechanisms are fundamental. The interdependences of the international markets require a constant focus on profitability criteria during the production process. The general requirements for burr-free cut surfaces are at odds with demands for efficiency, since an additional deburring process is required after shear cutting. At present there is no alternative to avoid these expensive and time-consuming deburring processes in order to achieve a high-quality cut surface. Therefore, the challenge is to understand the effect of all parameters during the shear cutting process in order to minimize these deburring post processes.

In this present research work, a new method is developed and examined in order to achieve burr-free cut surfaces. A burr-free cut surface is created due to an early material separation during the shear cutting process by first embossing a notch along the underside of the cutting line. This newly-developed process is defined as notch-shear cutting due to its embossing technique. By using the appropriate settings for all notching and cutting parameters as well as the precise adjustment of the embossing and cutting step, notch-shear cutting results in a burr-free cut surface. Despite the tolerances required in industrial mass production, the burr-free shear cutting process can be incorporated without any difficulties. Burr-free shear cutting requires the correct geometry and positioning of the notch. The research shows a clear dependence on the ductility of the sheet metal used and the correct notch and cutting parameters. The fundamental advantages of this innovative burr-free cutting process (notch-shear cutting) is the economization of resources, thus enabling an optimization of the whole chain of separation processes.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen.....	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Klassifizierung der Schneidverfahren	3
2.2 Phasen des Scherschneidens.....	5
2.3 Kräfte und Momente beim Scherschneiden	11
2.4 Schnittflächenausprägung	13
2.5 Einflussfaktoren auf den Scherschneidprozess	14
2.5.1 Schneidspalt	15
2.5.2 Schneidkantenradius	16
2.5.3 Blechlagewinkel.....	17
2.6 Verschleißmechanismen.....	17
2.6.1 Adhäsiver Verschleiß	18
2.6.2 Abrasiver Verschleiß.....	18
2.6.3 Oberflächenzerrüttung.....	19
2.6.4 Tribochemischer Verschleiß (Tribooxidation).....	19
2.7 Verschleißmessung.....	20
2.8 Möglichkeiten und Grenzen der Scherschneidsimulation.....	20
2.9 Problematik von gratbehafteten Schnittflächen	21
2.9.1 Bandschleifen.....	22
2.9.2 Gleitschleifen	23
2.9.3 Mechanisches Entgraten.....	24
2.9.4 Grat verprägen.....	24
2.9.5 Konterschneiden.....	25
2.9.6 Entgratungsverfahren mit bedingten Anwendungsmöglichkeiten	25
2.10 Zusammenfassende Beurteilung angewandeter Verfahren	26

2.11	Neue Verfahrensidee zum gratlosen Schneiden	27
2.12	Forschungsbedarf	28
3	Aufgabenbereiche, Zielsetzung und Lösungsweg	29
3.1	Zieldeterminierte Aufgabenbereiche mit adäquatem Lösungsweg	29
3.2	Struktur und Organisation der Forschungsarbeit	31
4	Versuchsanlagen und Messeinrichtungen	33
4.1	Versuchsanlagen.....	33
4.1.1	Schnellläuferpresse	33
4.1.2	Vorschubeinrichtung	34
4.1.3	Haspel und Richtautomat	35
4.2	Messeinrichtungen	35
4.2.1	Zugdruckprüfmaschine	35
4.2.2	3D-Koordinatenmessgerät.....	35
4.2.3	Mikroskopie	35
4.2.4	Funkenemissionsspektrometer	36
4.2.5	Profilmesseinrichtung	36
5	Versuchswerkstoffe.....	38
5.1	Blechwerkstoffe	38
5.1.1	Tiefziehstahl.....	38
5.1.2	Edelstahlwerkstoff.....	39
5.1.3	Aluminiumwerkstoff	40
5.1.4	Kupferwerkstoffe	41
5.1.5	Vergleich der mechanischen Eigenschaften aller verwendeten Blechwerkstoffe	43
5.2	Werkzeugwerkstoffe	44
5.2.1	Chemische Zusammensetzung	44
5.2.2	Gefügeausprägung.....	44
5.2.3	Mechanische Kennwerte	45

6	Versuchswerkzeug	46
6.1	Anforderungen an das Versuchswerkzeug	46
6.2	Werkzeugkonstruktion	46
6.2.1	Grundebene	47
6.2.2	Niederhalterebene	49
6.2.3	Stempelhalterebene	50
6.2.4	Durchführung der Präge- und Schneidoperationen	50
6.3	Feineinstellung des Versuchswerkzeuges	52
7	Versuchsbeschreibung und -durchführung	54
7.1	Parameter und Einstellungen im Einzelhub	54
7.1.1	Einflussgrößen auf das Präge-Scherschneiden.....	54
7.1.2	Prozessparameter des Präge-Scherschneidens	56
7.2	Beschreibung des Versuchsplanes.....	58
7.3	Simulationsprogramm und -modell.....	62
7.4	Schnittflächenvermessung.....	67
7.5	Vermessung der Kerb- und Schneidaktivelemente	68
8	Versuchskonfigurationen, -ergebnisse und Diskussion.....	69
8.1	Versuchsblock 1: Positionierung der Kerbe	69
8.1.1	Versuchskonfigurationen	69
8.1.2	Versuchsergebnisse	69
8.2	Versuchsblock 2: Sensitivitätsanalyse	86
8.2.1	Versuchskonfigurationen	86
8.2.2	Versuchsergebnisse	87
8.3	Versuchsblock 3: Haupteinflussparameter	90
8.3.1	Versuchskonfigurationen	90
8.3.2	Versuchsergebnisse	91
8.4	Versuchsblock 4: einstufiges Verfahren	95

8.4.1	Versuchskonfigurationen	95
8.4.2	Versuchsergebnisse	96
8.5	Versuchsblock 5: Kerbwinkel	100
8.5.1	Versuchskonfigurationen	100
8.5.2	Versuchsergebnisse	101
8.6	Versuchsblock 6: Blechdicke	103
8.6.1	Versuchskonfigurationen	103
8.6.2	Versuchsergebnisse	104
8.7	Versuchsblock 7: Werkstofffestigkeit	105
8.7.1	Versuchskonfigurationen	105
8.7.2	Versuchsergebnisse	106
8.8	Versuchsblock 8: Mengenuntersuchung	107
8.8.1	Versuchskonfigurationen	107
8.8.2	Versuchsergebnisse	108
9	Zusammenfassung und Ausblick	120
A.	Abbildungsverzeichnis	124
B.	Tabellenverzeichnis	128
C.	Literatur	130

Verzeichnis der Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$	1/s	Dehnrage (plastisch)
$\bar{\varepsilon}_D^{\text{pl}}$	-	Dehnung (plastisch)
$\dot{\varepsilon}$	1/s	Dehnrage
$\sigma_0(\varepsilon)$	N/mm ²	Fließkurve (quasistatisch)
ω_D	-	Zustandsvariable
A	%	Bruchdehnung
A _G	%	Gleichmaßdehnung
b	mm	Wahre Kontaktzone
b _E	mm	Kanteneinzugsbreite
b _G	mm	Schnittgratbreite
b _{RZ}	mm	Beeinflusste Randzone
c	-	Beiwert
D	-	Koeffizient
F _a	N	Schneidkraft
F _H	N	Horizontalkraft
F _{H'}	N	Horizontalkraft
F _N	N	Niederhalterkraft
F _P	N	Prägekraft
F _{RH}	N	Horizontale Reibkraft
F _{RH'}	N	Horizontale Reibkraft
F _{RV}	N	Vertikale Reibkraft
F _{RV'}	N	Vertikale Reibkraft
F _S	N	Schneidkraft
F _{S,max}	N	Maximale Schneidkraft
F _{S'}	N	Reaktionskraft
F _V	N	Vertikalkraft
F _{V'}	N	Vertikalkraft
H ₀	-	Grundhärte
H ₁	-	Härte nach Schneidvorgang
h _B	mm	Bruchflächenhöhe
h _E	mm	Kanteneinzugshöhe
h _G	mm	Schnittgrathöhe
h _S	mm	Glattschnitthöhe
k _S	-	Schneidwiderstand
L _K	mm	Abstand der vertikalen Kräfte
l _S	mm	Länge der Schnittlinie
M _A	Nm	Inneres Moment am Gitter

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
M_S	Nm	Inneres Moment am Ausschnitt
η	-	Spannungstriaxialität
p	N/mm ²	Druck
q	N/mm ²	Äquivalente Spannung (v. Mises Spannung)
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze
s	mm	Blechdicke
SSP	%	Schneidspalt
u	%	Schneidspalt
v_{ST}	m/s	Stempelgeschwindigkeit
W_S	Nm	Schneidarbeit
z	mm	Stempelweg, Schneidweg
z_G	mm	Gesamter Schneidweg
α	°	Glattschnittwinkel
β	°	Bruchflächenwinkel
γ	°	Blechlagewinkel
ε	-	Dehnung
σ_H	N/mm ²	Hydrostatische Spannung
σ_V	N/mm ²	Vergleichsspannung
φ	-	Umformgrad
φ_B	-	Umformgrad beim Bruch
p	-	Koeffizient

1 Einleitung

Im Rahmen der Globalisierung müssen sich heutige Industrieunternehmen stetigen Herausforderungen am Markt stellen (Spitta, 2010, S. 44–58). Diese Herausforderungen sind wechselseitig technischer und ökonomischer Natur. Die zunehmende Internationalisierung der Märkte fordert von einem modernen Industrieunternehmen immer wieder, neue Forschungsfragen der Technik anzugehen, um als „Global Player“ auch langfristig bestehen zu können. In der Produktion wird Wirtschaftlichkeit mit Hilfe minimalen Ressourcenverbrauchs angestrebt (Eichhorn und Merk, 2015, S. 181–240). Neben einem geringen Energieverbrauch sind enge Fertigungstoleranzen, eine hohe Ausbringung sowie ein immer komplexeres Teilespektrum die zentralen Anforderungen an heutige Industrieunternehmen. Eine Möglichkeit diesen hohen Erwartungen gerecht zu werden, ist eine intentionale Forschung, die sich mit der Rationalisierung von Fertigungsketten befasst. Der hier erzielte technische Fortschritt beeinflusst das ökonomische Ergebnis des Unternehmens positiv (Wöhe und Döring, 2013, S. 369–376).

Die Interdependenz innerhalb der Fertigungskette fordert einen gestiegenen Qualitätsanspruch der meisten Fertigungsstufen, um mögliche Nachbearbeitungsschritte zu minimieren. Die Automobilindustrie verfolgt seit Jahren das Ziel, durch entsprechende Forschung eine Verbesserung der gesamten Fertigungskette und damit eine Stärkung Deutschlands als Wirtschaftsstandort zu erreichen.

Das am häufigsten in der Blechverarbeitung angewandte Trennverfahren ist das Scherschneiden, welches oft auch als Normalschneiden bezeichnet wird (Hoffmann, 2012, S. 681). Nahezu jedes Blechbauteil durchläuft in stark automatisierten Fertigungsketten eine oder mehrere Trennvorgänge. Genaues Prozessverständnis ist von entscheidender Bedeutung, um durch minimalen Ressourcenverbrauch eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Durch gestiegene Anforderungen an die Bauteilqualität ist der Schnittfläche als Funktionsfläche seit einigen Jahren eine herausragende Bedeutung zugekommen (Kienzle, 1963, S. 105–107). Die ideale Schnittfläche wird allgemein beschrieben durch einen geringen Kanteneinzugsradius, einen hohen Glattschnittanteil, Gratfreiheit, Rechtwinkeligkeit der Schnittfläche zur Blechoberseite, sowie keinen Ein- oder Abriss an der Schnittfläche. Diese Anforderungen, insbesondere die Gratfreiheit können beim konventionellen Scherschneiden nicht erfüllt werden. Prozessbedingt tritt beim Scherschneiden Schnittgrat auf. Dieser ist aus technischer und ökonomischer Sicht unerwünscht. Gerade das Verletzungsrisiko, die Funktionsstörungen durch eine mögliche Gratablösung, der verminderte Korrosionsschutz und die daraus resultierenden Probleme bei der Beschichtung sowie die mögliche Schädigung und der Verschleiß des Werkzeuges stellen die Hauptursachen für gratfreie Schnittflächenanforderungen dar.

Die Zielsetzung der Gratfreiheit stellt eine gravierende Problematik in der gesamten Fertigungskette dar. Zur Produktion qualitativ hochwertiger Schnittflächen sind zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungsschritte (z.B.: Bandschleifen, Gleitschleifen, Mechanisches Entgraten oder Grat verprägen) bisher zwingend erforderlich. Die hierdurch steigenden Produktionskosten müssen somit bei Milliarden von Bauteilen gerade im Bereich der Massenproduktion in Kauf genommen werden. Trotz dieser immensen Nachteile werden diese Nachbearbeitungs- bzw. Entgratungsprozesse aufgrund fehlender prozesssicherer Alternativen in der Industrie heutzutage großflächig eingesetzt. Die Erforschung möglicher Alternativen zu den bekannten Nachbearbeitungsschritten stellt ein immenses Einsparungspotential in Kosten und Zeit dar.

Empirisches Wissen zur Lösung der Gratproblematik kann aus der Praxis generiert werden. Eine wissenschaftlich tiefgehende Untersuchung zur Lösung der Gratproblematik beim Scherschneiden fehlt. Diese Tatsache ist umso überraschender, da durch einen Schneidvorgang im Produktionsprozess ein Schnittgrat zwingend vorhanden ist. Dieser Schnittgrat ist unerwünscht und wird durch kosten- und zeitintensive Nachbearbeitungsschritte, verbunden mit hohen Kosten, beseitigt. Das hier vorhandene Einsparpotential veranschaulicht die außerordentliche Bedeutung dieser wissenschaftlichen Forschungsarbeit.

Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit einer möglichen Alternative zu den bekannten Nachbearbeitungsschritten. Dabei wird sich nicht wie bisher mit den Nachbearbeitungsschritten bzw. dem Konterschneiden beschäftigt, sondern der Schneidprozess soll so verändert werden, dass im Prozess der Grat ansatzlos wegfällt. Daher beruht dieser neue Ansatz auf der Hypothese: Ein Schneidprozess mit komplett gratfreien Schnittflächen ist möglich. In der vorliegenden Forschungsarbeit werden zur Überprüfung dieser Hypothese erstmalig mögliche Einflussparameter für eine gratfreie Schnittflächenausprägung wissenschaftlich untersucht.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Klassifizierung der Schneidverfahren

Bleche sind allgemein definiert als flächenhafte Gebilde aus Metall, wobei nach dem Verhältnis von Länge zu Breite zwischen Tafeln, Bändern und Streifen unterschieden wird (Neumann, 1954). Im Fertigungsprozess, ausgehend vom Zustand des Bleches nach dem Walzprozess bis hin zum fertig geformten Bauteil, durchläuft nahezu jedes Blech eine oder mehrere Schneidoperationen. Die Schneidoperationen haben eine evident wirtschaftliche Bedeutung für die alle Fertigungsverfahren innerhalb der gesamten Prozesskette. In DIN 8580 sind die Fertigungsverfahren als „Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern definiert und in unterschiedliche Hauptgruppen unterteilt“ (DIN 8580, 2003). Die dritte Hauptgruppe das „Trennen“ umfasst alle Verfahrensschritte zum „Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern, wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird“. Hierzu gehört das Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten sowie unbestimmten Schneiden, Abtragen, Zerlegen und Reinigen. Das Scherschneiden, welches zentrales Thema der vorliegenden Forschungsarbeit ist, wird der Gruppe Zerteilen zugeordnet und ist präzisiert als ein mechanisches „Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosen Stoff (spanlos)“ (DIN 8588, 2003). Das Trennen erfolgt beim Scherschneiden durch zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen bis das Umformvermögen des Werkstoffes erschöpft ist und es zur vollständigen Werkstofftrennung durch den Bruch kommt. In der gängigen Literatur wird neben dem Begriff Scherschneiden auch das Synonym Normalschneiden benutzt.

Zur genaueren Beschreibung des Scherschneidens ist nach heutiger Definition eine weitere Verfahrensklassifizierung nach offener und geschlossener Schnittlinie gebräuchlich (DIN 9870, 1974). Beim einhubigen Scherschneiden handelt es sich hierbei um Ausschneiden, Lochen und Abschneiden. Abbildung 2-1 systematisiert diese Verfahren, welche für diese Arbeit von grundlegender Bedeutung sind.

Ausschneiden wird als ein Schneiden mit geschlossener Schnittlinie zur Herstellung einer Außenform am Werkstück definiert. Beim Lochen ist die Schnittlinie wie beim Ausschneiden geschlossen, das Gutteil besteht aber aus der Innenform des Werkstücks. Hingegen wird ein Abschneiden als Schneiden mit offener Schnittlinie definiert. Ein Trennen von Rändern und Bearbeitungszugaben entlang einer offenen oder geschlossenen Schnittlinie wird als Beschneiden bezeichnet, wogegen ein Herausschneiden von Flächenteilen an einer inneren oder äußeren Umgrenzung von Werkstücken längs einer an zwei Randstellen offenen Schnittlinie als Ausklinken definiert ist (DIN 8588, 2003).

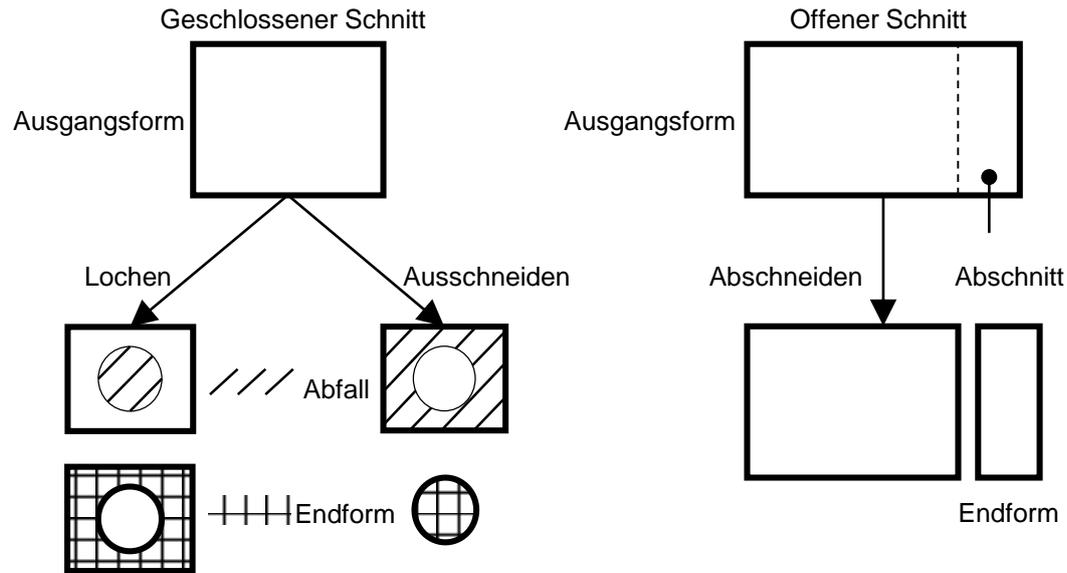


Abbildung 2-1: Unterteilung der Schneidverfahren (DIN 9870, 1974)

Beim Scherschneiden ist zur Durchführung eines Schneidvorganges ein Schneidwerkzeug nötig. Obwohl mit den genannten Verfahren unterschiedliche Bauteilprofile hergestellt werden, ist der grundlegende Aufbau eines jeden Schneidwerkzeuges zum Normalschneiden gleich. Dieser Aufbau wird am Beispiel des Ausschneidens in Abbildung 2-2 gezeigt.

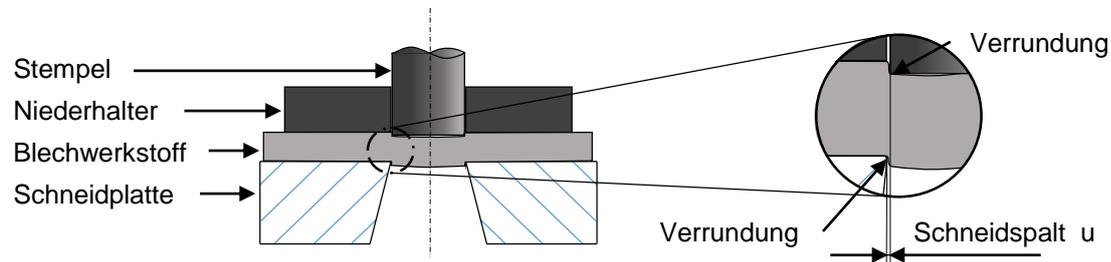


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Schneidvorganges (DIN 9869, 2003)

Ein Schneidwerkzeug besteht aus Werkzeugbauteilen, die sich im direkten Kontakt mit dem Blechwerkstoff befinden bzw. die Schnittfläche formen. Bauteile, die aktiv das Blech formen, werden als Aktivelemente definiert. Grundsätzlich sind zumindest ein Stempel und eine Schneidplatte, auch Matrize genannt, als Aktivelemente notwendig, um einen Schneidvorgang durchzuführen (Jasper, 1999). Um ein Anhaften der Endform am Schneidkanal zu verhindern, ist die Schneidplatte in der Regel beim geschlossenen Schnitt konisch auslaufend. Der offene Schnitt hingegen benötigt keinen konischen Schneidkanal, weil hier die Endform nicht am Schneidkanal anhaftet. Darüber hinaus kommt beim offenen und geschlossenen Schnitt in der Regel ein Niederhalter zum Einsatz. Er umgibt den Stempel, klemmt das Blech fest, um ein ungewolltes, meist elastisches Aufbiegen des Bleches zu verhindern und kann darüber hinaus auch als Abstreifer des Abfalls verwendet werden. Weiterhin kann der Niederhalter auch als Stempelführung zur genauen

Positionierung des Stempels auf der Schneidplatte dienen. Hierdurch ist kein zusätzlicher Führungseinsatz für den Stempel notwendig. Allerdings treten bei fortschreitender Hubzahl Adhäsionseffekte an den Aktivelementen auf (Kap. 2.6.1, S. 18). Dieser adhäsive Verschleiß führt oftmals zu Kaltaufschweißungen am Stempel. Im ungünstigen Fall beschädigen diese Kaltaufschweißungen die Niederhalterplatte oder den Stempel.

Die Formgebung des Schnittteils erfolgt hauptsächlich durch Schneidplatte und Stempel (Atkins, 2009, S. 16–25). Als Schneidspalt (u) ist der horizontale Abstand zwischen Stempelmantelfläche und Schneidplattenkanal definiert. Für Schneidvorgänge mit unterschiedlichen Blechdicken muss der Schneidspalt für jede Blechdicke angepasst werden, weil dieser einen entscheidenden Einfluss auf die Schnittflächenqualität hat. Aus diesem Grund erfolgt die Angabe des Schneidspaltes gegebenenfalls in Prozent der Blechdicke. Beim Scherschneiden sind Schneidspaltwerte zwischen fünf und zehn Prozent gebräuchlich. Aus der Detailskizze von Abbildung 2-2 wird weiterhin ersichtlich, dass die Schneidkanten der Aktivelemente eine Verrundung haben. Die Schneidkanten werden zuerst scharf geschliffen und hiernach gebrochen, was zu einer Kantenverrundung von 20–50 μm führt (Weinert, 1994, S. 13–15). Dies ist notwendig, da scharfe Kanten bei Dauerhubbelastung zum frühzeitigen Ausbrechen an Mantel- und Stirnfläche neigen. Eine zu groß gewählte Kantenverrundung hingegen induziert Druckspannungen in den Blechwerkstoff. Hierdurch kommt es zu einem längeren plastischen Fließen des Blechwerkstoffes als bei einer kleineren Kantenverrundung. Ein hoher Glattschnittanteil, eine spätere Rissinduzierung verbunden mit einer großen Gratstärke sind die Folgen.

2.2 Phasen des Scherschneidens

Das grundlegende Verständnis des Scherschneidprozesses ist in der vorliegenden Forschungsarbeit von fundamentaler Bedeutung für die Analyse des Schneidprozesses. Aus diesem Grunde folgt eine ausführliche Erklärung dieses Prozesses. Die Unterteilung in unterschiedliche Phasen geschieht unter den Kriterien der elastischen und plastischen Formänderung des Werkstoffes sowie der Werkzeugkinematik, dargestellt in Abbildung 2-3 (Hoffmann, 2012, S. 680–682).

Anhand eines rotationssymmetrischen Stempels findet die Erläuterung des Scherschneidprozesses am Beispiel des Lochens (geschlossener Schnitt) statt. Zusätzlich zum geschlossenen Schnitt erfolgen auch die Beschreibung des offenen Schnittes und die Erklärung von Unterschieden beider Schneidarten, da diese zum Verständnis der vorliegenden Forschungsarbeit notwendig sind.

Alle in dieser Forschungsarbeit enthaltenen metallografischen Schliffe sind im Rahmen dieser Arbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen selbst erstellt worden.

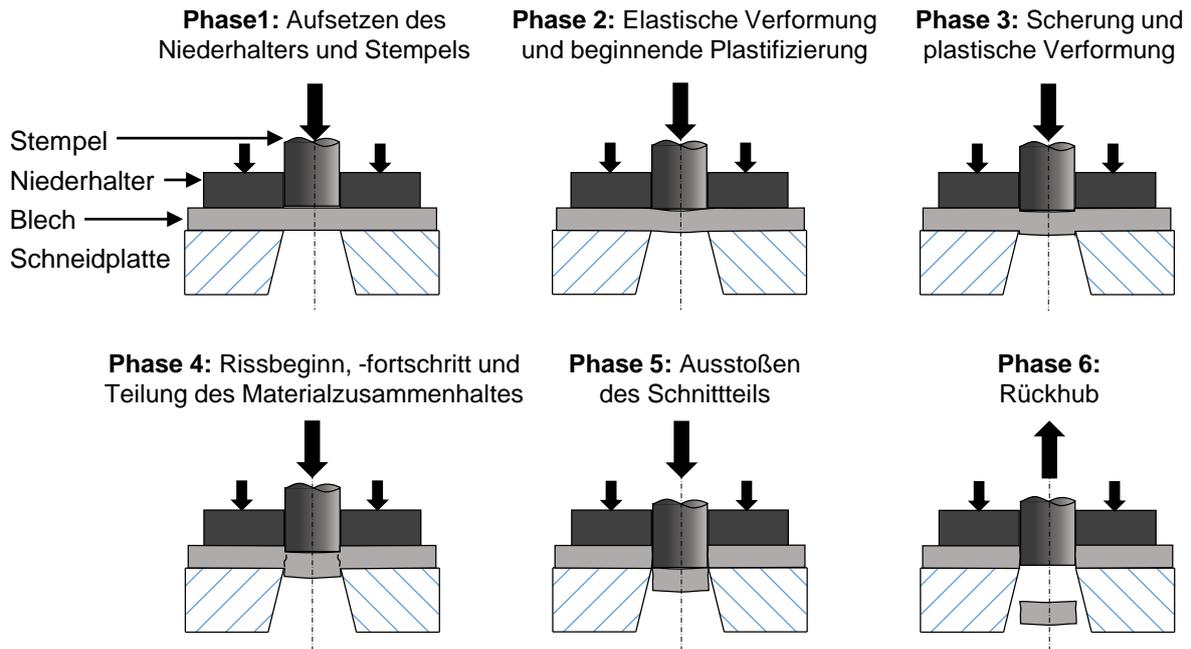


Abbildung 2-3: Phasen des Scherschneidens

Der Schneidkraftverlauf während der einzelnen Schneidphasen kann aus Abbildung 2-4 entnommen werden (Hoogen, 1999, S. 11).

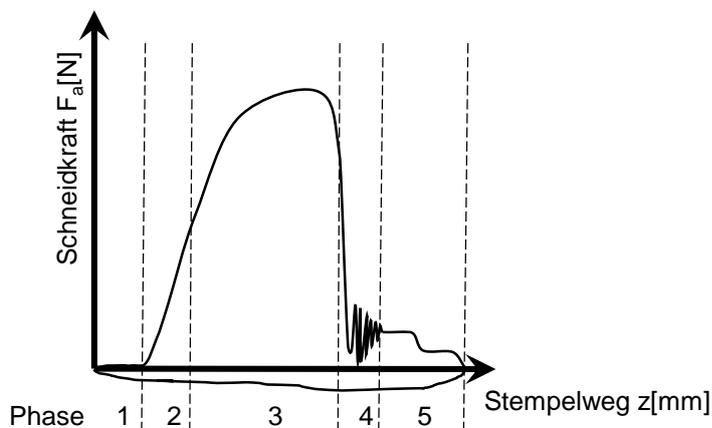


Abbildung 2-4: Schneidkraft-Stempelweg-Diagramm beim Scherschneiden (Hoffmann, 2012, S. 687–689)

Phase 1: Aufsetzen des Niederhalters und des Stempels

Am Anfang des Schneidvorganges bewegt sich der Niederhalter aus der Ausgangslage in Richtung Schneidplatte und drückt das Blech zwischen Niederhalter und Schneidplatte fest, um die Aufwölbung des Bleches während des weiteren Schneidvorganges zu verhindern. Gleichzeitig fährt der Stempel mit einer definierten Geschwindigkeit auf den Blechwerkstoff zu, setzt auf und wird hierbei erstmalig mit Kraft beaufschlagt. In der ersten Phase des Scherschneidens gibt es keinen bedeutenden Unterschied zwischen dem offenen und geschlossenen Schnitt für die vorliegende Forschungsarbeit.

Phase 2: Elastische Verformung und beginnende Plastifizierung

Das Aufsetzen des Stempels auf dem Blech macht sich durch Druckspannungen im Blech bemerkbar. Das Biegemoment, bestehend aus Stempelkraft und resultierender Schneidplattenkraft wirkt auf das Blech. Neben den genannten Kräften ist das Biegemoment auch abhängig von der Breite des Schneidspaltes, der Blechdicke und der Stempelgeometrie bzw. dem -durchmesser. Eine elastische Verformung aufgrund des Biegemomentes ist sowohl beim offenen als auch beim geschlossenen Schnitt zu beobachten (Abbildung 2-5). Die unterschiedlich starke Durchbiegung des Blechstreifens beim offenen und geschlossenen Schnitt erklärt sich aufgrund des inneren Momentes im Blech. Während beim geschlossenen Schnitt ein inneres Moment (aufgrund der geschlossenen Schnittlinie) der Durchbiegung entgegenwirkt und diese daher nur gering ausfällt, ist beim offenen Schnitt prozessbedingt kein inneres Moment vorhanden, das in gegensätzlicher Richtung zur Biegerichtung wirkt. Daher ist beim offenen Schnitt die elastische Durchbiegung allgemein größer als beim geschlossenen Schnitt.

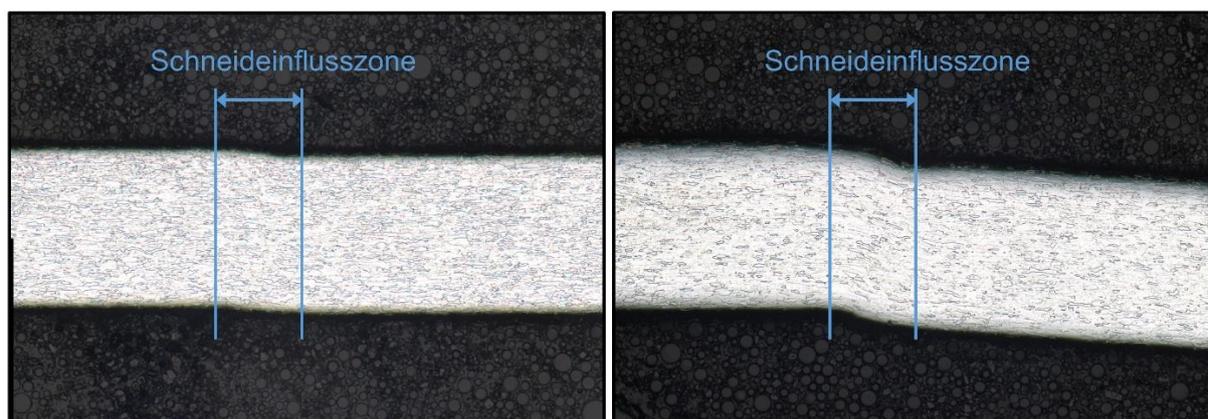


Abbildung 2-5: Metallografische Schliffe der beginnenden Plastifizierung des Blechstreifens im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)

Werkstoffphysikalisch erklärt Gottstein das Biegemoment mit dem Feder-Masse-Modell (Gottstein, 2007, S. 197–288). Ziel des Modells ist es, die Bestimmung des Deformationsverhaltens von aus Polygonnetzen bestehenden Objekten zu zeigen: Modellmäßig besteht der Festkörper hierbei aus Kugeln, die durch Federn verbunden sind. Der Angriff äußerer Kräfte führt zu einer Dehnung der Federn, bis ihre Rückspannung, die proportional mit der Auslenkung ansteigt, die äußeren Kräfte kompensiert (Bergmann, 2013, S. 57–59). Nach Entlastung verformt sich der Festkörper wieder in den Ausgangszustand (Gleichgewichtszustand) zurück. Innerhalb der Schnittlinie kommt es zu einer Aufwölbung des Bleches, so dass die Kontaktfläche zwischen Blech und Schneidaktivelementen auf eine schmale ringförmige Zone minimiert wird. Eine hinreichend große Niederhalterkraft verhindert eine Aufwölbung des Bleches außerhalb der Scherzone. In dieser Phase ist ein annähernd linearer Kraftanstieg im Schneidkraft-Stempel-Diagramm (siehe Abbildung 2-4, S. 6) zu beobachten.

Phase 3: Fortschreitende Scherdeformation

Durch ein weiteres Eindringen des Stempels in das Blech tritt (nach Überschreiten der Fließgrenze) plastisches Fließen auf. Der Werkstückwerkstoff wird irreversibel verformt. Die Schubspannungen im Blech führen primär zu Abgleitvorgängen zwischen den einzelnen Kristallebenen innerhalb eines Kornes. Im Feder-Masse-Modell sind jetzt die Federn durchtrennt und somit tritt eine bleibende Verformung im Werkstückwerkstoff auf. Metallphysikalisch basiert die Umformung auf Fehlern in der regelmäßigen Kristallanordnung, die auch als Versetzungen bezeichnet werden. Die Bewegungen der Versetzungen führen lokal zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte im Blech. Bei fortschreitender Umformung führt dies zu einer Reduzierung der Versetzungsbeweglichkeit und zum gegenseitigen Blockieren von Versetzungen. Diese lokalen Blockierungen werden in einer höher benötigten Spannung für die weitere Umformung deutlich. In der gängigen Literatur wird dieses Phänomen als „Kaltverfestigung“ bezeichnet (Timmerbeil, 1957, S. 57–89). Aufgrund dieser hier erzeugten Kaltverfestigung steigt die benötigte Stempelkraft bei weiterer Umformung an.

Die plastische Formänderung erfolgt ausschließlich im Bereich der Scherzone (Bereich um die Schneidkanten der Werkzeugaktivelemente). In dieser Phase des Scherschneidens bilden sich Kanteneinzugsradius und Glattschnittzone am Werkstückwerkstoff aus. Trotz gleichen Stempelweges entsteht ein makroskopischer Unterscheid der beiden Schneidarten offen und geschlossen (Abbildung 2-6).

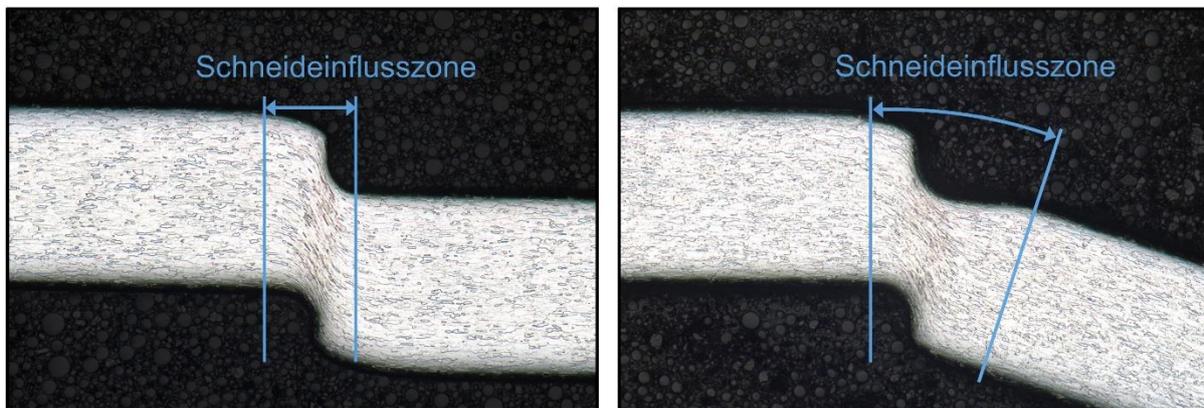


Abbildung 2-6: Metallografische Schlitze der dritten Phase des Scherschneidens im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)

Beim offenen Schnitt tordiert das Blech aufgrund der einseitigen Belastung zu Beginn der plastischen Verformung um den Bereich der Scherzone, während hingegen beim geschlossenen Schnitt ein Abknicken aufgrund der Symmetrie der Schnittgeometrie nur extrem begrenzt möglich ist (inneres Moment in Gegenrichtung). Dieses Abknicken im offenen Schnitt bewirkt Druckspannungen an der Blechunterseite und Zugspannungen an der Blechoberseite.

Phase 4: Rissbeginn, -fortschritt und Teilung des Materialzusammenhaltes

Im weiteren Verlauf des Scherschneidprozesses steigen die Kaltverfestigung und die Zugspannungen an den Schneidkanten weiter an. Sobald die Schubbruchgrenze respektive das Formänderungsvermögen des Blechwerkstoffes erschöpft sind, kommt es zu Mikrorissen im Blech (Abbildung 2-7). Diese wachsen durch weitere Umformung und vereinen sich mit anderen Mikrorissen. Die überlagerten, summierten Zugspannungen führen im offenen Schnitt zu ersten Makrorissen an der Blechoberseite, ausgehend von der Stempelverrundung (Timmerbeil, 1957, S. 61). Aufgrund der hohen radialen und tangentialen Zugspannungen (im geschlossenen Schnitt) entstehen diese Makrorisse bei gleicher Kantenverrundung an der Freifläche des Schneidplattendurchbruches und der Mantelfläche des Schneidstempels.

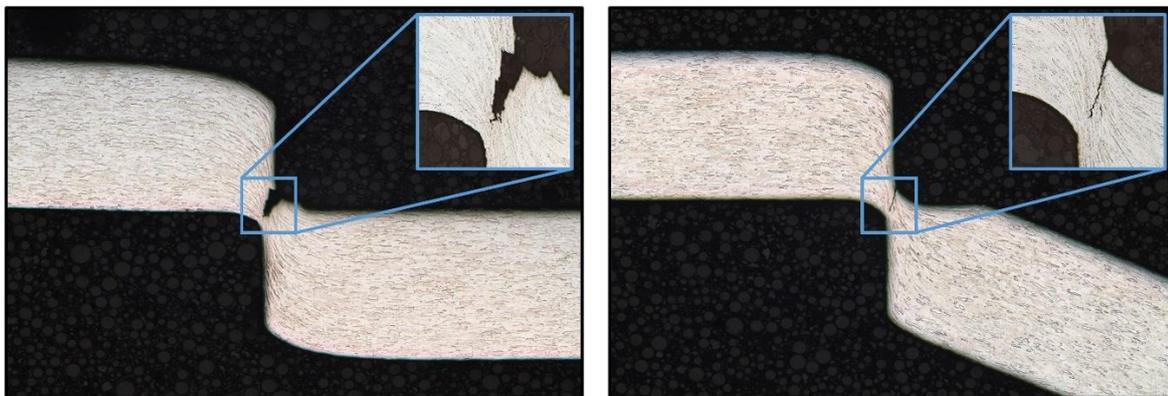


Abbildung 2-7: Metallografische Schlitze kurz vor der makroskopischen Rissinitiierung im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)

Die weitere Bewegung des Stempels forciert weiteres Risswachstum, bis es zur vollständigen Werkstofftrennung kommt. Der Werkstückwerkstoff wird an den Schneidkantenverrundungen der Aktivelemente geformt und bildet hierbei sowohl am Durchbruch als auch am Abfall einen Schnittgrat aus (Abbildung 2-8). Die Größe des Schnittgrades wird unter anderem determiniert von den Radien dieser Aktivelemente. Sind die Prozessparameter optimal aufeinander abgestimmt, laufen die Risse aufeinander zu, bis es zur vollständigen Teilung des Materialzusammenhaltes im Werkstückwerkstoff kommt (Hoffmann, 2012, S. 682).

Ausgelöst durch den abrupten Bruch bringt die im Stempel gespeicherte Energie diesen zum Schwingen (Kals, 1972). Die Reibung zwischen Stempelmantelfläche und Schneidkanalwand führt zu einem Abklingen der Schwingungsbewegung (siehe Abbildung 2-4, S. 6). Eine Rissinizierung an der Blechoberseite tritt aufgrund des Abknickens und der damit induzierten Zugspannungen an der Blechoberseite im offenen Schnitt früher auf als im geschlossenen Schnitt (bei gleichbleibenden Konfigurationen aller übrigen Prozessparameter).

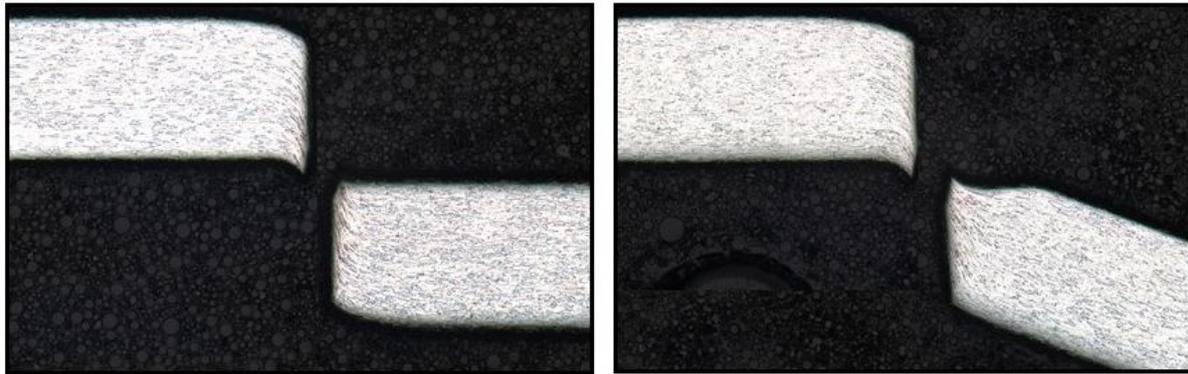


Abbildung 2-8: Metallografische Schliffe nach der Materialtrennung im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)

Phase 5: Ausstoßen des Schnittteils

Parallel zum Abklingen der Schwingungsbewegung dringt der Stempel weiter in die Schneidplatte bis zum unteren Umkehrpunkt der Umformmaschine ein. Die Trennung des Blechwerkstoffes hat eine Rückfederung des Bleches und des ausgeschnittenen Teils zur Folge (Dies, 1954, S. 36–39). Der Kontakt der Stempelmantelfläche mit dem gelochten Bauteil bzw. der Schnittfläche des Ausschnittes und dem Schneidkanal verursacht Reibung und eine damit verbundene Temperaturerhöhung der Scherzone (Dies, 1955, S. 651–654). Durch den Kontakt tritt Mantelverschleiß am Stempel und am Kanal der Schneidplatte auf. Bis zum unteren Umkehrpunkt der Umformmaschine stößt der Stempel das ausgeschnittene Bauteil durch den Schneidkanal aus. Der konisch auslaufende Schneidkanal im geschlossenen Schnitt begünstigt das weitere Durchfallen. Das Ausstoßen des Schnittteils bewirkt eine weitere Absenkung der Stempelpkraft (Buchmann, 1961, S. 16).

Phase 6: Rückhub

Der Stempel durchläuft den unteren Umkehrpunkt der Umformmaschine, kommt kurzzeitig zum Stillstand, bevor er in entgegengesetzter Richtung beschleunigt wird. Kurz vor dem unteren Umkehrpunkt gleicht die Reibung zwischen Stempelmantelfläche und Schneidkanal die Gewichtskraft des Stempels aus, und die Stempelpkraft ist Null. Nach dem unteren Umkehrpunkt erfolgt aufgrund des Rückhubes ein Hochziehen des Stempels. Es existiert eine negative Stempelpkraft (siehe Abbildung 2-4, S.6). Während dieses Prozesses besteht Reibung zwischen der Stempelmantelfläche und der Schnittfläche des gelochten Stanzgitters, was zu einem erneuten Verschleiß der Stempelmantelfläche führt. Befindet sich das gelochte Bauteil trotz Rückhub an der Stempelstirnfläche, kann ein Abstreifer einen hochkommenden Stanzbutzen verhindern. Anschließend bewegt sich der Stempel aus dem Schneidkanal und dem Blechstreifen, erfährt im oberen Umkehrpunkt der Umformmaschine kurzzeitig die Geschwindigkeit null, bevor ein neuer Blechstreifen eingelegt wird und der Stempel sich mit definierter Geschwindigkeit auf den Blechstreifen zubewegt, um einen erneuten Schneidprozess einzuleiten.

In den beiden letzten Phasen des Scherschneidens sind keine für die vorliegende Arbeit relevanten Änderungen zwischen offenem und geschlossenem Schnitt vorhanden.

2.3 Kräfte und Momente beim Scherschneiden

Beim Scherschneidprozess ist die Kenntnis der auftretenden Kräfte und Momente von ausschlaggebender Bedeutung, weil diese bei der Auslegung des Schneidwerkzeuges berücksichtigt werden müssen.

Die benötigte maximal auftretende Schneidkraft $F_{S,max}$ hängt vorrangig von der Schnittlinie, der Zugfestigkeit und der Dicke des Materials ab und wird in der Regel nach folgender Formel abgeschätzt (Keller, 1951, S. 67–84):

$$F_{S,max} = l_S * k_S * s \quad (2.1)$$

$$\text{mit } k_S = 0,8 * R_m \quad (2.2)$$

R_m	Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes [N/mm ²]
l_S	Länge der Schnittlinie [mm]
s	Blechdicke [mm]

Der Faktor k_S wird als Schneidwiderstand bezeichnet und hängt vom Schneidverfahren, Schneidspalt, Werkzeugverschleiß, Schnittlinienform, Blechdicke, Werkstoffeigenschaften und der Schmierung ab (Dolmetsch et al., 2013, S. 45). Zur Abschätzung der maximalen Schneidkraft beträgt der Schneidwiderstand in der Regel näherungsweise 80 % der Zugfestigkeit (Lange, 1990a, S. 568–607).

Zusätzlich treten in der Scherzone lokal Kräfte und Momente auf, die den Scherschneidprozess entscheidend beeinflussen (beispielhaft im geschlossenen Schnitt in Abbildung 2-9). Sobald der Stempel auf das Blech auftritt, steigt die Schneidkraft F_S bis zum beschriebenen Maximum an (siehe Abbildung 2-4, S.6). Die Stempelkraft lässt sich in eine horizontale Reibkraft F_{RV} und eine vertikale Reibkraft F_V aufteilen, wobei die Vertikalkraft den Hauptanteil bildet. Aufgrund des Kräftegleichgewichts wirken an der Schneidplatte die gleichen Kraftbeträge (F_{RV} und F_V) in entgegengesetzten Richtungen. Der Abstand L_K der beiden Vertikalkräfte F_V und F_V zueinander bewirkt im Gitter sowie im Ausschnitt ein Biegemoment M_A beziehungsweise M_S . Das Moment M_A führt zu einem Abheben des Blechstreifens von der Schneidplatte. Es kann durch eine hinreichend hohe Niederhalterkraft kompensiert werden. Das Moment M_S kippt den Ausschnitt. Bei dem geschlossenen Schnitt ist das Kippen gering, da die gegenüberliegenden Kraftkomponenten sich gegenseitig aufheben. Hingegen wird beim offenen Schnitt ein Kippen des Ausschnittes um 30°-50°

makroskopisch bei jedem Abschneiden beobachtet (siehe Abbildung 2-7, S. 9). Dieses Kippen bzw. das Fehlen der gegenüberliegenden Kräfte beim offenen Schnitt ist der Hauptgrund für eine unterschiedliche Schnittflächenausprägung zwischen offenem und geschlossenem Schnitt (siehe Abbildung 2-8, S. 10) (DIN 8588, 2003).

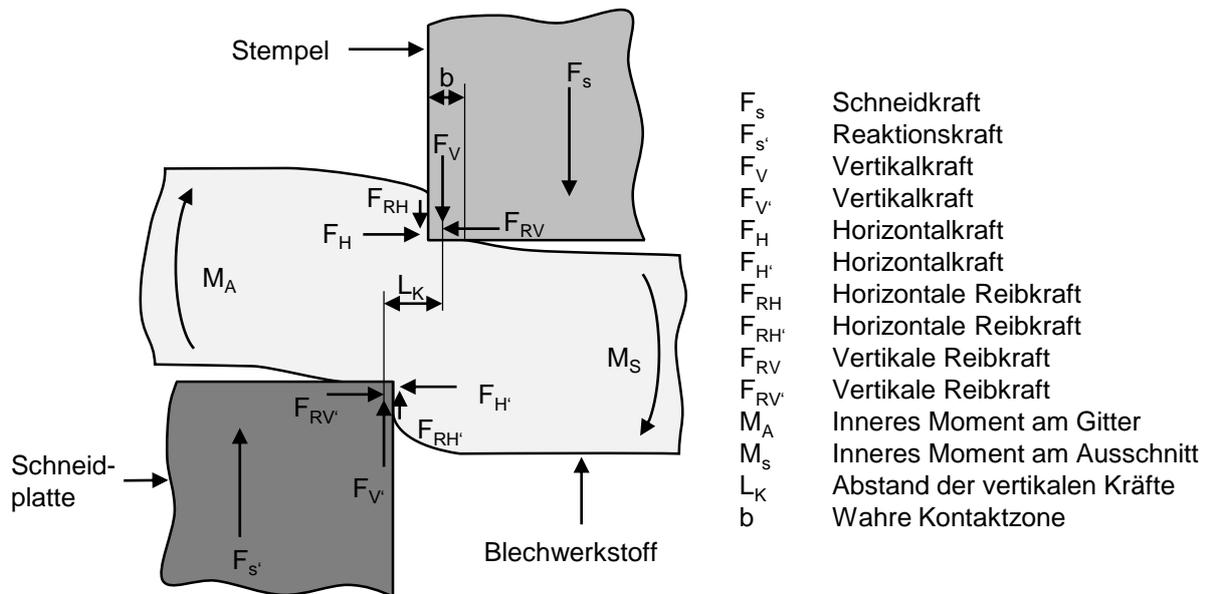


Abbildung 2-9: Schneidkraftkomponenten beim Scherschneiden (Romanowski, 1959)

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Beschreibung des Schneidvorganges ist die Schneidarbeit W_S , welche das Integral der Kraft über den Weg während des Schneidprozesses darstellt. Allgemein gilt zur Berechnung der Arbeit folgende Formel:

$$W_S = \int_0^{z_G} F_S * (z) * dz \quad (2.3)$$

mit

W_S	Schneidarbeit [Nm]
F_S	momentane Schneidkraft [N]
z	Schneidweg [mm]
z_G	gesamter Schneidweg [mm]

Die integrale Bestimmung der Schneidarbeit W_S erfolgt in der Praxis in folgender Formel (Keller, 1951):

$$W_S = F_{S,max} * s * c \quad (2.4)$$

mit

W_S	Schneidarbeit [Nm]
$F_{S,max}$	Maximale Schneidkraft [N]
s	Blechdicke [mm]
c	Beiwert [-]

Der in der Formel eingesetzte Faktor c hängt von den Eigenschaften des Blechwerkstoffes und den Prozessparametern ab. Typische Werte für Stahl liegen zwischen 0,4 und 0,7, wobei der untere Wert für spröde, dicke Bleche mit einem großen Schneidspalt zu wählen ist, während der obere Wert für zähe, dünne Bleche mit einem geringen Schneidspalt gewählt wird (Doege, 1990).

2.4 Schnittflächenausprägung

Aufgrund von Werkstoffverformungen kommt es zu einer charakteristischen Ausbildung der Schnittfläche, die in der VDI-Richtlinie 2906 näher erklärt wird (Abbildung 2-10) (VDI 2906, 1994).

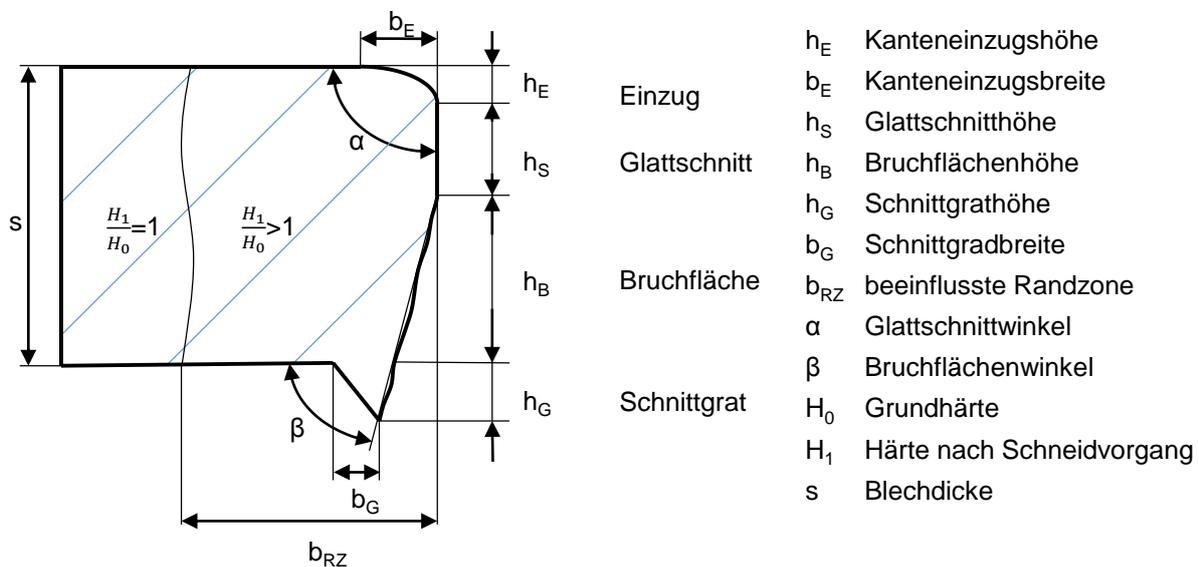


Abbildung 2-10: Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906

Die Schnittflächenausprägung bildet sich in der dritten und vierten Phase des Scherschneidens. Abhängig vom Einsatzzweck des Bauteils muss die Qualität der schergeschnittenen Schnittfläche adäquat gewählt werden (Wisselink, 1998). Für die Beurteilung der Schnittflächenkenngrößen von essentieller Bedeutung. Mit zunehmenden Stempelweg geht der Kanteneinzug am Schnittteil in einen glatten Bereich über (Glattschnitthöhe). Sobald der Werkstoff zu

brechen beginnt, entsteht die Bruchfläche. Der hierbei entstehende Bruchwinkel ist zur Blechebene geneigt. Aufgrund der Einförmigkeit des Blechwerkstoffes in die verrundete Schneidmatrize kommt es zur Gratbildung, die sich während des Fließens in der dritten Phase des Scherschneidens ausbildet. Zusätzlich zu den geometrischen Schnittflächenkenngrößen entsteht im Bereich der Randzone eine Härtesteigerung, erzeugt durch die Kaltverfestigung (siehe Kap. 2.2, S. 7-8).

Die Industrie setzt für qualitativ hochwertige Schnittflächen (z. B. Funktionsflächen) oft die Prämisse einer großen Glattschnitthöhe h_S , eines Bruchflächenwinkels β nahe 90° und keiner bzw. einer minimalen Grathöhe h_G . Hieraus ergeben sich minimalste Werte für Kanteneinzugshöhe h_E , Kanteneinzugsbreite b_E sowie Bruchflächenhöhe h_B .

Als allgemein gebräuchliche Richtlinie gibt die DIN 9830 dem Anwender eine Vorstellung, mit welchen noch adäquaten Schnittflächenkenngrößen zu arbeiten ist (DIN 9830, 2011). Abhängig von der Zugfestigkeit und der Dicke des Werkstoffes erfolgt in dieser DIN eine Unterteilung der Schnittfläche nach dem Hauptkriterium Schnittgrathöhe in drei Klassen (fein, mittel, grob).

Zur Beurteilung einer Schnittfläche ist die Anwendungsform des Bauteils von entscheidender Bedeutung. Ist die Schnittfläche z. B. eine Funktionsfläche zur Übertragung von Kräften (z. B. Kettenglieder der Steuerungskette im Automobil), so fordert diese Schnittfläche einen hohen Glattschnittanteil, hingegen muss Grاتفreiheit vorliegen, wenn Verletzungsrisiken des Werkers oder Benutzers auftreten können (z. B. Scharniere für die Möbelindustrie).

Nach VDI 2906 ist die Schnittgrathöhe der Anteil der Schnittfläche, welcher über die Blechdicke hinausragt (VDI 2906, 1994). In der vorliegenden Arbeit wird diese Definition des Schnittgrates aufgrund des neuen Verfahrens erweitert. Ein Schnittgrat, der zwar nicht über die Blechdicke hinausragt, aber trotzdem scharfkantig ist, kann zu Verletzungen führen und muss daher in der vorliegenden Arbeit auch als Schnittgrat definiert werden.

2.5 Einflussfaktoren auf den Scherschneidprozess

Die Qualität der Schnittfläche und des Scherschneidvorganges sind von einer Vielzahl von Prozessparametern abhängig. Eine genaue Kenntnis dieser Parameter ist daher für die vorliegende Forschungsarbeit von entscheidender Bedeutung. Neben dem Verständnis der einzelnen Einflussparameter ist die komplexe Wechselwirkung dieser Parameter untereinander ein weiterer wichtiger Faktor zur Beurteilung der Schnittflächenqualität und des Schneidprozesses (VDI 3368, 1982). Ohne die Kenntnis der einzelnen Parameter kann eine Beurteilung der Schnittfläche und des Schneidprozesses nur sehr rudimentär erfolgen (Seidenberg, 1965). Nachfolgend werden die für diese Arbeit ausschlaggebenden Parameter (Schneidspalt, Schneidkantenradius und Blechlagewinkel) genannt und deren Einfluss auf die Schnittflächenqualität und den Scherschneidprozess erläutert.

2.5.1 Schneidspalt

Der Schneidspalt ist bekannt als entscheidender Einflußparameter auf die Schnittflächenqualität und den Verschleiß der Schneidkanten (Romanowski, 1959, S. 53–56). Nach VDI 3368 ist der Schneidspalt der senkrechte Abstand zur Schneidebene von der Schneidkante des Schneidstempels hin zur Schneidplatte. Bei der Auslegung von Schneidwerkzeugen wird der Schneidspalt gewöhnlich als relative Größe u zur Blechdicke angegeben (Dolmetsch et al., 2013, S. 42). Für Stahlwerkstoffe beträgt der Schneidspalt meist zwischen 5% und 10% der Blechdicke. Die Bedeutung des Schneidspaltes wird ersichtlich in der Betrachtung unterschiedlicher Schneidspalte.

Ein kleiner Schneidspalt führt zu einem geringen Werkstoffvolumen in der Scherzone, wodurch es zu einer Überlagerung von Druckspannungen in der Scherzone kommt. Die überlagerten Druckspannungen resultieren in einem Anstieg des Formänderungsvermögens. Metallphysikalisch bedeutet dies, dass die mikroskopischen Risse an der Öffnung und Ausbreitung durch die Druckspannungen gehindert werden und somit längeres plastisches Fließen zu einem erhöhten Glattschnittanteil am Schnittteil führt (Timmerbeil, 1957, S. 58–66). Negative Auswirkungen hat ein kleiner Schneidspalt zusätzlich auf den Verschleiß (Behrens und Schaeper, 2004, S. 28–32). Ein kleiner Schneidspalt bewirkt eine stärkere Kaltverfestigung, wodurch ebenfalls die benötigte Schneidkraft zur Werkstofftrennung ansteigt. Dies bewirkt einen stärkeren Verschleiß an den Schneidkanten der Aktivelemente. Ein großer Schneidspalt führt zu einer größeren Kanteneinziehungshöhe und -breite und darüber hinaus zu einem größeren Bruchflächenwinkel (Hörmann, 2008, S. 62).

Weiterhin negativ für die Schnittflächenqualität ist die ausgeprägte und größere Grathöhe bei großen Schneidspalten. Der Schneidspalt darf nicht zu klein bzw. zu groß gewählt werden, da zwischen dem Schneidspalt die Rissinduzierung und der Rissverlauf stattfindet (Neumann, 1979, S. 12). Im optimalen Fall verlaufen die Risse ausgehend vom Schneidkantenradius des Stempels und der Schneidplatte aufeinander zu bis es zur Werkstofftrennung kommt (Abbildung 2-11, mitte).

Bei falsch eingestelltem Schneidspalt können die Risse aneinander vorbeilaufen. Ist der Schneidspalt zu groß (siehe Abbildung 2-11, rechts), macht sich dies durch erhöhten Grat und Flitter bemerkbar. Es kommt zu einer schrägen, inhomogenen Bruchfläche und einem kleinen Bruchflächenwinkel. Bei zu großem Schneidspalt ist ebenso wie bei zu kleinem Schneidspalt mit erhöhtem Grat und Flitter zu rechnen. Darüber hinaus kann es zu Sekundärglattschnitt (Zipfelbildung) und wiederum erhöhtem Verschleiß kommen (Nothaft, 2014, S. 106).

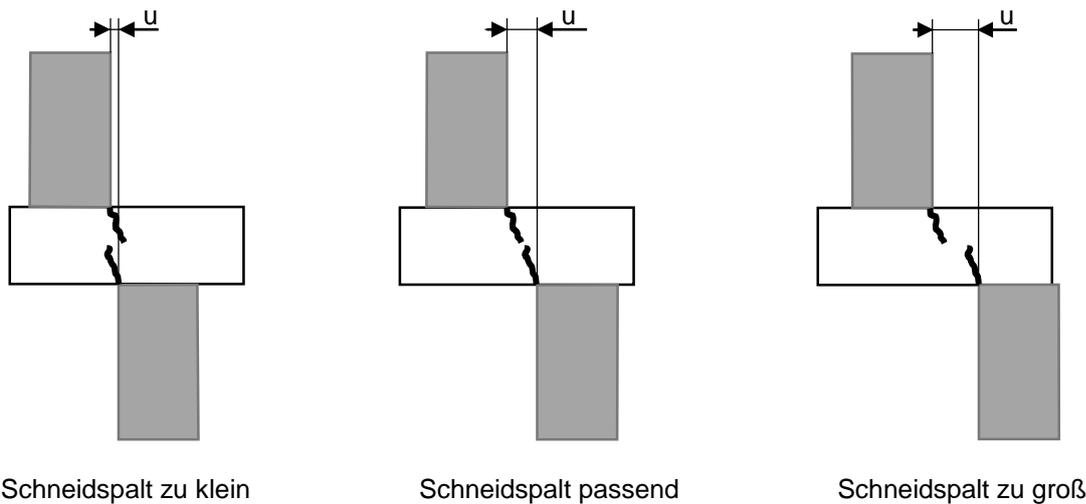


Abbildung 2-11: Wirkung unterschiedlicher Schneidspalte

2.5.2 Schneidkantenradius

Neben dem Schneidspalt ist die Verrundung der Schneidkanten für den Schneidprozess von entscheidender Bedeutung, da der Schneidkantenradius einen direkten Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Der Radius am Stempel beeinflusst den Grat am Schnittteil, während der Radius an der Matrize eine Auswirkung auf den Grat am abgeschnittenen Blech hat. In der Regel werden die Schneidkanten anfangs scharf geschliffen und anschließend gebrochen, wodurch ein Radius von 20 μm bis 50 μm eingestellt wird (Doege und Behrens, 2010). Eine weitere Möglichkeit zur Einstellung des Schneidkantenradius ist das Schleppschleifen, bei dem die Aktivelemente mit hoher Geschwindigkeit durch eine abrasive Emulsion „geschleppt“ werden. Abhängig von der Geschwindigkeit und Schleppzeit lässt sich der Radius an der Schneidkante sehr präzise einstellen.

Grundsätzlich kann vom Zustand des schergeschnittenen Bauteils auf den Zustand der Schneidkante geschlossen werden. Scharfe Schneidkanten führen zu Spannungsspitzen, die wiederum die Rissinduzierung und einen frühen Bruch des Bauteils begünstigen. Die frühe Rissinduzierung und die damit verbundenen Spannungsspitzen haben neben einer geringeren Schneidkraft aber auch erhöhte Spannungskonzentrationen im Werkzeug zur Folge, wodurch frühzeitiges Versagen auftreten kann (Bühler, S. 84–89). Dies hat eine geringe Grathöhe und einen geringen Glattschnittanteil zur Folge. Die Beanspruchung der Schneidkanten bei zunehmender Hubzahl bewirkt einen abrasiven Materialabtrag an den Schneidkanten. Bei fortschreitender Hubzahl vergrößert sich der Radius an den Schneidkanten stetig. Die geometrische Veränderung der Schneidkante hat einen direkten Einfluss auf den Scherschneidprozess und somit auf die Bauteilqualität. Eine größere Schneidkantenverrundung als im Ausgangszustand bzw. eine Fase an der Schneidkante führt zu einer späteren Rissinduzierung, da höhere Druckspannungen auftreten und größere Umformarbeit benötigt wird (Becker und Cammann, 1981, S. 4–6). Hierdurch erhöht sich das Formänderungsvermögen des Werkstoffes und begünstigt plastisches Fließen. Der Bruch tritt bei verrundeten

Schneidkanten später auf als bei scharfen. Dies hat eine Erhöhung des Glattschnittanteils, der Grat­höhe und der Schneidkraft zur Folge (Borchert, 1976). Deshalb können verschlissene Schneidkan­ten auch durch eine Veränderung der Schnittflächenausprägung identifiziert werden.

2.5.3 Blechlagewinkel

Bei Schneidwerkzeugen trifft der Stempel in der Regel senkrecht mit seiner gesamten Stirnfläche ganzheitlich auf die Blechoberfläche auf. Befindet sich die Blechebene nicht im 90° -Winkel zur Bewegungsrichtung des Stempels, so bezeichnet man die Differenz zwischen dem rechten Winkel und dem vorliegenden Winkel als Blechlagewinkel (Abbildung 2-12).

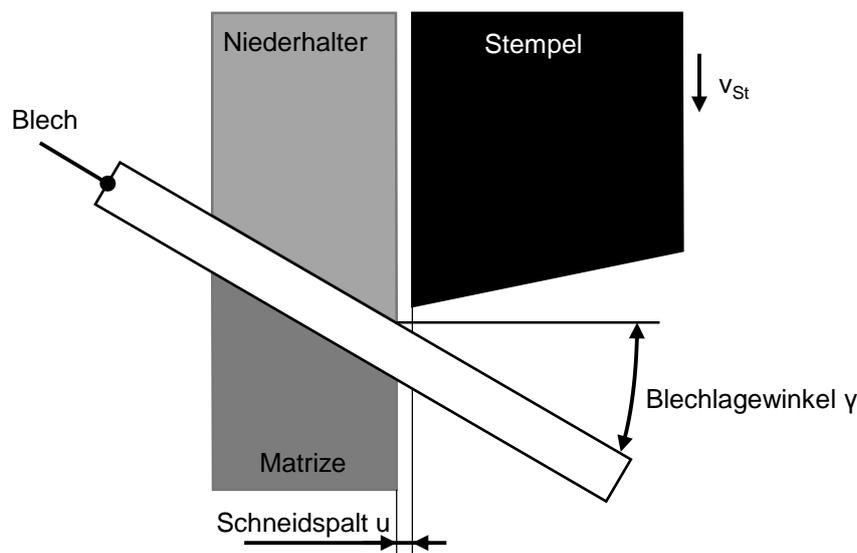


Abbildung 2-12: Blechlagewinkel

Der Blechlagewinkel führt zu Querkräften zwischen Stempel und Führungskanal. Nachteile der Querkräfte sind neben dem erhöhten Verschleiß die Gefahr des horizontalen Wegdrückens des Stempels (Yamasaki und Ozaki, S. 533–539). Eine geeignete Versteifung auf der gegenüberliegenden Seite des Stempels kann dem Wegdrücken entgegenwirken. Konstruktionsrichtlinien geben den Hinweis, dass der Blechlagewinkel aufgrund der genannten Nachteile nicht größer als 10° gewählt werden darf (Oehler, S. 342–343).

2.6 Verschleißmechanismen

Laut der Gesellschaft für Tribologie (Gesellschaft für Tribologie e. V., 2002, S. 7) ist Verschleiß der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Verschleiß tritt beim Scherschneiden aufgrund der Reibvorgänge an den Kon-

taktflächen und Temperaturerhöhung in der Schneidzone zwischen Blechwerkstoff und Schneidstempel, sowie zwischen Blechwerkstoff und Schneidmatrize auf (Czichos und Habig, 2003, S. 4–7). Diese Reibvorgänge führen zu atomaren, molekularen bzw. mechanischen Wechselwirkungen. Der Verschleiß der Aktivelemente im Werkzeug steigt bei fortschreitender Hubzahl und beeinflusst die Teilequalität negativ. Unter dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit ist die Berücksichtigung von Verschleißerscheinungen schon bei der planvollen Konstruktion und Auslegung von Schneidwerkzeugen heutzutage von wesentlicher Bedeutung. Nach Stand der Forschung existieren vier Verschleißmechanismen, die in Abbildung 2-13 dargestellt sind (Kienzle, 1957, S. 25–34).

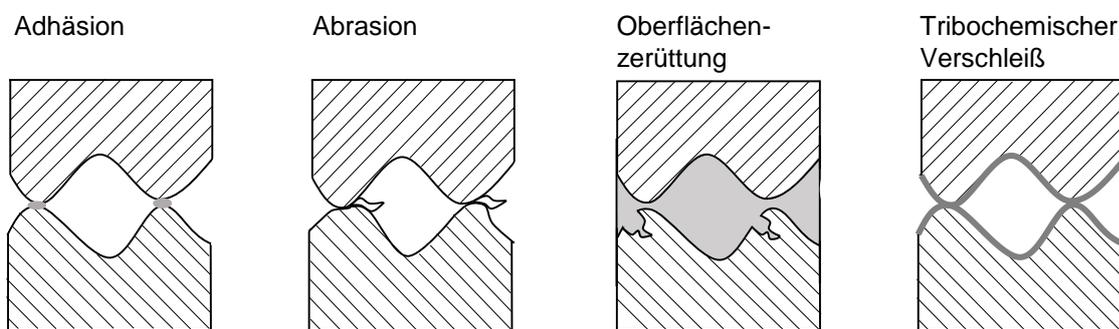


Abbildung 2-13: Verschleißmechanismen (Fleischer, 1980)

2.6.1 Adhäsiver Verschleiß

Als Adhäsion werden Anhaftungen auf den Werkzeugaktivelementen bezeichnet. Aufgrund hoher Flächenpressungen können diese beim Scherschneiden in der Schneidzone auftreten. Der Mechanismus beruht auf hohem Druck und hoher Reibung aufgrund der Relativbewegung der Aktivelemente (Hull et al., 2011, S. 51–53). Diese tribologische Beanspruchung reißt die Oberflächendeckschichten der Reibpartner auf. Es entsteht eine stoffschlüssige Übertragung vom weicheren (Blechwerkstoff) zum härteren Werkstoff (Aktivelement). Diese Kaltaufschweißungen mit schalenförmigen Abplatzungen bewirken ein Aufrauen der Werkzeugoberfläche (Ikramov und Machkamov, 1987, S. 11–17). Die veränderte Werkzeugoberfläche hat einen direkten, negativen Einfluss auf die Maßgenauigkeit der Schnittfläche und somit auch auf die Teilequalität. Die Folge adhäsiven Verschleißes ist makroskopisch sichtbar in der Bildung von formlosen, wenigen Mikrometern großen bis mehreren Zentimetern langen Partikeln, die als Flitter bezeichnet werden (Burwell und Strong, 1957, S. 470–477).

2.6.2 Abrasiver Verschleiß

Der abrasive Verschleiß beruht auf einer Erosion der Matrix (Masen, 2004). Aufgrund mangelnder Oberflächenhärte kommt es in Verbindung mit den Relativbewegungen der Reibpartner zu einem

Materialabtrag, entweder durch freie Partikel oder aufgrund von Oberflächenrauigkeiten (Sommer und Heinz, 2014, S. 370–422). Die Rauigkeitsspitzen des harten Werkstoffes dringen in den weichen Werkstoff ein, was zu Furchen und Unebenheiten des weichen Reibpartners führt. Dieser Mechanismus, der auch als Mikrozerspannung bezeichnet wird, tritt vermehrt beim Schneiden von höher- und höchstfesten Blechwerkstoffen auf (Buckley, 1982, S. 469). Die Ursache liegt in den sehr hohen Festigkeiten dieser Werkstoffe. Abhilfe kann eine genügend hohe Härte des Grundwerkstoffes schaffen, die aber auch die Versprödung erhöht. Dies begünstigt Ausbrüche und einen Werkzeugstopp.

Die Aktivelemente sind beim Scherschneiden oft wesentlich härter als der zu verarbeitende Blechwerkstoff. Abrasiver Verschleiß ist daher zunächst nicht möglich. Allerdings können Fremdpartikel in die Scherzone gelangen, die einen abrasiven Verschleiß bedingen (Franzmann und Kalkbrenner, 2008, S. 8–13).

2.6.3 Oberflächenzerrüttung

Oberflächenzerrüttung tritt aufgrund von Ermüdung des Werkzeugwerkstoffes auf, hervorgerufen durch die hohen mechanischen Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit des Werkstoffes (Sommer und Heinz, 2014, S. 216–229). Es bilden sich Mikrorisse. In Folge von zyklisch wechselnden Zug- und Druckbeanspruchungen wachsen diese, und es entstehen neue Mikrorisse. Bei einem Aufeinandertreffen der Risse kommt es lokal zu abrupten Ausbrüchen und Abplatzungen. Bis zu dieser Werkstofftrennung ist keine Verschlechterung der Schneidqualität bemerkbar, wodurch eine Vorhersage über die Oberflächenzerrüttung nur sehr begrenzt erfolgen kann. Besonders anfällig für die Oberflächenzerrüttung sind die Schneidkanten, da hier hohe Zug- und Druckspannungen auftreten (Czichos und Habig, 2003, S. 133–137). Das Ablösen von Partikeln an der Schneidkante infolge der Oberflächenzerrüttung führt meist zum abrupten Werkzeugversagen. Gegenmaßnahmen sind die Wahl eines geeigneten Werkstoffes, der eine hohe Zähigkeit und ein gleichmäßiges Gefüge mit fein verteilten Karbiden aufweisen muss (Fugger, 1984, S. 217–230).

2.6.4 Tribochemischer Verschleiß (Tribooxidation)

Bedingt durch chemische Reaktionen zwischen der Oberfläche der Werkzeugaktivelemente, dem Blechwerkstoff und dem Schmiermittel kann es zu einer Reaktionsschicht in der Scherzone kommen (Gahr, 1985, S. 260–267). Erhöhte Temperaturen in der Kontaktzone begünstigen die Reaktion. Die Reaktionsschicht ist meist spröde, wodurch ein Zerstören der Schicht durch die Aktivelemente und weiterer Materialabtrag begünstigt wird (Schroelkamp, 1984, S. 287–293) (Heidemeyer, 1975).

2.7 Verschleißmessung

Die genannten Verschleißarten können den Scherschneidprozess negativ beeinflussen und zu Werkzeugausfällen führen (Deutges, 2005, S. 147–149). Die Verschleißmessung schafft Bedingungen zum Erkennen des Werkzeugausfalls und ist daher die Grundlage für rechtzeitiges Austauschen verschlissener Aktivelemente. Die Verschleißkenngrößen beziehen sich hierbei auf den Schneidstempel bzw. das Obermesser, da hier im Vergleich zur Matrize bzw. zum Untermesser höhere Reibkräfte auftreten. Diese Kräfte führen zu einem früheren Verschleiß des Obermessers bzw. Schneidstempels als des Untermessers bzw. der Matrize. Die Verschleißkenngrößen kennzeichnen die geometrische Änderung der Aktivelemente infolge der wechselnden Druck- bzw. Zugbelastung (Lange, 1990b, S. 136). Der Verschleiß der Aktivelemente erfolgt aufgrund der Kenngrößen in Abbildung 2-14. Die Kenngrößen unterscheiden sich in lineare, planare und volumetrische Größen. Die Mantelverschleißlänge ist der flächenmäßige Materialabtrag auf der Stempelmantelfläche, der Stirnflächenverschleiß bezeichnet den Materialabtrag entlang der Stirnseite. Die 45°-Verschleißlänge definiert den Abstand von der geschliffenen Stempelspitze zur verrundeten Stempelspitze im 45° Winkel zur Schneidrichtung. Das Verschleißvolumen ist der dreidimensionale Materialabtrag von Stirn- und Mantelfläche über die gesamte Stempelbreite (Doege und Behrens, 2010, S. 591).

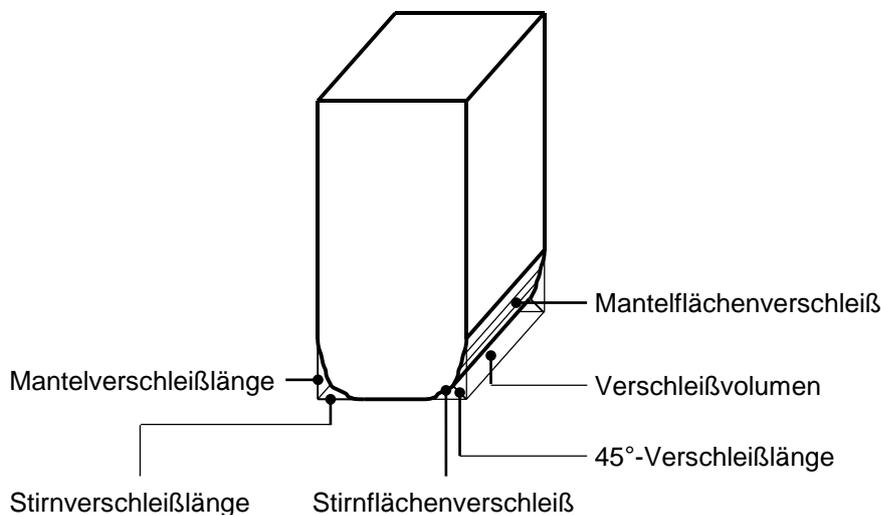


Abbildung 2-14: Verschleißkenngrößen am Obermesser

2.8 Möglichkeiten und Grenzen der Scherschneidsimulation

Aufgrund des hohen Potentials zur Zeit- und Kostenreduzierung sowie zu gezielten Optimierungsmaßnahmen verzeichnet die Anwendung der Finite-Elemente-Simulation (FEM) seit einigen Jahren sowohl in der Forschung als auch im industriellen Umfeld ein stetiges Wachstum (Roll, 2007). Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur Lösung partieller Differentialgleichungen. Anfangs

werden im Preprozessor die am Prozess beteiligten Aktivelemente und Blechgeometrien in endliche (finite) Elemente zerlegt. Mit Hilfe geeigneter Stoffgesetze und Randbedingungen erfolgt die Überführung in ein Integralgleichungssystem, welches mit geeigneten Ansatzfunktionen numerisch gelöst wird. Im Postprozessor findet die Auswertung und Darstellung der errechneten Werte statt.

Die FEM wird derzeit beim Scherschneiden nur bedingt angewendet. Nachfolgend sind die Grenzen der FEM beim Scherschneiden erläutert. Schon bei der Abstraktion des zu untersuchenden physikalischen Prozesses treten numerische Probleme auf. Die Vernetzung der Geometrien in geeignete Elemente erfolgt beim Scherschneiden ausschließlich in Schalen- und Kontinuumselemente, welche eine eckige Form haben (Siegert, 2015, S. 170–171). Kleine Radien, wie zum Beispiel der Bereich an der Schneidkante sind daher nicht exakt abbildbar. Die Folge im Simulationsprogramm sind numerische Kontaktprobleme zwischen den Aktivelementen und dem Blechwerkstoff. Eine Verkleinerung der Elementkantenlänge kann nur im begrenzten Maße Abhilfe schaffen (Herrmann, 1991, S. 26–41). Weiterhin nachteilig bei einer kleinen Elementkantenlänge ist die lange Rechenzeit aufgrund der dann hohen Elementanzahl.

Im Allgemeinen werden die Materialkennwerte (z. B.: Fließkurve) in experimentellen Versuchen ermittelt, um hiernach als Material- oder Stoffgesetz in der Simulation Anwendung zu finden (Birkert und Haage, 2013, S. 130–138). Einige Materialkennwerte, z. B. hohe Dehnraten und Vergleichsumformgrade werden für die Simulation extrapoliert, da das Material bei der experimentellen Ermittlung frühzeitig versagt (Calmels, 2015). Diese Extrapolation basiert auf Modellen und entspricht daher nicht vollkommen der Realität. Fehler im Simulationsergebnis können auftreten (Becker, 1994, S. 23).

In der Simulation des Scherschneidprozesses erfolgt die Werkstofftrennung auf Basis eines Bruchkriteriums. Dieses gibt an, unter welcher Bedingung es zur Werkstofftrennung kommt, bzw. Elemente gelöscht werden (Effelsberg, 2012). Die Beschreibung des Bruchkriteriums hängt immer vom Werkstoff ab. Trotz einer Vielzahl von Bruchkriterien ist die genaue Abbildung des Bruchverhaltens und der -mechanismen noch nicht vollständig erforscht, da beeinflussende Parameter (z.B. die Temperaturänderung) in der Scherzone nicht berücksichtigt werden bzw. deren Messung sehr komplex ist. Durch die Grenzen der Scherschneidsimulation ist die Ergebnisqualität nur begrenzt aussagefähig (Hampli und Potiron, 2000, S. 257–265).

2.9 Problematik von gratbehafteten Schnittflächen

Verfahrensbedingt tritt beim Scherschneiden am abgeschnittenen Teil sowie am Blechstreifen Grat auf (siehe Abbildung 2-8, S. 10). Dieser ist fast immer störend (Hoogen, 1999, S. 86–94). Hauptnachteile der Gratbildung sind das Verletzungsrisiko bei der manuellen Weiterbearbeitung und die

Funktionsstörungen am Bauteil. Die geometrische Unebenheit des Bleches an der Stelle der Gratausbildung kann einen verminderten Korrosionsschutz sowie Probleme bei der Beschichtung und Lackierung zur Folge haben. In der Produktion von Blechbauteilen entsteht durch das Ablösen des Grates ein erhöhter Verschleiß des Werkzeuges (Beier, 2001, S. 30–31). Aufgrund der gravierenden Nachteile der Gratbildung muss bei qualitativ hochwertigen Bauteilen auf kostenintensive Verfahren zur Produktion gratfreier Bauteile zurückgegriffen werden. Nachfolgend werden die in der Industrie am häufigsten verwendeten Verfahren zur Produktion gratfreier Schnittflächen beschrieben und bewertet.

2.9.1 Bandschleifen

Dieses spanende Verfahren beruht auf dem Prinzip der Materialtrennung mit Schleifmittel und gebundenem Schneidkorn (Westkämper und Warnecke, 2004, S. 134–137). Zum Einsatz kommt ein Werkzeug mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Ein endloses Schleifband, meist gespannt über zwei Rollen, sorgt für den nötigen Widerstand zum Werkstück (Heitmüller, 2015, S. 20–56). Die Körnung des Schleifbandes stimmt hierbei mit der Rauigkeit des Werkstückes nach der Bearbeitung überein und ist daher entsprechend der gewünschten Werkstückoberfläche anzupassen (minimale Körnung: 125 μm). Bandschleifen ist ein abtragendes Verfahren, bei dem neben dem Werkstück auch das Schleifband hohe Kräfte erfährt und dadurch erhöhtem Verschleiß ausgesetzt ist (Derx, 2008, S. 3–9). Spezielle Körnungen (z.B.: Korund, Siliciumcarbid und Bornitrid) mit hoher Härte, Kornzähigkeit und Wärmebeständigkeit können dem erhöhten Verschleiß entgegenwirken und zu einer Standzeiterhöhung des Schleifbandes führen. Der Entgratungsvorgang erfolgt durch ein Drücken der Gratseite gegen das Schleifband bis der Grat vollständig abgeschliffen ist (Perović, 2009, S. 236–241). Dieses Verfahren zum Entgraten von Bauteilen ist weit verbreitet und eignet sich bei entsprechender Automatisierung auch für die Massenproduktion (*Entgraten, Fräsen: Mobile und stationäre Maschinen*, 2015). Vorteilhaft an diesem Verfahren sind die einfache Handhabung der Schleifmaschine, die gute Bearbeitbarkeit höchstfester Werkstoffe, die hohe Maß- und Formgenauigkeit (bis zu Toleranzklassen IT 5 und 6), Ebenheit, respektive geringer Rauheit der zu bearbeiteten Oberfläche (Osterrath, 2000, S. 125–134). Der zusätzliche Bearbeitungsschritt verbunden mit dem erhöhten Zeitaufwand für die Fertigung stellt neben den Anschaffungskosten der Bandschleifanlage, sowie Instandhaltungskosten und Lohnkosten des zusätzlichen Werkers, einen Hauptnachteil des Verfahrens dar (Franse, 1991). Nach einem Abnutzungszyklus fallen weiterhin Reinvestitionskosten an.

2.9.2 Gleitschleifen

Das Gleitschleifen, auch bekannt unter dem Namen „Trowalisieren“ ist in der DIN 8589 definiert als „Gleitspanen unter Verwendung von Schleifkörpern, deren Form, Größe und Zusammensetzung auf die zu bearbeitenden Werkstücke abgestimmt sind“ (DIN 8589, 2003, S. 17). Zwischen den Werkstücken und einer Vielzahl von losen Schleifkörpern treten unregelmäßige Relativbewegungen auf. Anhand der unterschiedlichen Entstehungsmöglichkeiten der Relativbewegungen zwischen Werkstück und Schleifmittel lässt sich eine weitere Unterteilung in Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft-, Tauch- und Resonanzgleitschleifen durchführen (Fritz, 2001, S. 334–336). Das Wirkprinzip ist bei all diesen Verfahren gleich. Zu Beginn des Prozesses erfolgt das Befüllen der Trommel mit den zu entgratenden Werkstücken und Schleifsteinen. Die Schleifsteine können unterschiedlichste Formen haben und bestehen meist aus Keramik, Kunstharz, Stahl oder Naturprodukten, abhängig vom Material und der Geometrie der Werkstücke (Prüller, 2015, S. 9–40). Zusätzlich kann die Trommel mit Compound befüllt werden, welche den Abtrag der Werkstücke aufnehmen und abtransportieren. Wie in Abbildung 2-15 ersichtlich, entsteht in Folge der rotierenden Bewegung der Trommel eine Relativbewegung zwischen den Werkstücken und den Schleifsteinen, wodurch es zu gegenseitigen Berührungen kommt. Erfolgen diese Berührungen am Ort des Grates, ist ein Abtrennen dessen die Folge. Die Schleifkraft wird bestimmt durch die Schwerkraft, die zwischen Schleifkörper und Werkstück wirkt (Hinz, 1980, S. 10–13). Mit diesem Prinzip kann der Grat bei einer Vielzahl von Werkstücken gleichzeitig abgetrennt werden.

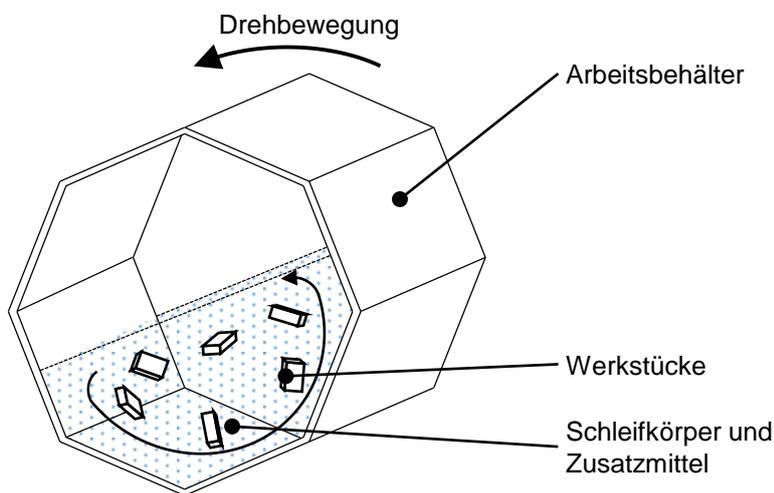


Abbildung 2-15: Prinzipskizze des Gleitschleifens

Nachteilig ist der zusätzliche Zeitaufwand durch den Trowalisierungsprozess. Investitions-, Betriebs- sowie Instandhaltungskosten sind weitere Nachteile des Prozesses. Die Befüllung der Trommel mit Werkstücken, Schleifmitteln und Compound muss präzise aufeinander abgestimmt sein. Hierzu ist eine gewisse Prozess Erfahrung nötig (Prüller, 2015, S. 169). Die diskontinuierliche

Arbeitsweise des Gleitschleifens kann die „Just-in-Time“ Vorgaben moderner Industrieunternehmen kaum erfüllen. Weiterhin nachteilig ist die gravierend schlechte Oberflächenqualität der Werkstücke. Durch die allseitige Berührung mit den Schleifsteinen steigt die Oberflächenrauigkeit des Werkstückes (Verkerk, 1976).

2.9.3 Mechanisches Entgraten

Das mechanische Entgraten beinhaltet das Schleifen, Bürsten, Fräsen, Feilen, Schaben, Hacken sowie die entsprechenden Varianten und Abwandlungen dieser Bearbeitungsverfahren (*Entgraten, Fräsen: Mobile und stationäre Maschinen*, 2015). Bei diesen Verfahren kommen meist direkt angetriebene Werkzeuge mit mehrschneidiger, geometrisch bestimmter Oberfläche zum Einsatz, welche die Abtrag- und Zerspanungsarbeit beim Entgraten übernehmen. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die manuelle Einzelfertigung. Der Grat kann hierbei nicht kostengünstig durch automatisierte Prozessschritte entfernt werden. Die manuelle Einzelfertigung bedingt ein geringes Spannungsvolumen, da die Gratentfernung im manuellen Handbetrieb einen erheblichen Zeit- und Kostenfaktor darstellt. Aus diesem Grund sind mechanische Entgratungsverfahren in der Massenfertigung nur sehr begrenzt geeignet. Robotergesteuerte, mechanische Entgratungsmaschinen haben sich als kostenintensiv erwiesen, da der Investitionsaufwand, der Anpassungsaufwand und die Ausfallzeiten erhebliche Kosten verursachen. Weiterhin ist die Reproduzierbarkeit der Bauteile schwierig, und Flitter kann durch den Entgratungsvorgang entstehen (Thilow, 2008, S. 152–180).

2.9.4 Grat verprägen

Dieses Verfahren bewirkt eine Verprägung des entstandenen Grates mit dem Ergebnis einer komplett gratfreien Schnittfläche (Dubbel, Feldhusen und Grote, 2007, S. 33–35). Hierzu wird das schergeschnittene Bauteil in der Regel mit Hilfe eines Transferschiebers auf der Gratfreiprägestufe positioniert. Anschließend fährt der Prägestempel (meist in Glockenform) auf Block, und der Grat wird auf diese Weise wieder in das Bauteil gepresst (Marti, 2013). Zum Einsatz kommt dieses Verfahren bisher fast nur beim Feinschneiden. Nachteilig sind die Transfereinheit und die zusätzliche Werkzeugstufe, welche beide sehr kostenintensiv sind. Weiterhin müssen die Prozessparameter (Positionierung und Prägestempel) optimal aufeinander abgestimmt sein, da ansonsten der Grat nicht in der gewollten Form ins Werkzeug zurückgepresst wird. Durch das Verprägen des Grates ist der Verschleiß an den Aktivelementen sehr groß (Grimm, 2014).

2.9.5 Konterschneiden

Im Gegensatz zu den genannten Verfahren der nachträglichen Gratentfernung ist das Konterschneiden das einzige Verfahren mit dem Schnittflächen ohne Ausbildung von Grat direkt produziert werden können. Das Konterschneiden ist ein mehrmaliges Scherschneiden, wobei mindestens eine Umkehr der Schneidrichtung erfolgen muss (Abbildung 2-16). Im ersten Prozessschritt dieses Verfahrens wird das Blech angeschnitten. Im zweiten Prozessschritt erfolgt in umgekehrter Schneidrichtung die Werkstofftrennung in Form des Durchschneidens. Optional kann zwischen diesen beiden Prozessschritten ein Gegenschneiden erfolgen (Liebing, 1979, S. 20–24). Bei richtiger Einstellung der Prozessparameter sind sowohl das ausgeschnittene Teil, als auch das Schnittteil gratfrei. Die gesamte Schneidkraft des Prozesses ist in Summe aber höher als beim konventionellen Scherschneid (Liewald, 2010, S. 3).

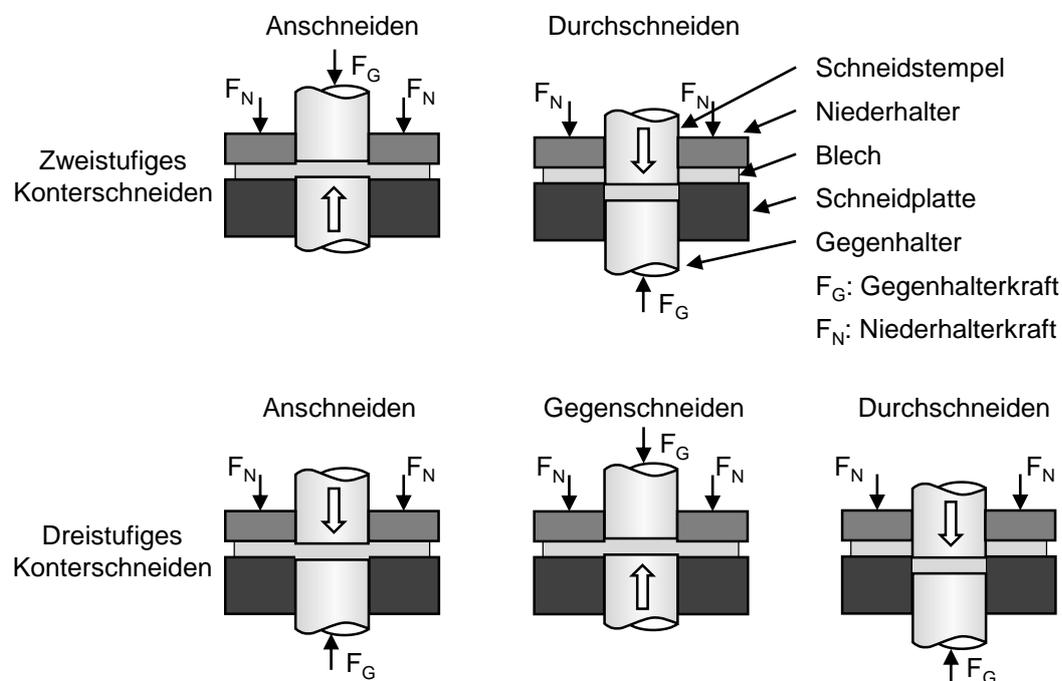


Abbildung 2-16: Prinzipaufbau des zwei- und dreistufigen Konterschneidens

Der Kosteneinsparung durch das Wegfallen des Produktionsschrittes „Entgraten“ stehen erhöhte Kosten für die Presse entgegen, da diese dreifachwirkend sein muss (Kraftwirkung für Anschneiden, Durchschneiden und Niederhalter). Auch Ansätze durch komplizierte Werkzeugtechnik auf die dreifachwirkende Presse zu verzichten, schlagen sich in erhöhten Werkzeugkosten durch die kostenintensiven Einsätze nieder und können somit die hohen Kosten des Verfahrens nicht ausreichend kompensieren. Weiterhin besteht die erhöhte Gefahr der Flitterbildung.

2.9.6 Entgratungsverfahren mit bedingten Anwendungsmöglichkeiten

Neben den genannten Entgratungsverfahren gibt es noch folgende Verfahren: Thermisches Entgraten, elektrochemisches Entgraten, Hochdruckwasserstrahlentgraten, Druckfließen und

hydroerosives Schleifen (Thilow, 2008, S. 91–119). Das Anwendungsgebiet dieser Verfahren ist sehr gering. Aufgrund der Tatsache, dass diese Sonderverfahren nur für bestimmte Bauteile angewendet werden können und somit in der Produktion keine große Rolle spielen, erfolgt keine weitere Erklärung dieser Sonderverfahren in der vorliegenden Forschungsarbeit.

2.10 Zusammenfassende Beurteilung angewendeter Verfahren

Die Literaturzusammenstellung (siehe Kap. 2.9, S. 21-25) zu den Entgratungsverfahren Bandschleifen, Gleitschleifen, Mechanisches Entgraten, Grat verprägen und dem Konterschneiden zeigt die Unterschiede, sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren. Anhand der Tabelle 2-1 erfolgt ein abschließendes Resümee der einzelnen Verfahren untereinander. Diese Tabelle zeigt die ausgewählten Entgratungsverfahren sowie das Konterschneiden in Abhängigkeit produktionsrelevanter Eigenschaften. Der industrielle Einsatz dieser Verfahren ist zwar vorhanden, aber teilweise mit gravierenden Zusatzkosten und einem hohen zusätzlichen Zeitaufwand verbunden. Weiterhin ist beim Band- und Gleitschleifen eine verschlechterte Oberflächenqualität auffällig, da die Schleifwerkzeuge die glatte Oberfläche zerstören bzw. aufrauen.

Tabelle 2-1: *Beurteilung ausgewählter Verfahren zur Produktion gratfreier Schnittflächen*

	Bandschleifen	Gleitschleifen	Mechanisches Entgraten	Grat verprägen	Konterschneiden
Zusätzlicher Produktionsschritt	ja	ja	ja	ja	nein
Zusätzliche Kosten	hoch	hoch	gering	hoch	sehr hoch
Zusätzlicher Zeitaufwand	hoch	hoch	gering	gering	gering
Oberflächenqualität	Verschlechterung	Verschlechterung	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung
Kontinuierlicher Prozess	ja	nein	ja	ja	ja
Reproduzierbarkeit	gut	gut	schlecht	bedingt	gut
Einsatz in der Massenproduktion	bedingt	ja	nein	ja	nein

Abschließend lässt sich an der Tabelle 2-1 deutlich erkennen, dass die Produktion gratfreier Schnittflächen ausschließlich mit einem weitreichenden Qualitätsverlust, hohen Zusatzkosten

bzw. einem großen Zeitaufwand zu erreichen ist. Trotz dieser gravierenden Nachteile finden die genannten Verfahren ein breites Anwendungsfeld. Grund hierfür ist die fehlende Alternative eines Entgratungsverfahrens ohne Qualitätseinbußen in Zeit, Bauteil oder finanzieller Hinsicht. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird eine neue Verfahrensidee erstmals wissenschaftlich untersucht, mit der gratfreie Bauteile gefertigt werden, ohne dass diese immensen Nachteile der beschriebenen aktuellen Verfahren auftreten.

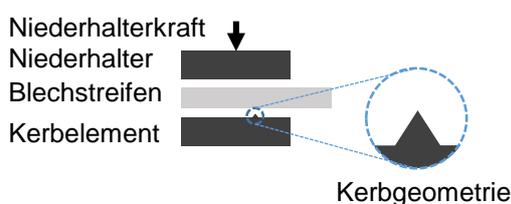
2.11 Neue Verfahrensidee zum gratlosen Schneiden

Das neue Verfahren ist ein spanloses Trennverfahren, bei dem durch eine Kombination eines Prägeprozesses mit einem Schneidprozess eine frühzeitige Werkstofftrennung erfolgen soll. Durch Einbringung geometrisch bestimmter Formänderung in den Werkstoff soll als Resultat eine absolut gratfreie Schnittfläche entstehen. Aufgrund der beiden Verfahrensschritte „Prägen“ und „Scherschneiden“ wird das neue Verfahren in der vorliegenden Forschungsarbeit als Präge-Scherschneiden definiert.

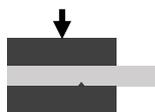
Abbildung 2-17 zeigt den Ablauf des Präge-Scherschneidens. Im ersten Schritt erfolgt die Einprägung einer Kerbe, im zweiten Schritt findet die eigentliche Werkstofftrennung in Folge des Scherschneidprozesses statt.

1. Prägevorgang

a) Ausgangszustand

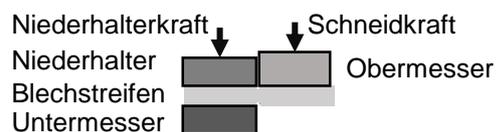


b) Prägeprozess



2. Scherschneiden

a) Ausgangszustand



b) Schneidprozess

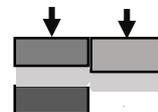


Abbildung 2-17: neues Verfahren zum gratlosen Schneiden

Im ersten Prozessschritt (Prägestufe) dringt ähnlich dem Beißschneiden eine keilförmige Schneide ins Blech. Das Einpressen des Keils führt zu einer plastischen Formänderung im Blechwerkstoff. Eine Gefügestreckung und -stauchung im Bereich der Kerbe ist die Folge. Diese plastische Formänderung führt zu einer Kaltverfestigung im Werkstoff. Hierbei muss die Höhe des Keils so gewählt werden, dass noch keine Werkstofftrennung auftritt. Weiterhin erfolgt die Kerbeinprägung bei diesem Verfahren an der Stelle potenzieller Gratbildung beim Scherschneiden (an der

Unterseite des Bleches). Der geometrische Einschnitt ins Blech hat, neben der Ausnutzung der Kerbwirkung und der Aufhärtung in der Prägezone, das Ziel, durch die Verdrängung des Blechwerkstoffes aufgrund der Kerbeinprägung das Formänderungsvermögen zu erschöpfen.

Im folgenden Schneidvorgang wird anfangs das Blech durch den Niederhalter geklemmt. Anschließend erfolgt die komplette Werkstofftrennung im Schneidprozess. Durch den ersten Prozessschritt werden eine frühe Rissbildung und ein frühzeitiger Werkstoffbruch begünstigt. Weiterhin findet in der Theorie keine Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius statt, wodurch die Gratbildung unterdrückt wird. Bei optimaler Einstellung der Parameter soll die Werkstofftrennung vor dem Einformen des Blechwerkstoffes in die Matrizenplatte erfolgen (siehe Kap. 2.2, S. 5-10), wodurch der Schritt der Trennphase „Ausformung des Grates“ ansatzlos entfällt und eine absolut gratfreie, spanlose Schnittfläche mit annähernd senkrechter Bruchfläche entsteht (Volk, 2013).

2.12 Forschungsbedarf

Die Praxis erreicht das gratlose Bauteil durch aufwendige Nachbearbeitungen (siehe Tabelle 2.1, S. 26). Diese sind kosten- und zeitintensiv, mit der Folge einer sinkenden Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktionsprozesses. Die Gratbeseitigung beträgt im Maschinenbau 20 bis 40%, im Form- und Gießprozess 15 bis 30% und in Eisen-, Stahl- und Tempergießereien rund 30% des Gesamtaufwandes (Beier, 2001, S. 15–17). Die Anforderungen hoher Schnittflächenqualitäten lassen nach derzeitigen Erkenntnissen keine Rationalisierung dieser Nachbearbeitungsstufen zu (siehe Tabelle 2-1, S. 26), da die mögliche Alternative des Präge-Scherschneidens lediglich ansatzweise bekannt und die Verfahrenreife noch nicht erreicht worden ist.

Das Präge-Scherschneiden (siehe Abbildung 2-17, S. 27) stellt ein bisher theoretisches Verfahren dar, bei dem durch geometrische Vorverformung gratfreie Bauteile ohne hohen Kosten- und Zeitaufwand produziert werden können. In der Praxis findet das Präge-Scherschneiden bisher keine Anwendung. Grund hierfür ist neben dem fehlenden empirischen Wissen für Prozessstabilität, -genauigkeit und -sicherheit, die absolute Unkenntnis des Einflusses der geometrischen Vorverformung (Kerbe) auf den Schneidprozess.

Da die Notwendigkeit gratfreier Schnittflächen für die Praxis von erheblicher Relevanz ist, kann das Präge-Scherschneiden eine wirtschaftliche Alternative zu den genannten Nachbearbeitungsverfahren sein. Hinsichtlich der fehlenden Kenntnis des Einflusses der geometrischen Vorverformung auf das Scherschneidergebnis und die mögliche Gratfreiheit von Bauteilen, besteht der dringende Bedarf von Forschungsaktivitäten. Weiterhin ist die Prozessstabilität des Präge-Scherschneidens eine Grundvoraussetzung zur Verfahrensrealisierung und wird daher in der vorliegenden Forschungsarbeit erstmalig wissenschaftlich untersucht.

3 Aufgabenbereiche, Zielsetzung und Lösungsweg

Die bisher veröffentlichten Arbeiten über den Prozess des Scherschneidens implizieren bei hoch qualitativen Schnittflächen den Entgratungsprozess als eine Notwendigkeit (Lange, 1993, S. 163) (siehe Kap. 2.9, S. 21). Diese Arbeit soll von einem neuen Ansatz ausgehen: Durch Unterbindung der Gratausformung beim Scherschneiden entfällt der gesamte Entgratungsprozess.

3.1 Zieldeterminierte Aufgabenbereiche mit adäquatem Lösungsweg

Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb, das Prozessfenster für das Präge-Scherschneiden wissenschaftlich zu untersuchen. Hierfür ist eine eingehende Analyse zum Einfluss der Kerbgeometrie und -position auf das Schneidergebnis notwendig. Der Einfluss der geometrischen Vorverformung auf den Scherschneidprozess determiniert sich in folgenden Parametern (zu untersuchen an unterschiedlichen Blechwerkstoffen):

- Kerbposition
- Kerbverrundung
- Kerbtiefe
- Schneidspalt
- Präge- und Schneidvorgang einstufig
- Kerbwinkel
- Blechdicke
- Festigkeit des Blechwerkstoffes
- Aktivelementverschleiß und Schnittflächenausprägung bei fortschreitender Hubzahl

Die ausgewählten Parameter führen zu folgenden Aufgabenbereichen für das Präge-Scherschneiden:

- Entwicklung eines geeigneten Werkzeugkonzeptes zur Durchführung der Schneidversuche
- Durchführung von Schneidversuchen mit offener Schnittlinie (Abschneiden) sowie geschlossener Schnittlinie (Lochen) unter Variation der einzelnen Parameter
- Untersuchung der Prozessstabilität, -genauigkeit und -sicherheit mit Hilfe von Dauerhubuntersuchungen
- Verschleißuntersuchungen der Schneidaktivelemente sowie der Kerbgeometrie mit Hilfe von Dauerhubuntersuchungen

Eine schematische Darstellung der Aufgabenbereiche zeigt Abbildung 3-1.

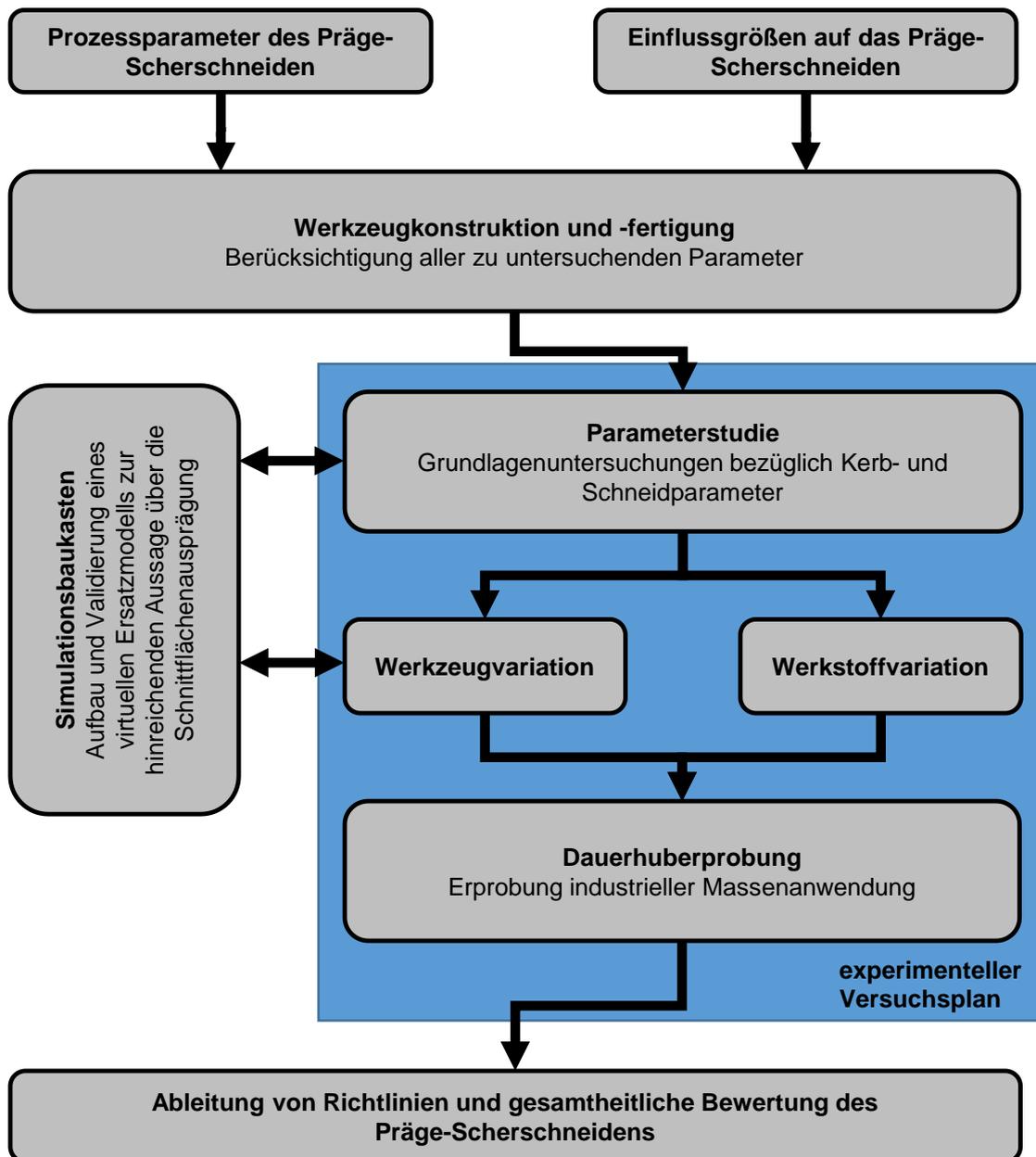


Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf des Lösungsweges zur ganzheitlichen Betrachtung des Präge-Scherschneidens

Aus Abbildung 3-1 wird die differenzierte Abhängigkeit der Einflussgrößen und Prozessparameter auf das Präge-Scherschneiden ersichtlich. Die Konstruktion und Fertigung des Versuchswerkzeuges erfolgen auf Grundlage der identifizierten Einflussgrößen und Prozessparameter. Mit dem gefertigten Werkzeug muss die Möglichkeit gegeben sein, alle Versuche des experimentellen Versuchsplanes durchzuführen. Hierzu gehören die grundlegenden Untersuchungen in Form einer Parameterstudie, die Werkzeugvariationen, die Werkstoffvariationen sowie die Erprobung des Verfahrens auf industrielle Maßstäbe (Dauerhubversuche). Durch Verwendung des virtuellen Ersatzmodells (Simulationsbaukasten) kann die Anzahl der experimentellen Versuche sinnvoll auf ein

nötiges Minimum reduziert werden. Mit diesem Lösungsweg erfolgt eine gesamtheitliche Betrachtung des Präge-Scherschneidens. Die Ergebnisse sollen einerseits Aussagen und Richtlinien für Werkzeugbauer und Anwender darlegen, andererseits die Umsetzung und das Potential des Präge-Scherschneidens für die industrielle Massenfertigung aufzeigen. Auf diese Weise werden die prozessbedingten Nachteile konventioneller Arten des Entgratens umgangen und gleichzeitig durch das Präge-Scherschneiden substituiert. Eine erhöhte Wirtschaftlichkeit in der Prozesskette ist die Folge (siehe Kap. 2.10, S. 26).

3.2 Struktur und Organisation der Forschungsarbeit

Um das Präge-Scherschneiden als ganzheitlichen Prozess zu erforschen, ist ein schematisch gerichteter Lösungsweg (siehe Abbildung 3-1, S. 30) getragen durch eine Struktur und Organisation der vorliegenden Forschungsarbeit von entscheidender Bedeutung. Die gesamtheitliche Analyse des Präge-Scherschneidens fordert von den einzelnen Kapiteln eine aufeinander aufbauende Darlegung des Forschungsvorhabens.

Um die Hypothese der gratfreien Schnittflächenausprägung (siehe Kap. 2.11, S. 27) zu verifizieren, müssen die verwendeten Versuchsanlagen (Kap. 4.1, S. 33-35) und die dazugehörigen Messeinrichtungen (Kap. 4.2, S. 35-37) beschrieben werden, da nur mit Hilfe der Kenntnis dieser verwendeten Maschinen und Geräte die Forschungsergebnisse zielbringend gedeutet und sinnvoll begründet werden können. Mit den erklärten Messeinrichtungen in Kapitel 4.2 erfolgt im Kapitel 5 die Darstellung der gemessenen Werkstoffkennwerte für die verwendeten Blech- und Werkzeugwerkstoffe, um von einer präzise beschriebenen Ausgangssituation die Erforschung des Präge-Scherschneidens zu realisieren. Damit sind die relevanten mechanischen Eigenschaften der Blech- und Werkzeugwerkstoffe näher präzisiert. Mögliche Chargenschwankungen werden dadurch frühzeitig detektiert. Die Komplexität des Forschungsprojektes wird im Anforderungspotential zu Beginn des Kapitels 6 (S. 46-53) deutlich. Mit dem Versuchswerkzeug müssen die in Kapitel 6.1 (S. 46) genannten Anforderungen zur ganzheitlichen Untersuchung des Präge-Scherschneidens im Rahmen determinierter Versuche umgesetzt werden. Neben der Beschreibung der Werkzeugkonstruktion (Kap. 6.2-6.3, S. 46-53) erfolgen in diesem Kapitel auch die Darlegung zur Umsetzung aller Präge- und Schneidoperationen, sowie die Feineinstellung zur wiederholgenauen Einprägung der Kerbe (Kap 6.3, S. 52).

Erst nach dieser Beschreibung aller versuchsrelevanten Anlagen (Kap. 4.1, S. 33-35), Messeinrichtungen (Kap. 4.2, S. 35-35), Versuchswerkstoffe (Kap. 5, S. 38-45) und dem Versuchswerkzeug (Kap. 6, S. 46-53) kann in Kapitel 7 (S. 54-68) die Beschreibung des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten untereinander in Form des Versuchsplanes erfolgen. Mit den in Kapitel 7.1 (S. 54-58) aufgeführten Rahmenbedingungen erfolgt die Umsetzung des Versuchsplanes (Kap.

7.2, S. 58-62). Neben den experimentellen Untersuchungen aus dem Versuchsplan in Kapitel 7.2 (S. 58-62) sind die virtuellen Versuche in Form von Simulationsprogramm und -modell in Kapitel 7.3 (S. 62-67) an dieser Stelle der Forschungsarbeit sinnvoll. Die Methoden der Auswertungen werden in Kapitel 7.4 und 7.5 erklärt (S. 67-68).

Nach der Versuchsbeschreibung und -durchführung (Kap. 7, S. 54-68) erfolgt die Darstellung der Versuchsergebnisse und Diskussion in Kapitel 8 (S. 69-119). Zuerst sollen grundlegende Fragen und Ergebnisse festgehalten werden - die gratfreie Schnittflächenausprägungen in Abhängigkeit der Positionierung der Kerbe (Kap. 8.1, S. 69-86) - bevor die Einflussparameter und deren Grenzen auf den neuen Schneidprozess (Kap. 8.2-8.3, S. 86-94), sowie mögliche Werkstoff- und Werkzeugvariationen herausgearbeitet werden (Kap. 8.4-8.7, S. 95-107). Abgerundet werden die Ergebnisse durch Dauerhubuntersuchungen in Kapitel 8.8 (S. 107-119), um die Relevanz des Prägescherschneidens für den industriellen Maßstab bewerten zu können.

Die denkbare Bestätigung der Hypothese der gratfreien Schnittflächenausprägung wird übertragen durch Dauerhubuntersuchungen in Kap. 8.8 (S. 107), um Anwendungsempfehlungen für industrielle Produktionsprozesse zu geben. Die Relevanz des neuen Verfahrens für die industrielle Massenproduktion soll hierbei sichergestellt werden. Eine kurze Zusammenfassung sowie ein Ausblick der Ergebnisse erfolgen in Kapitel 9 (S. 120-123).

4 Versuchsanlagen und Messeinrichtungen

4.1 Versuchsanlagen

4.1.1 Schnellläuferpresse

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Präge-Scherschneiden erfolgt auf einer mechanischen Hochleistungspressen vom Typ BSTA 510-125, Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: BSTA 510-125 (Bruderer AG, 2015)

Die Konstruktion der Bruderer Presse wird allgemein gekennzeichnet durch ein Hebelsystem zur Verstellung der Stanzkraft. Das mehrreihige Zylinderrollenlager ermöglicht geringste Toleranzen gerade im Bereich Blechlaufebene. Der Massenausgleich erfolgt mit automatischer Anpassung an die Hubverstellung. Die kurze torsionssteife Hauptwelle, der Schmierölkreis mit großem Volumen, der kurze Stopp- und Beschleunigungswinkel sowie das Bruderer Federdämpfersystem kennzeichnen weitere Hauptmerkmale dieser Pressenart. Durch die präzise geschliffene Trapezspindel ist eine Stößelverstellung im Mikrobereich mit geringsten Toleranzen möglich. Die reduzierte Stößelgeschwindigkeit im unteren Totpunkt der Presse ermöglicht realitätsnahe Anschnittgeschwindigkeiten hydraulischer Pressen. Für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit eignet sich diese Presse sowohl im Einzelhub als auch im Dauerhub. Wichtige technische Daten können der folgenden Tabelle entnommen werden (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Technische Daten der Schnellläuferpresse BSTA 510-125 (Bruderer AG, 2015)

Kenngröße	Wert	Einheit
Nennkraft	510	kN
Hubhöhe	16, 19, 25, 32, 38, 44, 51	mm
Hubfrequenz	100 bis 1050	Hübe / min
Stößelverstellung	51	mm
Aufspannplatte	1240 x 650	mm ²
Stößelfläche	1150 x 420	mm ²
Werkzeugeinbauhöhe	256 bis 344	mm

4.1.2 Vorschubeinrichtung

Zum definierten Bandvorschub wird an der Blecheingangsseite der Servovorschub BSV 75T, Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz verwendet (Bruderer AG, 2015). Der Antrieb der Vollwalzen erfolgt durch einen Servomotor. Das Massenträgheitsmoment der Walzen ist abgestimmt auf den Walzantrieb, um ein Vorschieben mit unterschiedlichen Vorschublängen zu ermöglichen. Der Servovorschub ist winkelsynchron zum Pressenhub in der Pressensteuerung integriert. Druckfedern mit pneumatischer Walzenanpassung realisieren die Vorschubbewegung und blockieren das Band während der gewünschten Winkelphase. Wichtige technische Daten können der folgenden Tabelle entnommen werden (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Technische Daten des BSV 75T

Kenngröße	Wert	Einheit
Vorschublänge	0 bis 1000	mm
Maximale Bandbreite	75	mm
Maximale Banddicke	2	mm
Walzenanpressdruck	1000	N
Maximale Hubzahl	2000	min ⁻¹
Zwischenlüftwinkel	variabel	°

4.1.3 Haspel und Richtautomat

Zum Abhaspeln sowie Richten des Bandmaterials wird eine doppelseitige Haspel des Typs 18260-100.2 vom Hersteller Hommel mit entsprechender Richtmaschine verwendet. Die Richtmaschine besteht aus einem System von oberen und unteren Rollen, wodurch das Blech läuft und in zwei Richtungen gebogen wird, um ein möglichst ebenes Blech zu formen. Durch einen Tastarm an der Haspel wird die nötige, konstante Vorschubgeschwindigkeit der Haspel kontrolliert und der diskontinuierlichen Vorschubgeschwindigkeit der Presse angepasst.

4.2 Messeinrichtungen

4.2.1 Zugdruckprüfmaschine

Die Messung der mechanischen Werkstoffkennwerte erfolgt durch Zugversuche mit der Universalprüfmaschine vom Typ 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH, Ulm. Durch die zwei separaten Prüfräume der Anlage können sowohl Zug- als auch Druckversuche gleichzeitig durchgeführt werden. Die Kraftsensorik der Maschine ermöglicht die Messung von Zug- und Druckkräften von maximal bis zu 200 kN. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit der Software testExpert der Firma Zwick. Neben der Kraft, können Weg und Geschwindigkeit während eines Versuches gemessen werden. Durch die Zertifizierung der Anlage nach DIN EN ISO 7500-1 entspricht die Anlage den Genauigkeitsanforderungen der Klasse 1 (Zwick GmbH & Co. KG, 1988).

4.2.2 3D-Koordinatenmessgerät

Das Überprüfen der Bauteiltoleranzen sowie die Messung der Ebenheit durch die Kerbeinprägung erfolgt mit dem Koordinatenmessgerät LH87 Standard der Firma Wenzel Präzision GmbH, Wiesthal. Mit Servoantrieben lassen sich die drei Achsen des Tastkopfes steuern, welcher über einen Messtisch (800 x 1000 x 700 mm) fährt. Die Genauigkeit des Messsystems ist mit $(1,5 + L/450)$ µm angegeben. Durch die Raumtemperierung der Messzelle ist eine hohe Präzision der Messergebnisse gegeben. Mit Hilfe der Software Metrosoft Metrology erfolgt die Auswertung und grafische Darstellung der gemessenen Werte (Wenzel GmbH, 2012).

4.2.3 Mikroskopie

Die Untersuchung der metallografischen Gefüge (Schliffbilder) erfolgt mit dem Auflichtmikroskop Axioplan 2 der Firma Carl Zeiss Microlmaging GmbH, Göttingen. Dieses Mikroskop kann Vergrößerungen von 25- bis 2500-fach darstellen und verfügt über einen Differentialkontrast. Die Mikroskopie-Kamera AxioCam MRc5 ermöglicht eine maximal hohe Auflösung von 2584 x 1936 Pixel (Carl Zeiss Mikroskopie GmbH, 2006).

Schnittflächen und Verschleiß werden mit dem Digitalmikroskop VHX 2000 der Firma Keyence Corporation, Osaka visualisiert. Das Objektivmodell VH-Z20R kann eine Vergrößerung von 20- bis 200-fach erreichen. Die automatische Verfahrung des Tisches in X- und Y-Richtung kombiniert mit der Stiching-Funktion (Bildzusammensetzung) erzeugen großflächige 3D-Bilder (Keyence Deutschland GmbH, 2012).

4.2.4 Funkenemissionsspektrometer

Die Messung der chemischen Zusammensetzung der Blechwerkstoffe erfolgt quantitativ mit dem Emissionsspektrometer Foundry-Master der Firma WAS AG, Uedem. Diese quantitative Messung basiert auf einer elementspezifischen elektromagnetischen Strahlung, die optisch gemessen wird. Elemente des Probenmaterials werden angeregt und verdampfen. Das hierbei erzeugte Spektrum kann den Elementen des Periodensystems zugeordnet werden. Dadurch wird die Zusammensetzung eines Werkstoffes einwandfrei ermittelt (Worldwide Analytical Systems AG, 2009) (Kiauka und Angona, 2015).

4.2.5 Profilmesseinrichtung

Beim Scherschneiden entstehen verfahrensbedingt unterschiedliche Schnittflächenausprägungen, die in der VDI Richtlinie 2906 (siehe Abbildung 2-10, S. 13) näher erläutert werden. Zur Bestimmung des Einflusses von Schneidparametern ist die Messung der in der VDI Richtlinie erläuterten Kennwerte von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund werden die Schneidkanten mit dem Konturmessgerät MarSurf XCR 20 der Firma Mahr GmbH, Göttingen vermessen. Der Messaufbau ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

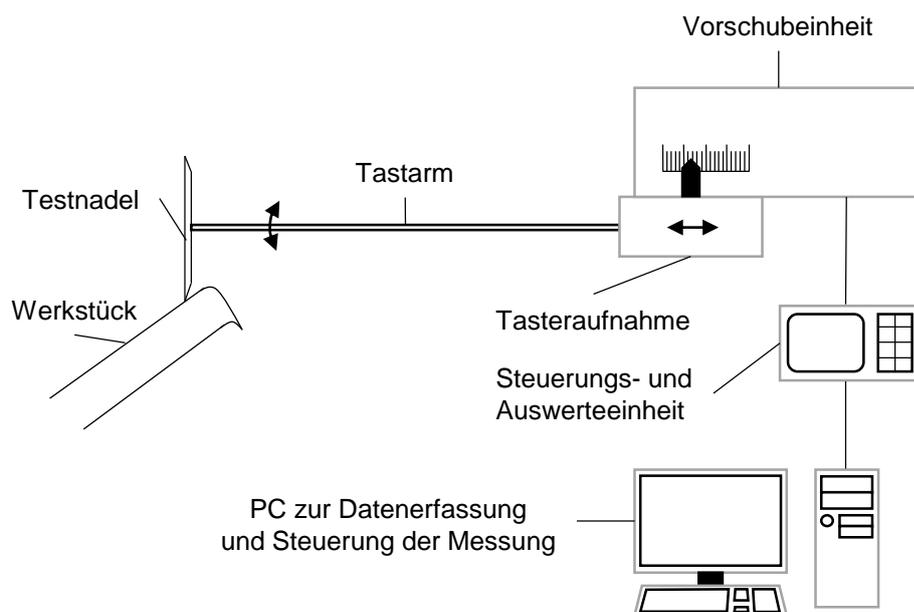


Abbildung 4-2: Aufbau zur Vermessung der Schnittflächen

Die Messung erfolgt nach dem Tastschnittverfahren mit unterschiedlichen Tastspitzen. Die Vorschubeinheit PCV 200 garantiert die gewünschte Bewegung der Tastnadel über das Messobjekt. Die Steuerungs- und Auswerteeinheit erfasst und verarbeitet die gemessenen Werte. Die Ausgabe der optisch gemessenen Geometrie wird am PC mit der Software MarWin XC 20 errechnet. Durch eine Messunsicherheit von $(2+L/50)$ μm können Messfehler auf ein für diese Forschungsarbeit hinreichendes Minimum reduziert werden. Die Auflösung der Geometrie erfolgt in X-Richtung mit 1 μm , in Z-Richtung mit 0,38 μm Genauigkeit (Mahr GmbH, 2007).

5 Versuchswerkstoffe

5.1 Blechwerkstoffe

Aufgrund der hohen Bedeutung des neuen Verfahrens im industriellen Umfeld ist es zwingend notwendig, die Praxistauglichkeit des Präge-Scherschneidens bei herkömmlichen Werkstoffen zu untersuchen. Für die Untersuchungen sind die vier Werkstoffgruppen Tiefziehstahl, Edelstahl, Aluminium- und Kupferlegierungen vorgesehen, da diese in ihrem Anwendungsbereich oftmals eine unzureichende Schnittflächenausprägung mit ausgeprägter Schnittgrathöhe aufzeigen. Im Nachfolgenden werden diese Materialien charakterisiert, gefolgt von einer tabellarischen Zusammenfassung ihrer mechanischen Eigenschaften.

5.1.1 Tiefziehstahl

Als Stahlwerkstoff kommt der Werkstoff DC04 (Werkstoffnummer: 1.0338) zum Einsatz. Aufgrund seiner guten Kaltumformeigenschaften bzw. Tiefzieheigenschaften ist dieser unlegierte Qualitätsstahl in der Industrie weit verbreitet und hat sich gut bewährt (ThyssenKrupp Steel Europe, 2014) (Salzgitter Flachstahl GmbH, 2014). Die chemische Zusammensetzung dieses kaltgewalzten Feibleches kann der folgenden Tabelle (Tabelle 5-1) entnommen werden (in Massenprozent).

Tabelle 5-1: Werkstoffzusammensetzung DC04

Werkstoff		Anteil der Legierungselemente in [%]			
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Mn	P	S
DC04	1.0338	0,048	0,198	0,021	0,012

Die Messung der mechanischen Kennwerte erfolgt mit Hilfe des Zugversuches. Hierfür werden 12 Zugversuche durchgeführt und der Mittelwert errechnet. Das hierdurch ermittelte Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann der Abbildung 5-1 entnommen werden.

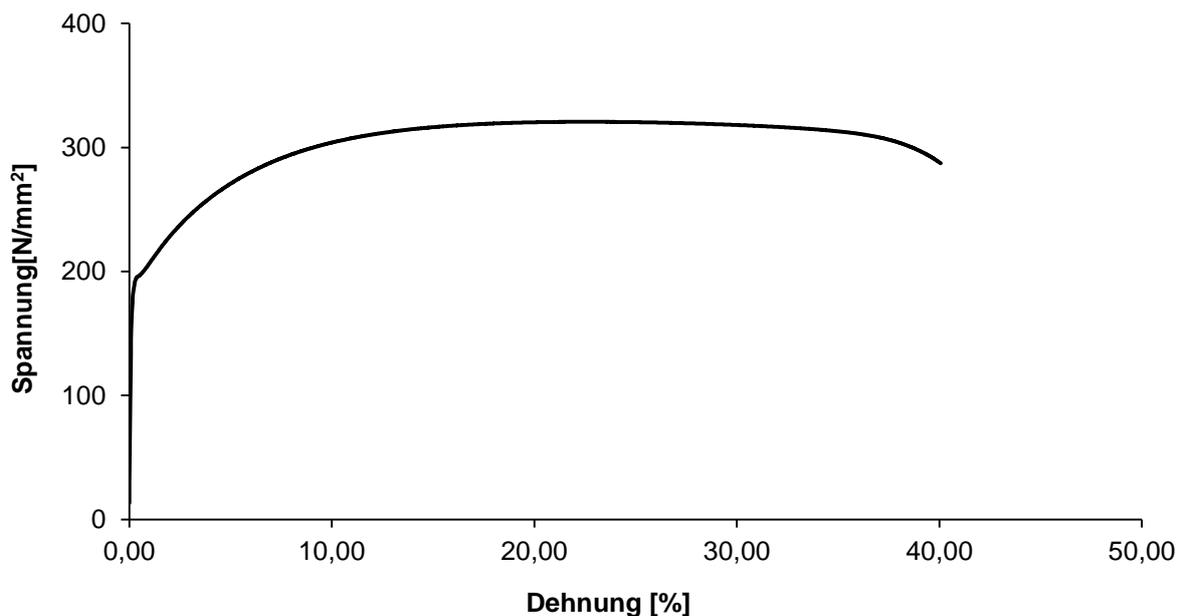


Abbildung 5-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff DC04

5.1.2 Edelstahlwerkstoff

Bei den Versuchen kommt der Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer: 1.4301) zum Einsatz. Dieser austenitische Edelstahl ist aufgrund seiner Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion mit einem Produktionsanteil von 33% der gesamten Edelstahlproduktion der am weitesten verbreitete Edelstahl (DIN 10263-5, 2014). Gerade in der Nahrungsmittelherstellung und -verarbeitung, sowie in der Lagerung und dem Transport von Lebensmitteln wird diese Edelstahlsorte häufig eingesetzt (Deutsche Edelstahlwerke, 2008). Eine definierte, gratfreie Schnittfläche ist daher fast immer gefordert. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes kann der Tabelle 5-2 entnommen werden (in Massenprozent).

Tabelle 5-2: Werkstoffzusammensetzung 1.4301

Werkstoff		Anteil der Legierungselemente in [%]							
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
X5CrNi18-10	1.4301	0,05	0,42	1,4	0,03	0,001	18	8	0

Das Ergebnis der mechanischen Zugprüfung verdeutlicht die folgende Abbildung. Die Methodik der Zugprüfung erfolgt nach den gleichen Kriterien wie beim Tiefziehstahl DC04 (siehe Kap. 5.1.1, S. 38).

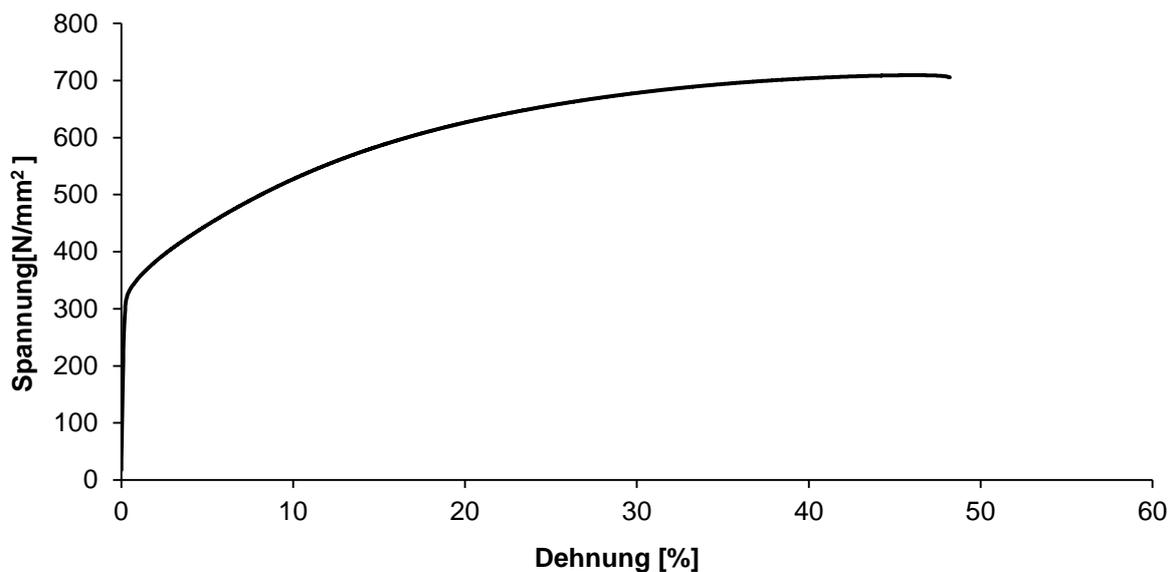


Abbildung 5-2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff 1.4301

5.1.3 Aluminiumwerkstoff

Aufgrund seiner geringen Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ ist den Aluminiumwerkstoffen in den letzten Jahren eine erhöhte Bedeutung als Konstruktionsbauteile in der Automobilproduktion zugekommen (Mücklich, 2008). Gerade im Bereich Leichtbau wird oftmals versucht Stahl (Dichte $7,8 \text{ g/cm}^3$) durch Aluminium zu substituieren (Lao, 2013). Die Anforderungen an mechanische Beanspruchungen (z.B. Festigkeit) können durch die Wahl einer geeigneten Aluminiumlegierung erreicht werden (Ostermann, 2007). In der vorliegenden Forschungsarbeit wird die Aluminiumlegierung AC170 PX (Werkstoffnummer: AA 6014) bezüglich des Präge-Scherschneidpotenzials näher untersucht. In der Automobilindustrie ist diese Legierung für Außenhautbauteile weit verbreitet, so wird z. B. die Motorhaube bei namhaften Automobilherstellern aus diesem Material gefertigt (Bloeck, 2001). Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Legierung ist in Tabelle 5-3 dargestellt (in Massenprozent).

Tabelle 5-3: Werkstoffzusammensetzung AA 6014

Werkstoff		Anteil der Legierungselemente in [%]							
Kurzname	Werkstoffnummer	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ti	V	Zn
AC170 PX	AA 6014	0,2	0,25	0,34	0,62	0,08	0,08	0,18	0,1

Das Ergebnis der mechanischen Zugprüfung wird in der folgenden Abbildung aufgezeigt (Abbildung 5-3). Die Methodik der Zugprüfung erfolgt nach den gleichen Kriterien wie beim Werkstoff DC04 (siehe Kap. 5.1.1, S. 38).

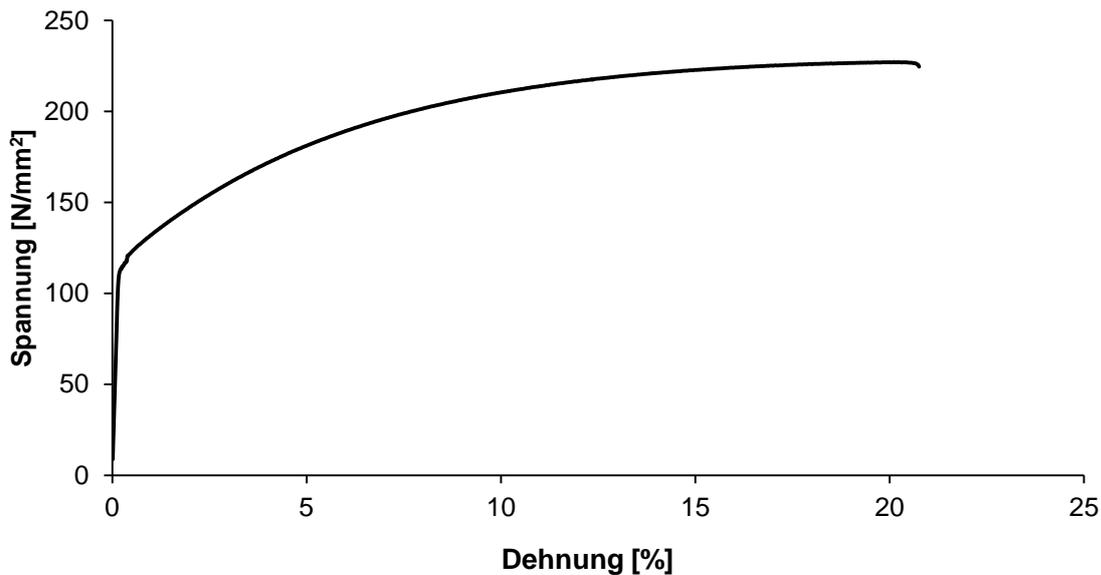


Abbildung 5-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff AA 6014

5.1.4 Kupferwerkstoffe

Die Fokussierung der Arbeit auf Gratfreiheit ist für eine Vielzahl von Kupferlegierungen von besonderer Bedeutung. Deshalb werden die drei in der Anwendung weit verbreiteten Legierungen CuSn6, Cu-ETP (ehemals E-Cu) und CuZn37 genauer untersucht. Die Legierung CuSn6 wird verwendet für Kontakte, Steckverbindungen stromführende Federn und Klemmanschlüsse im Radio-, TV- und Videobereich (DKI - CuSn6, 2015). Cu-ETP wird gebraucht bei hohen Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit: Wicklungen für elektrische Maschinen, Kabel, Leitungen, Schaltstromkreise für elektrische Bahnen, Sammelschienen und Kollektorlamellen (DKI - CuETP, 2015). CuZn37 findet Anwendung bei Türkontaktschaltern, Relais, Steckdosen, Schutzkontaktbügeln, Lampenfassungen und Metalleisenbahnschienen (DKI - CuZn37, 2015). Die in den drei genannten Kupferlegierungen aufgeführten Beispiele müssen Gratfreiheit aufweisen, da es ansonsten zu nicht intendierten Kurzschlüssen kommen kann. Alle drei Legierungen besitzen eine gute Korrosionsbeständigkeit und zeichnen sich durch eine günstige Kombination von Kaltumformbarkeit, Festigkeit und Härte aus, was die weite Verbreitung mit unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten erklärt. Die chemische Zusammensetzung der drei Legierungen kann aus der folgenden Tabelle entnommen werden (in Massenprozent).

Tabelle 5-4: Werkstoffzusammensetzung CuSn6, Cu-ETP und CuZn37

Werkstoff		Chemische Zusammensetzung in [%]									
Kurzname	Werkstoffnummer	Cu	Sn	P	Ni	Zn	Fe	Pb	Al	O	Bi
CuSn6	CW452K	93,03	5,5	0,26	0,18	0,17	0,7	0,02	-	-	-
Cu-ETP	CW004A	99,99	-	-	-	-	-	0,005	-	0,04	0,0005
CuZn37	CW508L	64	0,1	-	0,3	-	0,1	0,1	0,05	-	-

Der Werkstoff Cu-ETP wird in drei unterschiedlichen Blechdicken sowie zwei unterschiedlichen Härteklassen untersucht. Trotzdem sind die chemischen Zusammensetzungen dieses Werkstoffes für alle Konfigurationen gleich, da Konfigurationsunterschiede aufgrund unterschiedlicher Walzprozesse zustande kommen.

Die Ergebnisse der mechanischen Zugprüfungen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

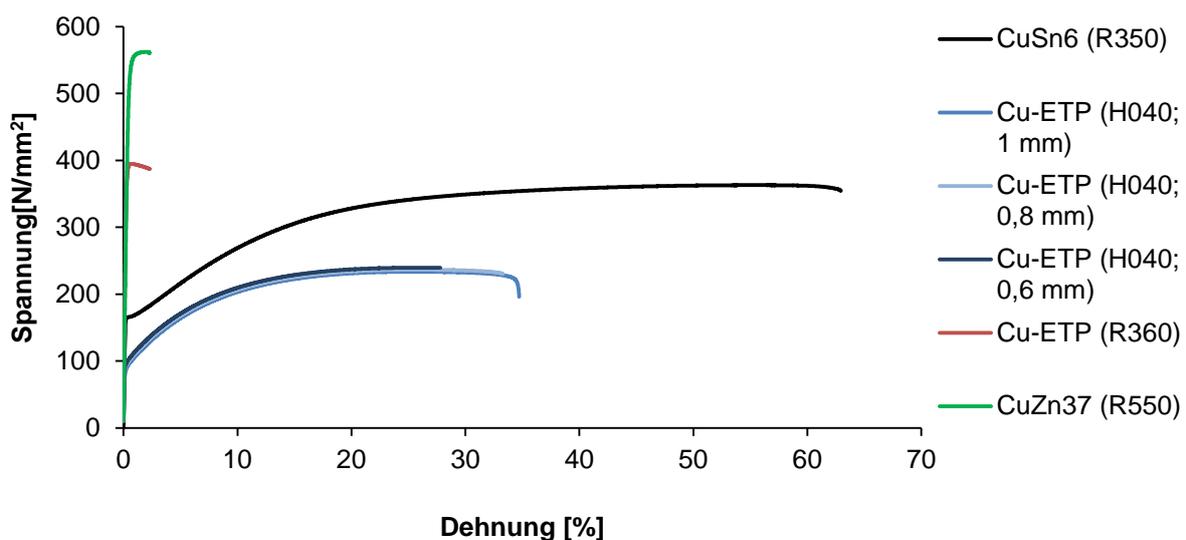


Abbildung 5-4: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Werkstoffe CuSn6, Cu-ETP (verschiedene Konfigurationen) und CuZn37

Der Werkstoff CuSn6 zeigt mit einer Bruchdehnung von 67% die größte Bruchdehnung aller verwendeten Kupferwerkstoffe. Für die Untersuchung des Einflussparameters Blechdicke verdeutlicht die Abbildung 5-4 die geforderte Übereinstimmung der Spannungs-Dehnungskurven unterschiedlicher Blechdicken des Werkstoffes Cu-ETP (Konfiguration: H040). Somit kann ausschließlich der Einfluss der Blechdicke auf das Präge-Scherschneiden eingehend untersucht werden. Um den Einfluss unterschiedlicher Konfigurationen auf das Präge-Scherschneiden zu untersuchen, wird zusätzlich zur Konfiguration H040 die Konfiguration R360 untersucht. Diese beiden Konfigurationen stellen laut Norm die Extremwerte mechanischer Eigenschaften dar (DKI - CuETP,

2015). Der Messingwerkstoff CuZn37 hat in der vorliegenden Konfiguration die höchste Festigkeit (Streckgrenze: 523 N/mm², Zugfestigkeit: 563 N/mm²) aller untersuchten Kupferwerkstoffe und eignet sich daher, die Festigkeit der Kerbe mit Dauerhubuntersuchungen zu erforschen.

5.1.5 Vergleich der mechanischen Eigenschaften aller verwendeten Blechwerkstoffe

Um einen direkten Vergleich der Werkstoffdaten untereinander zu ermöglichen, werden die relevanten mechanischen Kennwerte aller verwendeten Blechwerkstoffe in diesem Unterkapitel zusammenfassend betrachtet.

Die mechanischen Eigenschaften (Streckgrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Gleichmaßdehnung A_g und Bruchdehnung A) aus den Zugversuchen (siehe Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-4, S. 39-42) können der folgenden Tabelle entnommen werden (Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: *Mechanische Eigenschaften der zu untersuchenden Kupferlegierungen*

Werkstoff		Mechanische Eigenschaften			
Kurzname	Werkstoffnummer	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_g [%]	A [%]
DC04	1.0338	190	318	22	42
X5CrNi18-10	1.4301	326	703	46	51
AC170 PX	AA 6014	118	227	19	21
CuSn6 (R350)	CW452K	165	363	55	67
Cu-ETP (H040, 1mm)	CW004A	80	234	32	44
Cu-ETP (H040, 0,8 mm)	CW004A	78	229	32	43
Cu-ETP (H040, 0,6 mm)	CW004A	76	227	31	37
Cu-ETP (R360)	CW004A	391	396	1	4
CuZn37	CW508L	523	563	3	6

Alle durch den Zugversuch ermittelten Werte liegen innerhalb der entsprechenden Normen (DIN 755-2, 2015). Die teilweise gegensätzlichen Eigenschaften (z.B.: spröder Edelstahl und duktiler Kupfer) der unterschiedlichen Werkstoffgruppen (Tiefziehstahl, Edelstahl, Aluminium- und Kupferwerkstoffe) führen zu einem breiten Werkstofffeld, in dem das neue Verfahren (Präge-Scherschneiden) angemessen untersucht wird.

5.2 Werkzeugwerkstoffe

Die ungehärteten Platten werden aus dem Werkstoff St52 angefertigt, während die gehärteten Platten und die Aktivelemente (Kerb- und Schneidelemente) aus dem Werkzeugstahl 1.2379 produziert werden. Diese beiden Werkstoffe zeigen neben ihren unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften auch erhebliche Unterschiede im Kaufpreis. Der Werkstoff St52 ist im Durchschnitt 75% preiswerter als der Werkstoff 1.2379 (Dörrenberg Edelstahl GmbH, 2014).

5.2.1 Chemische Zusammensetzung

Die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe erfolgt mit Hilfe des Funkenemissionsspektrometers, indem an jeweils fünf beliebigen Bereichen eines Werkstoffes gemessen wird. Tabelle 5-6 zeigt die gemessenen Werte der chemischen Zusammensetzung der zwei Werkzeugwerkstoffe St52 und 1.2379. Die gemessenen Werte sind im Toleranzbereich der Herstellerangaben (*Lieferprogramm Kaltarbeitsstähle*, 2007).

Tabelle 5-6: Chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe

Werkstoff		Anteil der Legierungselemente in [%]							
Kurzname	Euronorm	C	Cr	Mn	Mo	S	Si	V	W
St52	S355J2G3	0,16	-	15	-	0,031	0,5	-	-
1.2379	X155CrVMo12	1,55	12	0,27	0,7	0,01	0,28	1	1,4

5.2.2 Gefügeausprägung

Aufgrund unterschiedlicher Gefügeausprägungen kann auf die Güte und Eigenschaften eines Werkstoffes geschlossen werden. Daher ist ein detaillierter Blick auf die Werkstoffmatrix mit ihren eingelagerten Karbiden nötig, da bereits geringe mikroskopische Unterschiede in der Matrix einen makroskopischen Einfluss auf die Bearbeitung und den Gebrauch dieser Werkstoffe besitzen. Abbildung 5-5 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden verwendeten Werkzeugwerkstoffe im metallografischen Schliff.

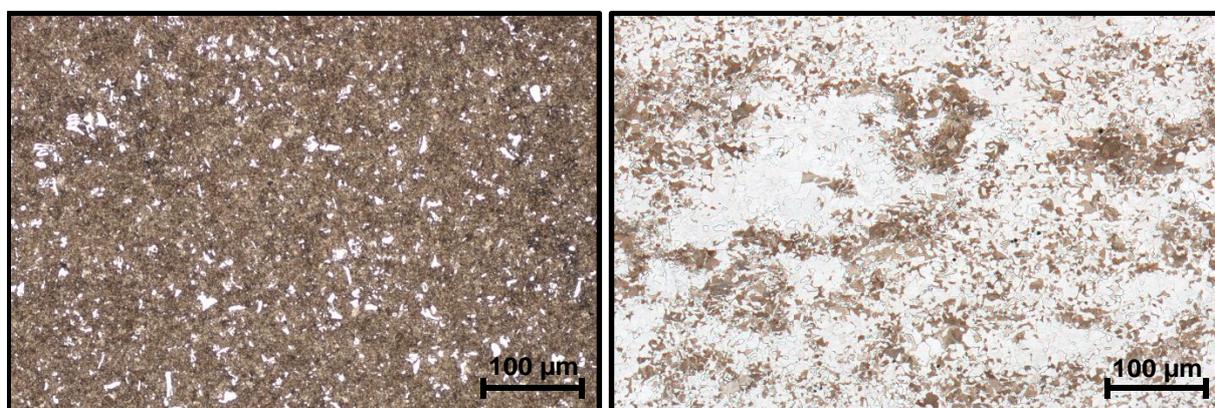


Abbildung 5-5: Gefüge der Werkzeugwerkstoffe im Rasterelektronenmikroskop; links: 1.2379, rechts: St52

Im metallografischen Schliff ist ein Unterschied beider Werkstoffe bezüglich der Gleichmäßigkeit des Gefüges deutlich erkennbar. Dieser liegt an den unterschiedlichen Wärmebehandlungsarten nach der Fertigung. Der Werkstoff 1.2379 wird dreimal angelassen, wodurch neben der Härte auch ein gleichmäßiges Gefüge eingestellt wird. Der Gebrauch vom Werkstoff St52 erfolgt ohne jegliche Wärmebehandlung, wodurch eine ungleichmäßigere Gefügebrauchung im Vergleich zum Werkstoff 1.2379 vorliegt.

1.2379

Dieser 12%ige Chromstahl mit seinem ledeburitischem Gefüge hat aufgrund seines hohen Volumengehaltes an harten Karbiden eine hohe Beständigkeit gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß (Dörrenberg Edelstahl GmbH, 2014). Nachteilig ist die ungleichmäßige, zeilige Karbidverteilung. Hierdurch wird die Ausbruchsfahr gerade bei Schneidelementen erhöht. Da dieser Nachteil für die durchzuführenden Untersuchungen nur marginal ist, kann dieser Werkstoff bedenkenlos verwendet werden.

St52

Dieser Werkstoff hat ein ferritisches Grundgefüge mit lamellarem Perlit, an dessen Korngrenzen vereinzelt Tertiärzementit zu finden ist. Hierdurch erhält dieser Mn-legierte Baustahl eine hohe Festigkeit und gute Schmelzschweißigenschaften und wird daher oft für Konstruktionsbauteile verwendet.

5.2.3 Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Eigenschaften des Werkzeugwerkstoffes determinieren sich durch Härte und Schlagzähigkeit. Der Werkstoff St52 hat eine geringe Grundhärte (20 HRC) und kann in seiner Härte durch gängige Verfahren nicht merklich erhöht werden, während der Werkstoff 1.2379 mit herkömmlichen Härtungsverfahren aushärtbar ist. In der Praxis hat sich daher beim Scherschneiden der Einsatz vom gehärteten Werkzeugstahl 1.2379 (60 HRC) etabliert. Auch für die Versuche in der vorliegenden Arbeit ist die Härte hoch genug, um trotz hoher Zug- und Druckspannungen keine plastische Deformation im Werkstoff herbeizuführen (STM Stahl, 2013).

Die Zähigkeit, ermittelt durch den Kerbschlagbiegeversuch, liegt beim Werkstoff 1.2379 bei 19 J und bei dem Werkstoff St52 bei 17 J (Literaturwerte). Diese Zähigkeiten reichen für den geplanten Einsatz als einzelne Elemente des Werkzeuges problemlos aus.

6 Versuchswerkzeug

Für die Untersuchungen des neuen Verfahren (Präge-Scherschneiden) erfolgt am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (UTG) der TU München die Entwicklung und Konstruktion eines geeigneten Versuchswerkzeuges. Die gesamte Werkzeugkonstruktion sowie die Erstellung von Fertigungszeichnungen wird mit Hilfe der Software CATIA V5 R19 der Firma Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay durchgeführt. Der Bau des Versuchswerkzeuges geschieht beim Tochterunternehmen (Stueken s. r. o., Hradec Králové) der Firma Hubert Stueken GmbH & Co. KG, Rinteln.

6.1 Anforderungen an das Versuchswerkzeug

Zur Realisierung der zu untersuchenden Aufgabenbereiche im Präge-Scherschneiden (siehe Kap. 3, S. 29) muss das Werkzeug folgende Bedingungen erfüllen:

- Geringe Toleranzen in der Werkzeugfertigung, um eine hohe Signifikanz der Versuche zu gewährleisten
- Selbstöffnende Funktion, um eine Beschädigung der Aktivelemente (Kerbe) zu vermeiden
- Einprägung unterschiedlicher Kerbgeometrien und anschließendes Schneiden im offenen sowie im geschlossenen Schnitt
- Unterschiedliche Schneidspalte im offenen und geschlossenen Schnitt
- Minimale Verkippung des Werkzeuges, um den Verschleiß zu minimieren
- Hohe Werkzeugsteifigkeit und Führungsgenauigkeit, um Störeinflüsse, wie z. B. Einfluss der Versuchspresse zu minimieren
- Schnelles und einfaches Wechseln der Aktivelemente
- Kostengünstige Instandhaltung

6.2 Werkzeugkonstruktion

Die genannten Anforderungen an das Versuchswerkzeug (siehe Kapitel 6.1) verdeutlichen die Komplexität des Forschungsprojektes. Aus diesem Grund muss auf ein normiertes, kostengünstiges Werkzeuggestell verzichtet werden. Eine forschungsadäquate Umsetzung des Werkzeugkonzeptes ist notwendig. Somit sind alle Platten des Werkzeuggestells Einzelanfertigungen. Eine Darstellung des Versuchswerkzeuges zeigt die Abbildung 6-1.

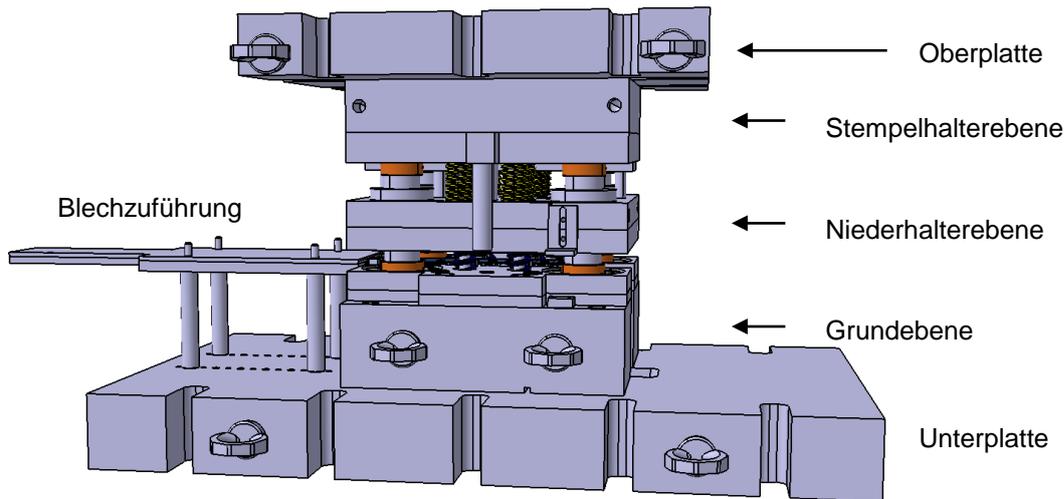


Abbildung 6-1: Gesamtaufbau des Versuchswerkzeuges

Um einen problemlosen Einbau des Versuchswerkzeuges in unterschiedliche Pressen mit verschiedenen Einbauhöhen zu realisieren, sind die Unter- und Oberplatte abmontierbar, ohne die Funktionsweise des Werkzeuges zu verändern. Die Blechezuführung ist essentiell für einen problemlosen Vorschub des Bandmaterials und verhindert die Wellenbildung. Die Gefahr eines unkontrollierten Bandvorschubes wird hierdurch beseitigt.

Zentraler Hauptbestandteil des Werkzeuges sind die drei Plattensysteme zwischen der Unter- und Oberplatte (Grundebene, Niederhalterebene und Stempelhalterebene). Die Einprägung der unterschiedlichen Kerben sowie die gesamten Scherschneidvorgänge erfolgen durch genaues Zusammenspiel dieser drei Plattensysteme. Eine detaillierte Erklärung der einzelnen Ebenen bzw. Bereiche ist daher von substantieller Bedeutung für das Verständnis der vorliegenden Forschungsarbeit. In den folgenden Kapiteln (Kap. 6.2.1-6.2.3) wird daher zuerst eine eingehende Beschreibung der drei Plattensysteme getrennt voneinander durchgeführt. Danach erfolgt die Beschreibung der Scherschneidvarianten „offen“ und „geschlossen“ mit dem hierfür nötigen interdependenten Zusammenhang dieser drei Plattensysteme (Kap. 6.2.4).

6.2.1 Grundebene

Die Basis des Werkzeuges bildet die Grundebene mit einem Plattensystem aus einer Grund-, der gehärteten Druck- sowie Matrizenplatte (Abbildung 6-2).

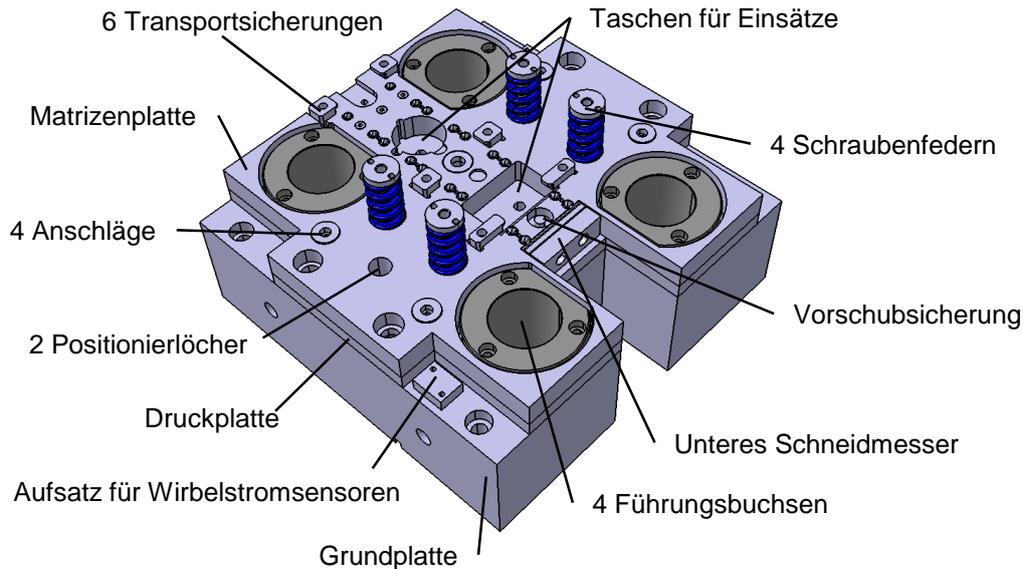


Abbildung 6-2: Grundebene des Werkzeuges

Die Grundplatte dieses Werkzeuges wird aus dem kostengünstigen St52 gefertigt. Die Fertigungstoleranzen sind absichtlich breit gehalten, da diese Platte nicht im direkten Kontakt zum Blechwerkstoff steht und somit keinen Einfluss auf das Schneidergebnis hat. Auf der Grundplatte ist eine gehärtete Druckplatte (Härte: 58 HRC) aus dem Werkstoff 1.2379 befestigt. Hauptaufgabe dieser Platte ist es, die Kräfte infolge der Schneid- und Prägeoperationen abzufangen und gleichbleibende Schneidbedingungen bei steigender Hubzahl zu ermöglichen. Fundamentale Bedeutung bei diesem 3-Bundplattensystem hat die gehärtete Matrizenplatte. Geringste Toleranzen ($\pm 4 \mu\text{m}$ beim Drahterodieren) sind bei der Fertigung dieser Platte von gravierender Bedeutung, da die Aktivelemente in dieser Platte positioniert werden und somit das Schneidergebnis direkt beeinflussen. Die drei Platten sind über zwei Positionierlöcher mit entsprechender Verstiftung zueinander ausgerichtet. Um eine geringe Verkippung des Werkzeuges zu Beginn der ersten Hübe zu gewährleisten, sind außen an der Matrizenplatte 4 Anschläge angebracht, die über die Platte 0,99 mm hinausragen. Der Niederhalter wird somit zu Beginn beim Ausschneiden der ersten Löcher eben gehalten und die Verkippung der oberen Stempel- und Niederhalterebene wird minimiert. Die vier Führungsbuchsen mit Kugelkäfigen ermöglichen ein problemloses Auf- und Zufahren des Werkzeuges. Wirbelstromsensoren (WSS-26 x 20, Firma Systeme und Steuerungen) und eine Vorschubsicherung detektieren den realisierten Vorschub, gleichen diesen mit dem nötigen Vorschub nach einem Hub ab und können in Verbindung mit dem WSS Auswertegerät AF30112 einen fehlerhaften Vorschub an die Presse kommunizieren. Ein abrupter Pressenstopp ist die Folge. Zur möglichst geraden Streifenführung sind auf der Matrizenplatte sechs Transportsicherungen verschraubt, die eine Begrenzung des Streifens zur rechten und linken Seite darstellen.

6.2.2 Niederhalterebene

Der Niederhalterbereich besteht aus einem Plattensystem von zwei Platten (obere und untere Niederhalterplatte) und soll neben der für die Versuche nötigen Niederhalterkraft eine problemlose Positionierung der Stempel ermöglichen (Abbildung 6-3).

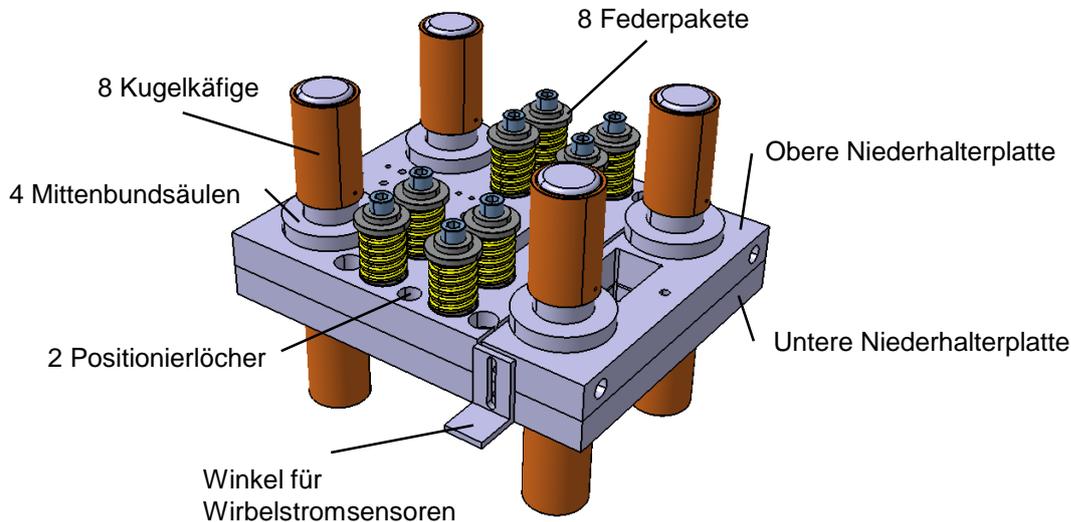


Abbildung 6-3: Niederhalterebene des Werkzeuges

Die obere Niederhalterplatte ist aus dem kostengünstigen St52 Werkstoff gefertigt, da keine besonderen Anforderungen bezüglich Toleranzen und Härte des Werkstoffes bestehen. Ein Übermaß der Schneidkanäle ermöglicht weiterhin ein problemloses und kontaktloses Durchdringen der Stempel. Eine Positionierung der Stempel wird in dieser oberen Niederhalterplatte nicht angestrebt. Für diese Positionierung ist die untere Niederhalterplatte vorgesehen. Die untere Niederhalterplatte besteht aus dem gehärteten Stahl 1.2379 (Härte: 58 HRC) und muss aufgrund ihrer Positioniereigenschaft für alle Stempel mit geringsten Fertigungstoleranzen hergestellt werden ($\pm 4 \mu\text{m}$ beim Drahterodieren). Die Positionierung des Blechstreifens erfolgt über Sucherstifte, die zwischen unterer und oberer Niederhalterplatte verbaut sind und aus der unteren Niederhalterplatte herausragen. Die vier Mittenbundsäulen ermöglichen eine hohe Steifigkeit und eine geringe Durchbiegung bei möglichen Querkräften. Durch die acht Kugelkäfige ist ein problemloses Auf- und Zufahren des Werkzeuges unter gleichbleibenden Bedingungen garantiert. Die Umsetzung der Niederhalterkraft wird realisiert mit den acht Federpaketen auf der oberen Niederhalterplatte. Zur Messung der Verkippung sind an beiden Seiten des Niederhaltersystems höhenverstellbare Winkel angebracht. Die Winkel dienen als Referenzebene zur Messung des Abstandes mit Hilfe der Wirbelstromsensorik auf der Grundebene des Werkzeuges (siehe Abbildung 6-2, S. 48).

6.2.3 Stempelhalterebene

In der Stempellebene sind alle für den Prozess notwendigen Stempel verbaut. Zentrale Elemente dieses Plattensystems sind die Stempelhalte-, Druck- und Oberplatte (Abbildung 6-4). Die Stempelhalteplatte ist wie die Druckplatte aus dem Werkstoff 1.2379 und zusätzlich auf 58 HRC gehärtet. Geringe Toleranzen in der Fertigung sind gefordert, da an diesen zwei Platten die Stempel befestigt sind und somit eine Ausrichtung zur unteren Niederhalterplatte erfolgen muss. Alle drei Platten werden über zwei Positionierlöcher zueinander ausgerichtet. Die Stempel sind schwimmend gelagert und haben in vertikaler Richtung ein Spiel von 0,02 mm. Vier Abstandsschrauben begrenzen den nötigen Abstand zwischen Stempel- und Niederhalterebene beim Auffahren der Presse. Die vier Führungsbuchsen ermöglichen in Kombination mit den Kugelkäfigen und den Mittenbundsäulen ein problemloses Auf- und Zufahren des Werkzeuges.

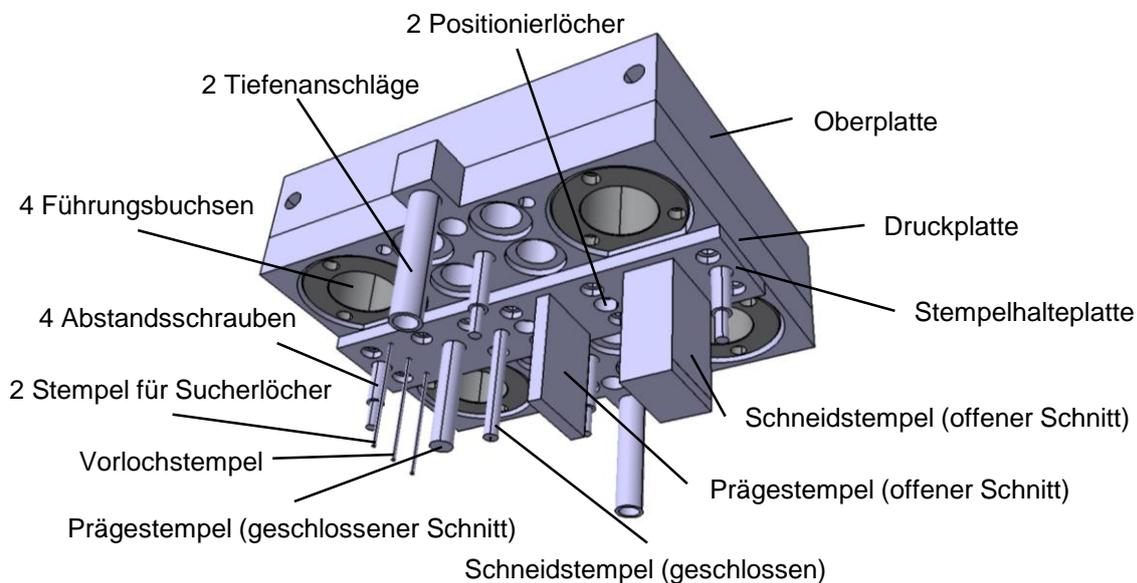


Abbildung 6-4: Stempellebene des Werkzeuges

6.2.4 Durchführung der Präge- und Schneidoperationen

In der vorliegenden Forschungsarbeit erfolgen die Untersuchungen des geschlossenen (Lochen) und offenen Schnittes (Abschneiden) ausschließlich mit dem in Kapitel 6 (siehe S. 46-50) beschriebenen Werkzeug. Für das genaue Verständnis des Werkzeuges, des Versuchsplanes und der Deutung der Versuchsergebnisse ist die Funktionsweise der einzelnen Präge- und Schneidoperationen von grundlegender Bedeutung. Aus diesen Gründen folgt eine kurze Beschreibung der Umsetzung des geschlossenen und offenen Präge-Scherschneidens in diesem Werkzeug.

Geschlossener Schnitt (Lochen)

Der geschlossene Schnitt wird für das Präge-Scherschneiden in diesem Werkzeug in mehreren Stufen umgesetzt. Zu Beginn werden zwei Sucherlöcher in das Blech geschnitten (Sucherstempel

siehe Abbildung 6-4, S. 50). Diese haben den Durchmesser von 3 mm und sind vom Lochmittelpunkt 3 mm zum Rand entfernt. Hierdurch wird die gewünschte Positionierung des Bleches sichergestellt, gleichzeitig ist aber weiterhin genügend Platz auf dem Blech, um die Präge- und Scherschneidvorgänge zu realisieren. Die Positionierung im tausendstel Millimeter Bereich ist nötig, da die Positionierung des Bleches aus der Prägestufe der Positionierung des Bleches in der Scherschneidstufe entsprechen muss. Ansonsten können die Einflussparameter auf das Präge-Scherschneiden nicht voneinander getrennt und präzise herausgearbeitet werden. In der nächsten Werkzeugstufe erfolgt die Einprägung einer kreisrunden Kerbe mit einem Durchmesser von 10 mm. Zur exakten Positionierung wird das Blech vor dem Prägevorgang mit Hilfe der Sucherstifte positioniert. Um die Geometrieänderung der Kerbe zu untersuchen, ist im Werkzeug eine Tasche eingefräst. In dieser Tasche wird das Kerbaktivelement positioniert. Auf diese Weise kann der Einfluss unterschiedlicher Aktivelemente mit unterschiedlichen Geometrien untersucht werden. Die Einprägung der Kerbe erfolgt mit einem Prägestempel, der bei vollständiger Kerbeinprägung auf Block fährt. Nach der Kerbeinprägung folgt die Lochstufe. Hierfür wird der Blechstreifen wieder durch Sucherstifte positioniert, der Lochstempel durchtrennt das Blech und dringt hiernach in die Schneidmatrize ein. Die Variation des Schneidspaltes erfolgt durch feinstgeschliffene Matrizeneneinsätze mit unterschiedlichen Innendurchmesser. Eine Veränderung des Lochstempels ist nicht vorgesehen, da dieser in der Niederhalterplatte geführt ist und eine Verkleinerung des Lochstempelradius eine ungenauere Positionierung ergibt bzw. eine neue kostenintensive Positionierplatte erfordert.

Offener Schnitt (Abschneiden)

Der offene Schnitt erfolgt im Folgeverbundwerkzeug chronologisch nach dem geschlossenen Schnitt. Um eine Beeinflussung der beiden Schneidarten zu vermeiden, wird der offene Schnitt um 10 mm längsversetzt (in Blechlaufriechung) zum geschlossenen Schnitt durchgeführt. Hierdurch erfolgt keine gegenseitige Beeinflussung der beiden Schnittlinien auf dem Blech.

Für den offenen Schnitt erfolgt die Kerbeinprägung über eine Länge von 20 mm (mittig) in Blechbreitenrichtung. Grund für die Kerbeinprägung über einen definierten Bereich ist der Nachteil bei einer Kerbeinprägung über die gesamte Blechbreite, da es in diesem Fall zu einer deutlichen Blechlängung kommt, welche im weiteren Verlauf des Prozesses zwangsläufig berücksichtigt werden muss. Einerseits drückt bei einer Kerbeinprägung über die gesamte Blechbreite der Blechstreifen gegen die Stempelmantelfläche und erhöhter Verschleiß beim Rückhub ist die Folge, andererseits ändert sich der Abstand der Sucherlöcher, was bei der weiteren Positionierung des Blechstreifens beachtet werden muss. Aufgrund dieser beiden Nachteile ist die Kerbeinprägung für den offenen Schnitt so gewählt, dass keine signifikante Blechlängung auftritt und eine präzise Positionierung des Blechstreifens weiterhin erfolgen kann. Ein weiterer Vorteil der (gewählten)

Kerbeinprägung über einen ausschließlich definierten Bereich ist der direkte Vergleich der beiden Schneidarten Normalschneiden und Präge-Scherschneiden an einem Bauteil. Im offenen Schnitt erfolgt das Präge-Scherschneiden in der Blechmitte, das Normalschneiden am Rand. Für die Kerbeinprägung wird eine rechteckige Tasche in die Matrizenplatte erodiert. Das Aktivelement mit der Kerbe kann in die Tasche eingesenkt werden. Mit Hilfe von Endmaßen erfolgt die genaue Positionierung des Aktivelementes in Längsrichtung. Ein problemloser Austausch der Aktivelemente ist möglich, um unterschiedliche Kerbgeometrien zu untersuchen. Nach dem Einprägen der Kerbe in das Blech, wird dieses mittels Unter- und Obermesser in der folgenden Stufe abgeschnitten. Um eine genaue Positionierung zu ermöglichen, muss das Blech vor der Schneidoperation mit Sucherstiften positioniert werden. Die Einstellung verschiedener Schneidspalte erfolgt beim offenen Schnitt mit unterschiedlichen Endmaßen zwischen Untermesser und Schneidplatte. Eine weitere Möglichkeit zur Einstellung des Schneidspaltes ist ein Hinterschnitt am Obermesser, wodurch der horizontale Abstand zwischen der Stempelmantelfläche und dem Untermesser (Schneidspalt) verändert wird. Hierzu werden für das Werkzeug mehrere Obermesser mit unterschiedlichen Hinterschnitten angefertigt. Eine genaue Einstellung und Positionierung des Schneidspaltes ist hierdurch gewährleistet. Abbildung 6-5 zeigt den durch die Präge- und Scherschneidoperationen entstandenen Blechstreifen (beispielhaft am Edelstahlwerkstoff 1.4301).

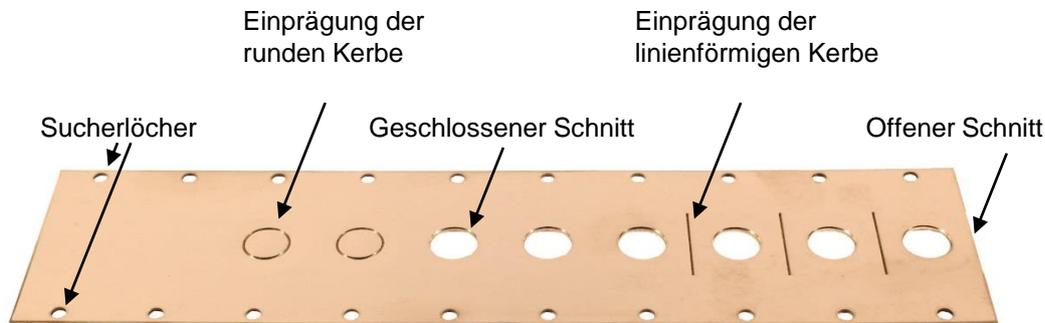


Abbildung 6-5: Blechstreifen

6.3 Feineinstellung des Versuchswerkzeuges

Die Einprägung der Kerbe ins Blechmaterial findet über Prägestempel statt. Hierzu bewegt sich der Stößel der Presse nach unten bis - im unteren Totpunkt der Presse - die gewünschte Einprägung der Kerbe erfolgt ist. Der Prägestempel fährt bei vollständiger Einprägung der Kerbe auf Block. Die vollständige Einprägung der Kerbe muss am unteren Totpunkt abgeschlossen sein, da ein weiteres Zufahren des Werkzeuges den Prägestempel beschädigt bzw. somit zum Versagen der Prägefunktion führt. Das Prägen ist somit der Vorgang, der erst mit Erreichen des unteren Totpunktes abgeschlossen sein muss, um eine vollständige Kerbeinprägung zu realisieren. Daher müssen alle anderen Vorgänge (Schneidprozesse) zeitlich vor dem Kerbeinprägen beendet sein, wodurch sich die umgekehrte zeitliche Reihenfolge der Präge- und Schneidoperationen während eines Hubes

erklären lässt. Da der Niederhalter auf dem Blech aufliegt, ist die Kerbeinprägung während des Vorganges nicht sichtbar. Um keinen Werkzeugbruch während der Einprägung der Kerbe ins Blech herbeizuführen, aber trotzdem eine vollständige Kerbeinprägung zu gewährleisten, sind zwei Tiefenanschlüge im Außenbereich des Werkzeuges angebracht (siehe Abbildung 6-4, S. 50). Diese Tiefenanschlüge sind auf die gleiche Höhe geschliffen wie die Summe aus der Länge des Prägestempels und der Blechdicke (Abbildung 6-6).

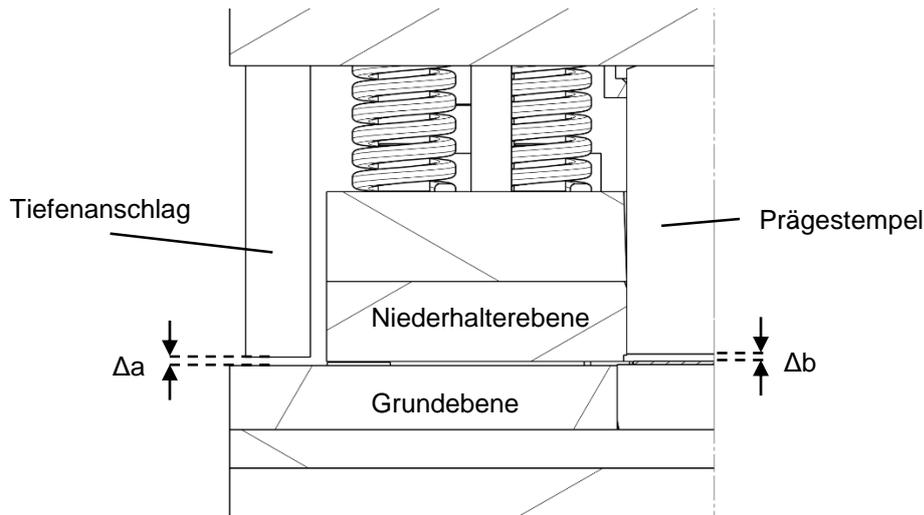


Abbildung 6-6: Werkzeugdetail (maßstabsgetreu) zur Feineinstellung

Die vertikale Distanz zwischen Tiefenanschlag und Matrizenplatte (Δa) entspricht der Distanz zwischen Prägestempel und Blechoberseite (Δb). Kurz vor Beginn des Prägens ist das Werkzeug zugefahren und nur noch der Abstand zwischen Tiefenanschlag und Grundplatte sichtbar. Ein Messen dieser Distanz (Δa) gibt Aufschluss, ob der Prägestempel im Werkzeug die Kerbe berührt bzw. es zum Werkzeugbruch kommt. Durch sorgfältige Verstellung der Hubhöhe muss der Punkt gefunden werden, bei dem der Prägestempel genau auf Block fährt ($\Delta a = \Delta b = 0$, vollständige Einprägung der Kerbe ins Blech) und somit kein Werkzeugbruch auftritt.

7 Versuchsbeschreibung und -durchführung

Die für das Präge-Scherschneiden in Kapitel 3 (siehe S. 29) genannten Aufgabenbereiche und Zielsetzung implizieren einen Versuchsplan, differenziert in Einzel- und Dauerhubuntersuchungen. Die gewählten Parameter in den Einzelhubuntersuchungen werden erläutert, gefolgt von einer detaillierten Beschreibung des Versuchsplanes. Außerdem ist es für die Ergebnisdeutung und -bewertung unerlässlich, den Aufbau des Simulationsmodells sowie die Auswertemethodik zu kennen.

7.1 Parameter und Einstellungen im Einzelhub

Aufgrund fehlender Kenntnisse über das Präge-Scherschneiden fordert dieses neue Verfahren eine grundlegende Untersuchung der Einfluss- und Prozessparameter (siehe Abbildung 3-1, S. 30), um die Determinanten dieses Verfahrens zu erforschen. Mit Hilfe von Einzelhubuntersuchungen (Presseneinstellung: Einrichtbetrieb) erfolgt die Variation und Untersuchung der unterschiedlichen Parameter. Obwohl in der industriellen Fertigung fast ausschließlich der Serienbetrieb zum Einsatz kommt, wird bei den Parameteruntersuchungen auf den Einzelhubbetrieb zurückgegriffen, da hier ein problemloses Analysieren der einzelnen Parameter möglich ist.

7.1.1 Einflussgrößen auf das Präge-Scherschneiden

Im Fokus der Arbeit liegt die Erforschung der Parameter, die aufgrund des neuen Verfahrens hinzugekommen sind und möglicherweise einen entscheidenden Einfluss auf die Schnittflächenausprägung haben. Somit wird für einzelne Einflussgrößen, welche in der Literatur bereits vielfach untersucht worden sind, eine feste Konfiguration gesetzt. Dies trifft auf die Schneidplattenverrundung, die Beölung, die Schneidgeschwindigkeit und die Niederhalterkraft zu. Nachfolgend werden diese konstanten Versuchseinstellungen erklärt.

Schneidplattenverrundung

Die Verrundung der Schneidaktivelemente (Ober- und Untermesser im offenen Schnitt bzw. Stempel und Schneidplatte im geschlossenen Schnitt) hat einen entscheidenden Einfluss auf die Gratausbildung, da bei diesen Aktivelementen die Anformung des Blechstreifens an den Schneidmatrizenradius erfolgt (siehe Kap. 2.2, S. 5). Ist dieser Radius hierbei scharfkantig, so hat dies eine geringe Gratbildung zur Folge. Das Blech kann sich bei scharfkantigen (meist produktneuen) Aktivelementen nur bedingt an die Schneidmatrize anformen. Bei zunehmender Hubzahl verschleiben die Schneidaktivelemente, und es entsteht ein Radius zwischen Mantel- und Stirnfläche der Aktivelemente. Hierdurch wird die Anformung des Blechbauteils an den Radius des Aktivelementes begünstigt, und eine Gratbildung ist die Folge. Da in der vorliegenden Forschungsarbeit der Einfluss einer Kerbe auf das Schneidergebnis untersucht wird, sind für die Schneidaktivelemente

Parametereinstellungen gewählt, die allgemein als „verschlissen“ gelten. Ziel ist es (im Einzelhub), trotz verschlissener Aktivelemente gratfreie Bauteile zu produzieren. Hierfür werden für den geschlossenen Schnitt sowohl der Stempel als auch die Schneidmatrize respektive für den offenen Schnitt Ober- und Untermesser mit einem Radius von 0,2 mm verrundet (Abbildung 7-1).

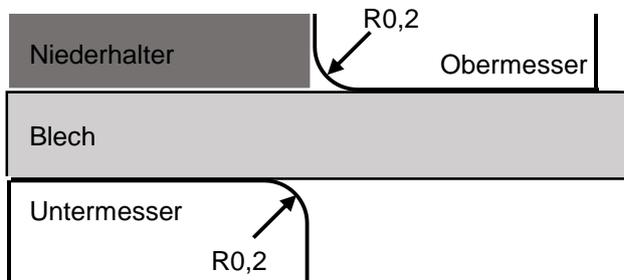


Abbildung 7-1: Verrundete Aktivelemente (offener Schnitt)

Die Verrundung von 0,2 mm entspricht im industriellen Umfeld stark verschlissenen Aktivelementen und führt aus Erfahrung zu einer ausgeprägten Gratbildung. Gerade dieser Zustand ist in der vorliegenden Forschungsarbeit Gegenstand der Untersuchungen, da dieser Zustand einen Austausch bzw. Nacharbeiten der Aktivelemente beim Normalschneiden zwingend erforderlich macht. Eine mögliche weitere Benutzung der verschlissenen Aktivelemente bei gleichzeitiger Gratfreiheit des Bauteils hätte eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zur Folge und ist somit von wesentlichem Interesse für die gesamte Prozesskette des Trennens. Lediglich für die Dauerhubuntersuchungen werden die Stempel mit einer Verrundung von 40 μm verwendet, da bei diesen Untersuchungen der fortschreitende Verschleiß ausgehend vom Neuzustand untersucht wird.

Beölung

Aufgrund der hohen Neigung des Edelstahl zu Kaltaufschweißungen und der dadurch entstehenden hohen Rückzugskräfte durch den Schneidstempel ist ein Stempelbruch die wahrscheinliche Folge. Um diesen Kaltaufschweißungen entgegenzuwirken, wird bei den Versuchen mit einer Beölung gearbeitet. Zur Verwendung kommt ein chlorfreies Ziehöl der Firma Raziol Zibulla & Sohn GmbH, Iserlohn (Raziol CLF 125F). Die Beölung des Blechstreifens erfolgt mit einem Pinsel auf der Blechober- und Unterseite. Eine definierte Schmierstoffmenge von ca. 20 g/m^2 wird hierbei auf das Blech aufgetragen.

Schneidgeschwindigkeit

Die Presse wird durchgängig mit 300 Hub/min gefahren. Hierdurch ergibt sich eine Anschnittgeschwindigkeit von 80 mm/s bei einer Blechdicke von einem Millimeter. Dieser Wert liegt zwischen den geringen Anschnittgeschwindigkeiten von Großkarosseripressen und hohen Anschnittgeschwindigkeiten bei Folgeverbundwerkzeugen und lässt somit den möglichen Anwendungsbereich beider Pressenarten bewusst zu.

Niederhalterkraft

Der Einfluss der Niederhalterkraft auf die Schnittfläche schergeschnittener Blechgeometrien ist allgemein sehr gering (Hörmann, 2008, S. 104–106). Trotzdem muss diese Kraft richtig eingestellt werden. Bei einer zu kleinen Niederhalterkraft liegt das Blech nicht flach auf, sondern kann beim Scherschneiden abheben. Eine zu große Niederhalterkraft führt zu erhöhter Werkzeugabnutzung.

Im Versuchswerkzeug wird die Niederhalterkraft durch die acht Federpakete zwischen der Niederhalterebene und der Stempelebene realisiert (siehe Kap. 6.2.2, S. 49). Die nötige Niederhalterkraft beträgt aus empirischem Wissen 30 % der maximalen Schneidkraft (siehe Kap. 2.3, S. 11). Bei einer maximalen Schneidkraft von 64 kN beträgt somit die nötige Niederhalterkraft 19,2 kN und wird durch acht Federpakete mit jeweils einer Federkraft von ca. 3 kN sichergestellt. Die erhöhte Gesamtfederkraft der acht Niederhalterfedern ergibt sich aufgrund der selbstöffnenden Werkzeugfunktion.

7.1.2 Prozessparameter des Präge-Scherschneidens

Durch das neue Verfahren sind neue Prozessparameter hinzugekommen, die einen Einfluss auf die Schnittfläche haben. Dies sind zum einen die Parameter bezüglich der Kerbgeometrie in der Werkzeugstufe Prägen und zum anderen die Schneidparameter in der Werkzeugstufe Scherschneiden (siehe Kapitel 6.2.4, S. 50). Eine Untersuchung dieser Parameter mit ihren unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten ist daher zwingend erforderlich.

Kerbparameter

Da der Einfluss einer Kerbeinprägung auf das nachfolgende Schneidergebnis gänzlich unerforscht ist, stellt die Geometrie der Kerbe einen Hauptuntersuchungspunkt in der vorliegenden Forschungsarbeit dar. Die Forschungsarbeit fokussiert sich auf die Frage: Welcher geometrische Prägevorgang führt zu einem gratfreien Schneidergebnis beim anschließenden Scherschneiden? Die Bedeutung dieser Fragestellung konkretisiert sich in der Geometrie der idealen Schnittfläche (siehe Kap. 1, S. 1). Die Beschreibung der Kerbgeometrie basiert auf den Prämissen technischer Erkenntnisse aus dem Feinschneiden und den allgemeinen werkstoffkundlichen Grundlagen der Umformtechnik (Birzer, 1996, S. 15–18). Daher muss hierauf zuerst eingegangen werden, bevor die Kerbparameter im Detail beschrieben werden.

Die Einprägung der Kerbe ins Blech führt zwangsläufig zu einer Materialverdrängung. Infolge der entstehenden Druckspannungen soll durch einen Hinterschnitt mit dem Radius von 0,3 mm vor und hinter der Kerbgeometrie dem Blechwerkstoff die Möglichkeit zum Materialfluss (Ausweichen) gegeben werden (Abbildung 7-2). Durch den Ausweichbereich (Hinterschnitt) wird untersucht, ob die Wulstbildung an der Blechunterseite infolge der Materialverdrängung auftritt. Die mögliche Wulstbildung ist nicht erwünscht, da sie die geforderte Ebenheit des Bleches verhindert.

Trotzdem muss die Möglichkeit der Wulstbildung untersucht werden, um eine vollständige, qualitative Beurteilung des neuen Schneidverfahrens durchführen zu können. Weiterhin ist der Verschleiß der Kerbe bei steigender Hubzahl ein Hauptproblem beim Feinschneiden (Birzer, 1996, S. 16). Um die Gefahr des Ausbrechens der Kerbe zu minimieren, müssen sich die Querkräfte auf beiden Seiten der Kerbschenkel ausgleichen. Aus diesem Grund sind die beiden Kerbschenkel A und B gleichschenkelig konstruiert und gefertigt.

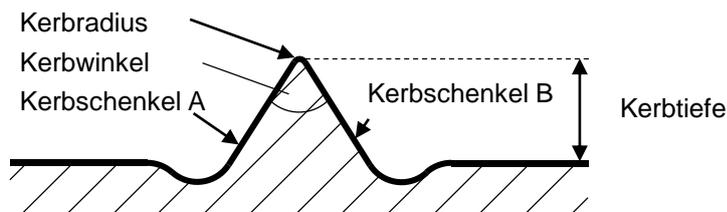


Abbildung 7-2: Detailzeichnung Kerbgeometrie

Die Parameter, welche die Geometrie der Kerbe ausmachen, sind die Kerbtiefe, der Kerbradius und der Kerbwinkel. Abbildung 7-2 zeigt eine schematische Darstellung des Kerbaktivelementes.

Schneidparameter

Nach der Kerbeinprägung folgt in einer weiteren Werkzeugstufe der Schneidprozess. Aus empirischen Erkenntnissen ist bekannt, dass der Schneidspalt einen Einfluss auf die Schnittflächenausprägung hat (Hörmann, 2008, S. 91–95). Da der Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit auf der Untersuchung der Schnittflächenausprägung beruht, muss der Einfluss des Schneidspaltes für das neue Verfahren näher untersucht werden.

Aufgrund fehlender Kenntnis des Einflusses der Kerbgeometrie auf das Scherschneidergebnis wird die Positionierung der Kerbe beim Scherschneiden grundlegend untersucht. Die Definition der Kerbposition erfolgt in Anlehnung an die Definition des Schneidspaltes und ist der Abbildung 7-3 zu entnehmen. Die Kerbspitze im Blech ist hierbei für die Positionierung der Ausgangspunkt (Nullpunkt). Befinden sich diese Kerbspitze und die Stempelmantelfläche senkrecht übereinander, so ist die Positionierung als null definiert. Eine negative Positionierung (Abbildung 7-3 a) entspricht einer Scherzone auf dem Kerbschenkel A (vom Nullpunkt in negative Blechlaufriichtung), während ein Schneiden in positiver Positionierung (Abbildung 7-3 b) einer Scherzone auf dem Kerbschenkel B entspricht (vom Nullpunkt in positive Blechlaufriichtung). Der Wert der Positionierung wird hierbei als horizontaler Abstand zwischen der Stempelmantelfläche und dem Kerbgrund definiert.

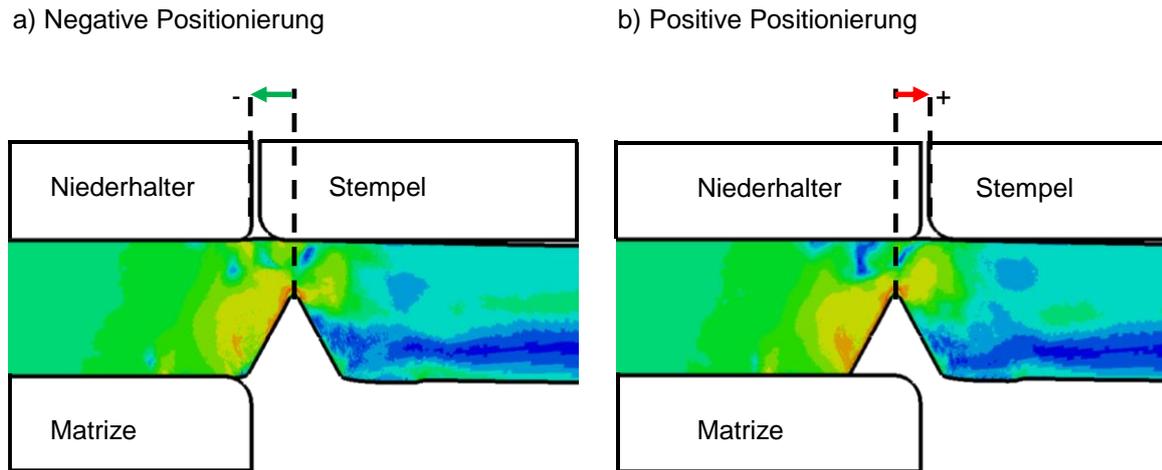


Abbildung 7-3: negative (a) und positive (b) Positionierung der Kerbe

7.2 Beschreibung des Versuchsplanes

Der für die Erkenntnisgewinnung des Forschungsprojektes durchzuführende Versuchsplan basiert auf dem Lösungsweg aus Kap. 3 (siehe Abbildung 3-1, S. 30). Zum Erreichen des Forschungsziels impliziert der Lösungsweg einen systematischen Versuchsplan, welcher in Abbildung 7-4 dargestellt ist.

Die Struktur des Versuchsplanes basiert auf folgendem Konzept: Die Durchführung eines Versuchsblockes erfolgt erst, wenn der vorherige Versuchsblock komplett abgeschlossen ist. Ergebnisse bzw. Erkenntnisse der vorherigen Versuchsreihe werden bei den folgenden Versuchen berücksichtigt, um sukzessive, in mehreren Schleifen durchgeführte Verbesserungen des Prägescherschneidens zu erreichen. Das neue Verfahren zwingt zu dieser Versuchsordnung, weil die Möglichkeiten eines Transfers der Versuchsergebnisse aus einem Versuchsblock auf nachfolgende Versuchsblöcke gegeben sein müssen. Deshalb folgt in diesem Kapitel die nähere Beschreibung der einzelnen Versuchsblöcke mit ihren Parametern. Die Nennung der Parameterkonfigurationen ist vor der Ergebnisdiskussion der einzelnen Versuchsblöcke im jeweiligen Unterkapitel der Versuchsblockkonfigurationen nachzulesen.

Die Differenzierung des Versuchsplanes erfolgt in Einzel- und Dauerhub. Für das Präge-Scherschneiden muss zunächst im Einzelhub der Einfluss der einzelnen Parameter und deren Konfigurationen auf das Schneidenresultat erforscht werden, um hiernach mit Parameterkonfigurationen, welche ein gratfreies Schneidenresultat erzielen, die Prozesssicherheit und -stabilität, sowie den Verschleiß der Aktivelemente und die Schnittflächenausprägungen im Dauerhub zu untersuchen.

Die gänzliche Unkenntnis über das neue Verfahren (Präge-Scherschneiden) bedingt grundlegende Untersuchungen (Versuchsblock 1 bis 3). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in den Ver-

suchsblöcken 4 bis 7 unter den Aspekten der Werkzeugvariation und Werkstoffvariation die Gratfreiheit untersucht. Um das neue Verfahren für die industrielle Massenproduktion zu verifizieren, erfolgen anschließend Dauerhubuntersuchungen (Versuchsblick 8).

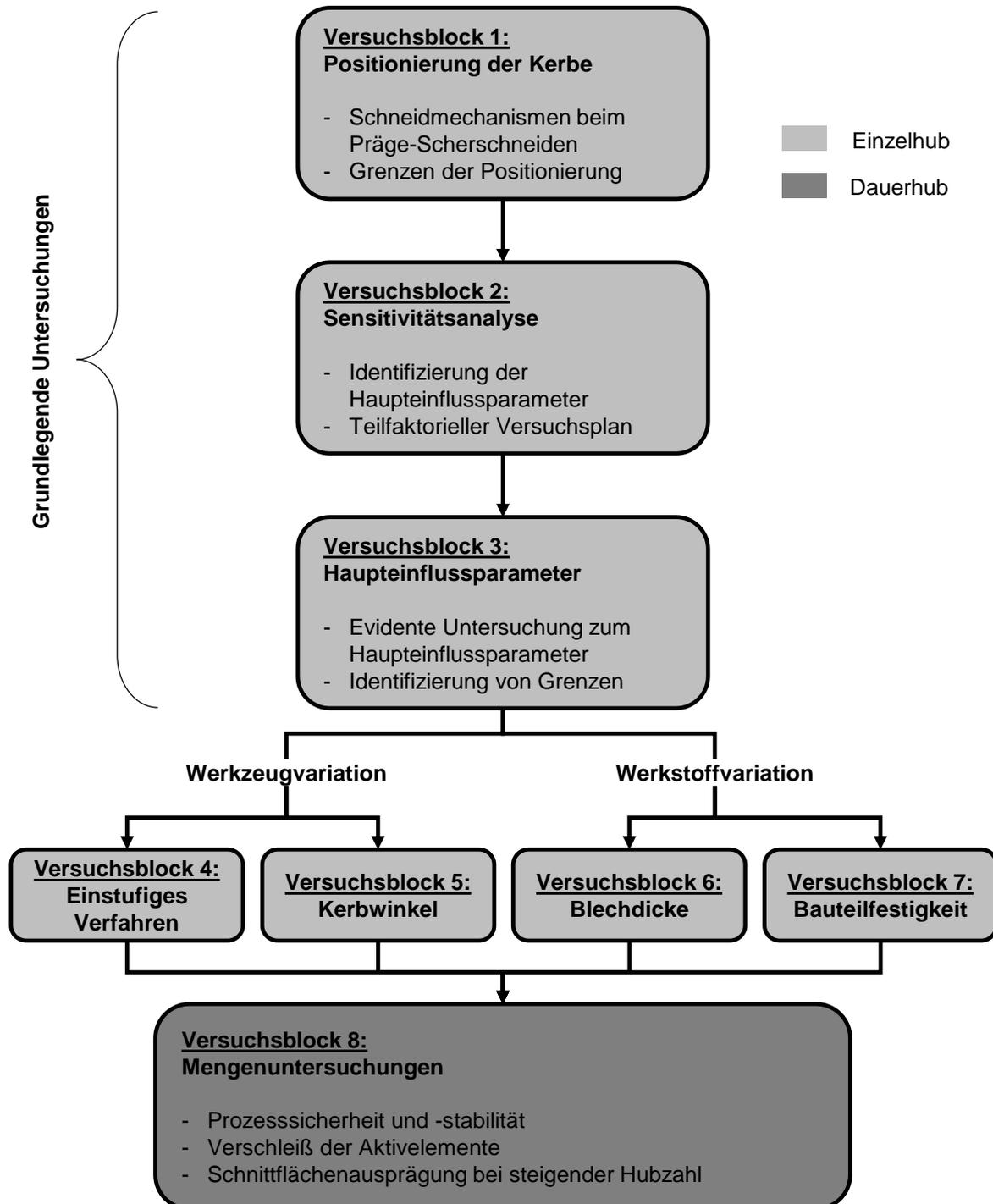


Abbildung 7-4: Versuchsplan

Versuchsblock 1: Positionierung der Kerbe

Nachdem die Kerbe ins Blech eingeprägt ist, erfolgt der Schneidprozess. Im Gegensatz zum Scherschneiden, bei dem keine Kerbe vorhanden ist, wird beim Präge-Scherschneiden vermutet, dass die Positionierung beim Präge-Scherschneiden die Schnittflächenausprägung beeinflusst. Ist die Kerbe beim Schneiden zu sehr von der Scherzone entfernt, so kann der gewünschte Effekt der Gratfreiheit nicht auftreten, und der Prozess entspricht wieder dem Normalschneiden. Aus diesem Grund erfolgt im ersten Versuchsblock eine eingehende Untersuchung zur Positionierung der Kerbe. Hierzu wird der offene und geschlossene Schnitt untersucht und ein adäquater Vergleich durchgeführt. Beispielhaft werden an jeweils zwei Kerbgeometrien die gratfreien Bereiche erforscht und die auftretenden Mechanismen erklärt.

Versuchsblock 2: Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe eines teilfaktoriellen Versuchsplanes erfolgt in diesem Versuchsblock die Veranschaulichung und Präzisierung der Haupteinflussparameter auf die Gratfreiheit. Der teilfaktorielle Versuchsplan ist hier sinnvoll, weil sich die Anzahl der Einzelversuche im Vergleich zum vollfaktoriellen Versuchsplan ohne wesentlichen Informationsverlust reduzieren lässt und trotzdem eine zuverlässige Auswertung erzielt werden kann (Siebertz, 2010, S. 26–55). Hierdurch wird die Relevanz der Prozessparameter für das Präge-Scherschneiden mit Hilfe statistischer Versuchsauswertung untersucht. Die zu untersuchenden Parameter im Versuchsblock zwei sind neben der Positionierung der Kerbe, die Kerbhöhe, der -radius und der Schneidspalt im offenen sowie geschlossenen Schnitt.

Versuchsblock 3: Haupteinflussfaktor

In diesem Versuchsblock erfolgt die Untersuchung der im zweiten Versuchsblock als Signifikant identifizierten Haupteinflussparameter jeweils mit adäquaten, unterschiedlichen Variablen. Ziel der Untersuchung ist zum einen die jeweiligen Grenzen der Haupteinflussfaktoren zu erforschen und weiterhin deren Ursache wissenschaftlich zu begründen.

Versuchsblock 4: Einstufiges Verfahren

Die Umsetzung des Präge-Scherschneidens erfolgt in den Versuchsblöcken 1 bis 3 in zwei voneinander getrennten Stufen (Präge- und Scherschneidprozess). Für eine industrielle Anwendung des Präge-Scherschneidens ist werkzeugtechnisch die Umsetzung von zwei getrennten Stufen nicht immer möglich. Daher soll in diesem Versuchsblock geklärt werden, ob mit Hilfe der erforschten Parameter (Versuchsblock 1-3) eine Umsetzung des neuen Verfahrens in nur einer Stufe denkbar ist. Für eine generelle Verfahrensüberprüfung wird in der vorliegenden Arbeit der offene Schnitt gewählt.

Die einstufige Variante des Präge-Scherschneidens erfolgt mit Hilfe einer veränderten Untermessergeometrie. Hierbei wird eine Kerbgeometrie an der Stirnfläche des Untermessers konstruiert.

Um die Frage der generellen Umsetzung des einstufigen Verfahrens zu klären, werden unterschiedliche Kerbgeometrien analysiert.

Versuchsblock 5: Kerbwinkel

In dieser Versuchsreihe soll der Parameter Kerbwinkel mit Hilfe der aus den vorherigen Versuchsblöcken gewonnenen Erkenntnisse modifiziert werden. Ein kleiner Kerbwinkel führt zu einer bedeutend geringeren Materialverdrängung als ein großer Kerbwinkel (bei gleicher Kerbtiefe). Deshalb erfolgt die Untersuchung des Kerbwinkels in einem gesonderten Versuchsblock, bei dem nur der Kerbwinkel (im offenen sowie geschlossenen Schnitt) variiert wird.

Versuchsblock 6: Blechdicke

Um die Erkenntnisse des neuen Verfahrens einem breiten Anwendungsfeld zu ermöglichen, werden in diesem Versuchsblock eingehende Untersuchungen über den Einfluss der Blechdicke auf das Schneidergebnis durchgeführt. Die Skalierung von prozesssicheren Parametereinstellungen des Präge-Scherschneidens (gratfreie Schnittflächen) in Abhängigkeit unterschiedlicher Blechdicken erfolgt mit dem Ziel, die funktionale Abhängigkeit der Blechdicke auf das Präge-Scherschneiden herauszufinden.

Versuchsblock 7: Werkstofffestigkeit

In diesem Versuchsblock erfolgt die Untersuchung des Einflusses der Werkstofffestigkeit auf das Schneidergebnis (im offenen Schnitt). Hierfür wird ein Blechwerkstoff mit zwei unterschiedlichen Festigkeitsklassen ausgewählt. Als Prämisse gelten weiterhin die Parametereinstellungen aus den vorherigen Versuchsblöcken.

Versuchsblock 8: Mengenuntersuchungen

In diesem Versuchsblock soll die grundlegende Frage geklärt werden: Inwieweit lassen die gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchsblöcken eins bis sieben eine Übertragbarkeit auf die industrielle Serienfertigung (Massenproduktion im Dauerhub) zu? Hierzu werden mit einer bestimmten Parameterkonfiguration, welche in den Versuchsblöcken eins bis sieben erforscht worden ist und die eine gratfreie Schnittfläche zur Folge hat, Dauerhubversuche mit bis zu 100000 Hüben durchgeführt. Dabei erfolgt an einem kostengünstigen Blechwerkstoff nach den Hubzahlen 0, 5000, 10000, 20000, 40000, 60000, 80000, 100000 eine Vermessung und Bewertung der Aktivelemente, sowie die Vermessung der Schnittflächengeometrie. Das Ziel der Untersuchung ist es, die Sicherheit und Stabilität des Präge-Scherschneidens in der Massenproduktion zu verifizieren. Mögliche Prozessstörungen, wie zum Beispiel Flitter, können durch die Anzahl der Hübe quantitativ festgestellt werden.

Zusätzliche Dauerhubuntersuchungen (Vermessung der Aktivelemente und der Schnittflächenausprägung nach gleichen Hubintervallen wie beim kostengünstigen Blechwerkstoff) an einem höherfesten Blechwerkstoff sind vorgesehen, um einen Vergleich zwischen Blechwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeitsklassen durchführen zu können.

7.3 Simulationsprogramm und -modell

Die Vielzahl der möglicherweise einflussreichen Parameter und deren Einstellungen beim Präge-Scherschneiden können aus ökonomischen und zeitlichen Gründen nicht vollfaktoriell mit Experimenten untersucht werden. Neben der statistischen Versuchsplanung wird das Simulationsmodell Abaqus/Explicit v6.10 genutzt, um Erkenntnisse über das neue Verfahren zeitlich effizient zu erhalten. Der große Vorteil der realitätsgetreuen Nachbildung des Präge-Scherschneidens mit Hilfe der Simulation liegt in der visuellen Darstellung des gesamten Präge- und Schneidvorganges. Die Versagensmechanismen, das Ursache-Wirkung-Verständnis sowie das Verständnis von möglichen Grenzen des neuen Schneidprozesses können durch die Simulation zweifelsfrei interpretiert und erklärt werden. Erst mit diesem Wissen kann eine ganzheitliche, ergebnisorientierte Interpretation und Bewertung des Präge-Scherschneidens erfolgen.

Das Simulationsprogramm Abaqus/Explicit v6.10 verfügt über eine Grafikoberfläche zum Erstellen der Geometrien, sowie über die Möglichkeit der automatischen Vernetzung der gewählten Geometrien. Durch möglichst genaue Abbildung des Prozesses, sowie adäquater Materialcharakterisierung wird das reale Verhalten in der Simulation hinreichend genau abgebildet. Trotz geringfügiger Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse im Vergleich zur Realität können Tendenzen eindeutig abgeleitet werden (siehe Kap. 2.8, S. 20-21). Abbildung 7-5 zeigt die Modellbildung des Präge-Scherschneidens, umgesetzt in den beiden Stufen Prägen und Scherschneiden. Die Diskretisierung erfolgt nach der Lagrangen Beschreibung (Zienkiewicz und Taylor, 2000, S. 172–174). Um eine bessere Abbildung der Genauigkeit zu erlangen, wird der Bereich der Kerbeinprägung bzw. die Scherzone beim Schneidprozess feiner diskretisiert als der Randbereich. Außerhalb der Scherzone existiert eine sukzessiv größer werdende Vernetzung (maximale Kantenlänge: 0,25 mm), da hierdurch die Rechenzeit deutlich geringer ausfällt. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt 72909 bei 73473 Knoten. Um die Schneidsimulation möglichst detailgetreu abzubilden, erfolgt eine sehr feine Diskretisierung im Bereich der Scherzone (minimale Kantenlänge: 0,002 mm x 0,005 mm). Mit dieser Beschreibung der Lagrangen Diskretisierung können auch kleine Radien im Blechwerkstoff detailgetreu nachgebildet werden (Wriggers, 2001, S. 101–115). Bei der gewählten Diskretisierung ist zu beachten, dass große Deformationen und komplexe Zusammenhänge, wie z. B. Dehnrates und Temperatur, während der Simulation nur sehr ungenau abgebildet werden können (siehe Kap. 2.8, S. 20). Hierdurch treten geringe Ungenauigkeiten bei der Abbildung der Realität auf.

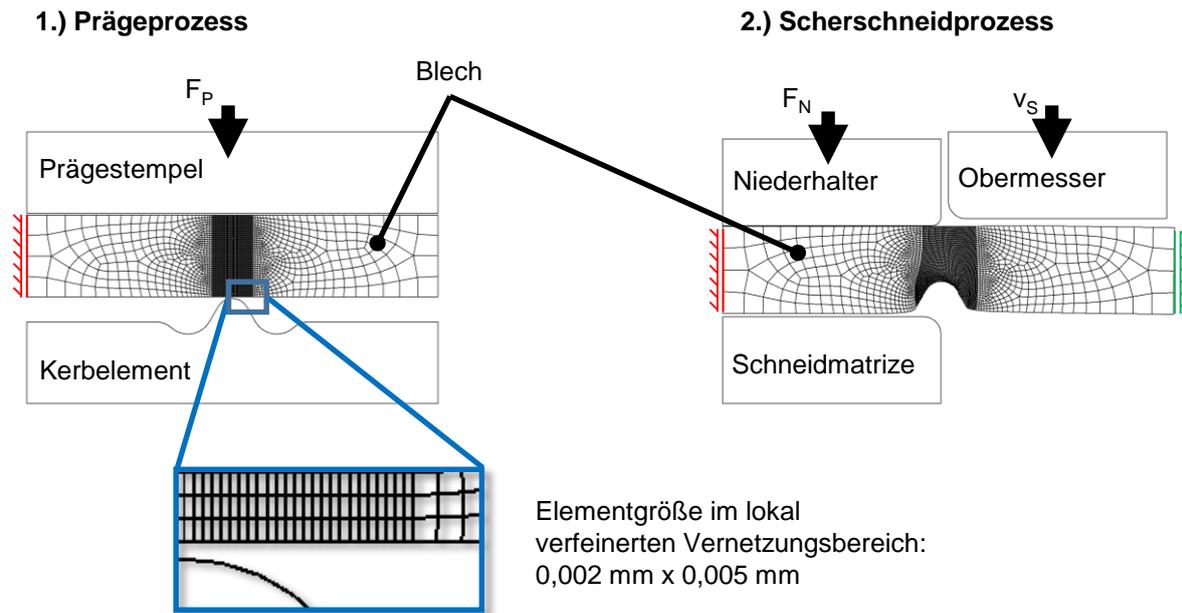


Abbildung 7-5: Prägestufe (links) und Scherschneidstufe (rechts) mit Vernetzung und Detailansicht

Wie auch in der Realität besteht die Simulation des Präge-Scherschneidens aus zwei Prozessschritten. Anfangs wird die Einprägung der Kerbgeometrie in das Blech simuliert, gefolgt vom Schneidprozess. Wegen des erheblichen Größenunterschiedes zwischen der Blechbreite und der Blechdicke erfolgt die Modellbildung zweidimensional im ebenen Dehnungszustand (Nothhaft, 2014, S. 60). Hierdurch wird die Rechenzeit durch die geringere Anzahl von Elementen effizient verkürzt.

Als Randbedingungen der Simulation betragen die Niederhalterkraft F_N wie bei den Versuchen 19,2 kN und die Stempelbewegung 80 mm/s. Die Schneidkanten der Aktivelemente werden wie in den Einzelhubexperimenten mit 0,2 mm verrundet. Beim Präge- und Schneidprozess wird die horizontale Bewegung der Knoten am linken Ende des Blechstreifens blockiert (siehe rote Markierung in Abbildung 7-5, S. 63), beim Schneidprozess im geschlossenen Schnitt zusätzlich auch die horizontale Bewegung der Knoten am rechten Ende des Blechstreifens (siehe grüne Markierung in Abbildung 7-5, S. 63). Auf diese Weise wird der Hauptunterschied zwischen den beiden Schneidarten Abschneiden und Lochen dargestellt, welcher im Abknicken des Blechstreifens beim offenen Schnitt besteht (siehe Kap. 2.2, S. 5-11).

Zusätzlich zu den geringen Elementkantenlängen in der Scherzone wird das Arbitrary-Lagrangian-Eulerian-Verfahren (kurz: ALE) verwendet. Mit diesem Verfahren werden große Elementverzerungen bedingt durch die hohen Umformgrade in der Scherzone unterbunden. In der Topologie der Vernetzung macht sich dies durch eine Knotenverschiebung unabhängig von der Geometrie bemerkbar (adaptive Netzanpassung). Der hier gewählte Elementtyp (CPE4R) ist speziell für den ebenen Dehnungszustand ausgelegt und charakterisiert sich in seiner bilinearen Struktur, verringerten Integration sowie der hourglass control. Die Berücksichtigung des hourglass Effektes ist

für die korrekte Beschreibung des Schneidprozesses von essentieller Bedeutung, da bei expliziten Simulationen mit reduzierter Integration für die Berechnung von Kräften und Dehnungen lediglich die Differenzen der Koordinaten der diagonal gegenüberliegenden Ecken des Elementes berücksichtigt werden. Bleiben diese Differenzen gleich entsteht keine Änderung der Dehnungen bzw. Kräfte im Element, obwohl es zu einer Geometrieänderung des Elementes kommt. Bei mehreren Elementen entsteht ein sanduhrenförmiges (hourglass) Verformungsmuster. Diese physikalisch unsinnige Beschreibung der Deformationen wird mit der Hourglass-Dämpfung unterbunden (Gebhardt, 2011, S. 67–70). Um das Ergebnis der Simulation nicht zu verfälschen, darf die Hourglass-Dämpfung nicht mehr als 5 bis 10% der inneren Energie betragen.

Die Aktivelemente (Niederhalter, Ober- und Untermesser) werden in der Präge- sowie Scherschneidsimulation als starr konkretisiert (Wriggers, 2001, S. 130–131), da der elastische Einfluss der Aktivelemente nur sehr gering und weiterhin nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit ist. Bei einer solchen Diskretisierung der Aktivelemente aus starren Körpern verkürzt sich die Rechenzeit, da ein „rigid body“ nicht aus Knoten besteht und somit keine Berechnung der Dehnungen und Spannungen für diesen Körper erfolgt. Das Blech wird nach dem elasto-plastischen Materialmodell beschrieben, da zum einen die Materialwerte (Elastizitätsmodul, Dichte, Querkontraktionszahl und Fließkurve) für dieses Modell standardmäßig vorhanden sind, und zum anderen ist hierdurch eine solide Beschreibung des Materials mit den hinreichenden Genauigkeiten sichergestellt (siehe S. 62, erster Abschnitt). Die plastische Materialbeschreibung erfolgt mit dem dehnratenabhängigen Modell nach Cowper-Symonds (7.1). Es gilt folgende Formel:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0(\varepsilon) * \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (7.1)$$

mit ε	Dehnung [-]
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrates [1/s], zeitl. Änderung der Vergleichsdehnung
$\sigma_0(\varepsilon)$	Fließkurve (quasistatisch) [N/mm ²]
p	Koeffizient [-]
D	Koeffizient [-]

Bei dieser Materialbeschreibung wird die quasistatische Fließkurve um einen dehnratenabhängigen Faktor erweitert, wodurch eine Anpassung an die Umformgeschwindigkeit erfolgt (Hallquist, 2006). Am Beispiel des Werkstoffes DC04 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven bei unterschiedlichen Dehnraten in Abbildung 7-6 dargestellt (Carless, 2005, S. 202). Die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit bei der Fließkurvenbeschreibung ist bei Scherschneidsimulationen von

großer Bedeutung, da in der Realität während des Schneidvorganges hohe Dehnraten in der Scherzone auftreten und nur mit Hilfe der dehnratenabhängigen Materialcharakterisierung eine solide Abbildung der Realität erfolgen kann. Durch die Berücksichtigung der Dehnraten in der Fließkurvenbeschreibung wird bei richtigen Parametern von Cowper-Symonds (Koeffizienten p und D) in der Scherzone zu jedem Zeitpunkt die korrekte (real auftretende) Fließspannung verwendet.

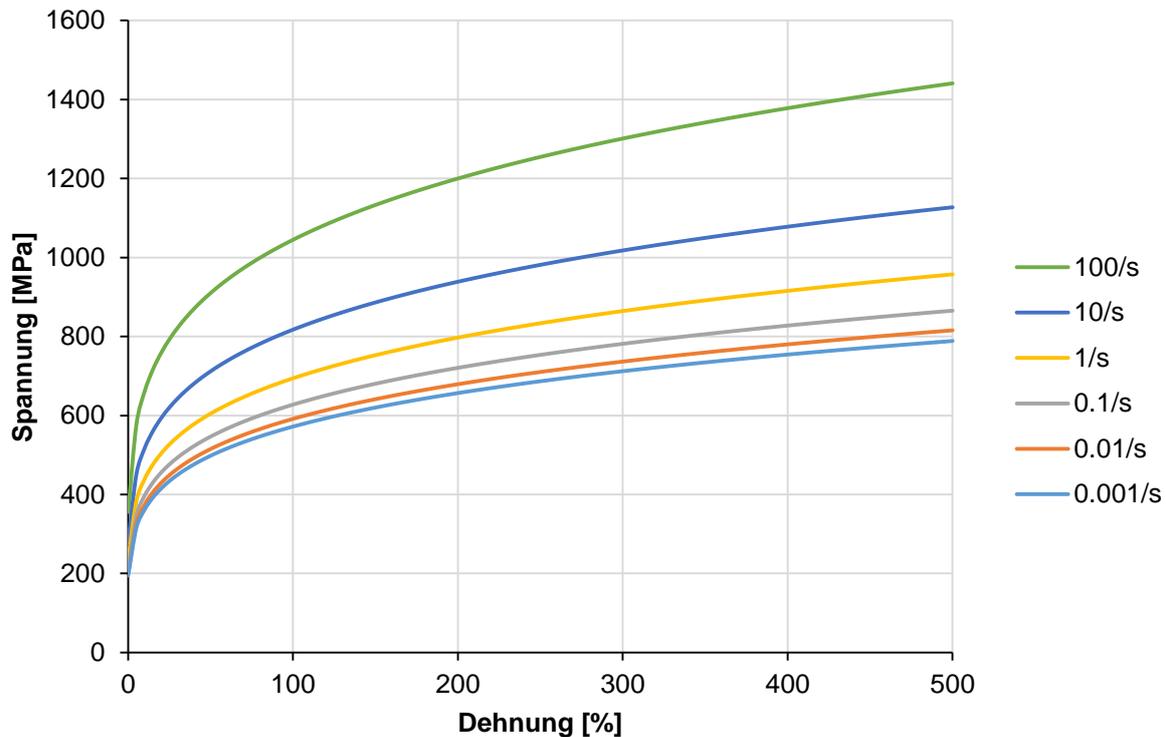


Abbildung 7-6: Dehnratenabhängigkeit nach Cowper-Symonds (Werkstoff DC04)

Um die Simulation effizient und mit kurzer Rechenzeit zu gestalten, wird auf das Mittel der Massenskalierung zurückgegriffen. Im Allgemeinen ist der Zeitschritt sehr klein, wenn die Elemente wie in Abbildung 7-5 (siehe S. 63) ein ungünstiges Verhältnis von Masse zu Steifigkeit aufweisen. In diesem Fall sind viele kleine Zeitschritte zur Durchführung der Simulation notwendig und die Rechenzeit ist dementsprechend hoch. Durch die Verwendung der Massenskalierung mit 10^{-6} Sekunden wird bei allen Elementen, deren Zeitschritt ohne Massenskalierung kleiner ist als der Zielzeitschritt, eine zusätzliche Masse addiert. Die zusätzliche Masse führt zu einem besseren Verhältnis von Masse zu Steifigkeit, der kritische Zeitschritt wird größer, wodurch weniger Zeitschritte zur Durchführung der Simulation benötigt werden. Deutlich kürzere Rechenzeiten sind die Folge (Belytschko et al., S. 337). Nachteilig bei der Verwendung der Massenskalierung ist die Gefahr von dynamischen Schwingungen. Allerdings beträgt im vorliegenden Simulationsmodell die dynamische Energie nur maximal 0,41% der Gesamtenergie. Das Auftreten dynamischer Schwingungen ist somit vernachlässigbar gering.

Bruchkriterium

Zur Darstellung des Bruches beim Scherschneiden ist ein Bruchkriterium erforderlich. Allgemein ist das Bruchkriterium die Bedingung unter der ein Element in der Simulation gelöscht wird und somit Materialtrennung eintritt (Kienzler, 1993). Die Wahl des geeigneten Bruchkriteriums ist in der vorliegenden Forschungsarbeit von hoher Bedeutung für eine originalgetreue Modellierung des Präge-Scherschneidens. Gerade die Rissinitiierung und das -wachstum müssen bei den verwendeten Blechwerkstoffen sinnvoll nachgebildet werden, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Schnittflächenkennwerte besitzen (siehe Kap. 2.4, S. 13). Als Bruchkriterium wird das von BMW und MATFEM entwickelte Bruchmodell CrachFEM mit isotroper Plastizität nach v. Mises verwendet (Hooputra, H., et al., 2004), da das duktile Bruchverhalten der zu untersuchenden Blechwerkstoffe mit diesem Bruchkriterium sehr realitätsnah abgebildet werden kann. Dieses Bruchkriterium berücksichtigt neben der Rissinitiierung und dem -wachstum auch die unterschiedlichen Dehnungszustände im Material. Hierdurch ist (bei richtiger Einstellung der Parameter) eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit realen Schnittflächenausprägungen sichergestellt (Stahl, 2015, S. 102–106). Hierbei gilt die Prämisse, dass die äquivalente plastische Dehnung $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ eine Funktion der Triaxialität η und der Dehnrate $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ist:

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = f(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}) \quad (7.2)$$

$$\text{mit } \eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = -\frac{p}{q} \quad (7.3)$$

$\bar{\epsilon}_D^{pl}$	Dehnung [-]
$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$	Dehnrate [1/s]
η	Spannungstriaxialität [-]
σ_H	Hydrostatische Spannung [MPa]
σ_V	Vergleichsspannung [MPa]
p	Druck [MPa]
q	Äquivalente Spannung (v. Mises Spannung) [MPa]

Der Schadensbeginn erfolgt, wenn mit Hilfe der Zustandsvariabel ω_D die Bedingung 7.4 erfüllt ist.

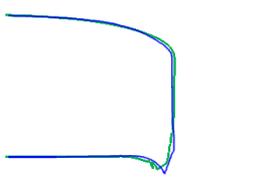
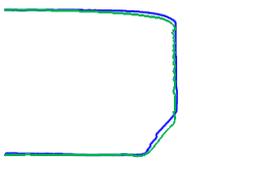
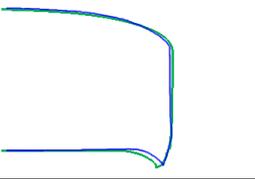
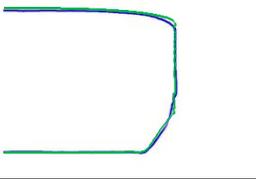
$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl} = f(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (7.4)$$

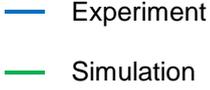
mit ω_D Zustandsvariabel [-]

Zu Beginn des Schneidprozesses ist die Zustandsvariabel $\omega_D = 0$. Bei fortschreitender plastischer Verformung nimmt ω_D konstant zu, bis beim Wert eins die Steifigkeitsmatrix abnimmt und Werkstoffschädigung auftritt.

Mit Hilfe der inversen Angleichung der Schnittflächen erfolgt die präzise Einstellung der Schädigungskurve. Diese Methodik besteht in der Variation der Versagenskurve mehrerer Iterationschleifen bis die Simulationsergebnisse der Schnittflächenausprägung mit denen der Realität hinreichend gut übereinstimmen. Tabelle 7-1 zeigt den Vergleich zwischen realen und simulierten Schnittflächen für ausgewählte Parametereinstellungen beim Normalschneiden und beim Präge-Scherschneiden. In der Tabelle ist eine adäquate Übereinstimmung der realen und simulierten Schnittflächenausprägungen erkennbar.

Tabelle 7-1: Vergleich der realen und simulierten Schnittflächenausprägungen

	Normalschneiden	Präge-Scherschneiden
offen		
geschlossen		



Damit die Simulationsergebnisse keine Randwertparameter darstellen, bei denen nur bestimmte Parametereinstellungen die Realität abbilden, erfolgt die Validierung des Simulationsmodells durch Änderungen der Schneid- und Kerbparameter (Schneidspalte: 6%, 8%, 10%, Kerbtiefe: 0,4 mm und 0,6 mm, Kerbposition: -0,1 mm, 0 mm, +0,1 mm). Bei allen Parametereinstellungen sind nur geringe Unterschiede zwischen Realität und Simulation zu erkennen. Das Ergebnis der Validierung des Bruchkriteriums zeigt eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation bei der hier angewandten Methodik der inversen Angleichung der Schnittflächen.

7.4 Schnittflächenvermessung

Für eine qualitative und quantitative Beurteilung des Einflusses der Parameter und deren Konfigurationen ist die Vermessung der Schnittfläche erforderlich. Hierfür wird das Profilmessgerät MarSurf XCR 20 mit dem Tastschnittverfahren verwendet (siehe Kapitel 4.2.5, S. 36). Die Schnittflächen des offenen und geschlossenen Schnittes werden mit Hilfe der Doppeltastspitze PVC 350 +- 9 mm vermessen. Hierbei tastet die Doppeltastspitze zuerst mit ihrer unteren Tastnadel die

Blechoberseite ab und hiernach mit der anderen Tastnadel die Blechunterseite. Danach erfolgt die Ausgabe der vermessenen Schnittflächenkontur am PC. Mit Hilfe der Auswerteinheit MarWin XC 20 können die relevanten Schnittflächenkenngrößen (Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruch- und die Grathöhe) nach VDI-Richtlinie 2906 bestimmt werden. In jeder Versuchskonfiguration werden jeweils drei schergeschnittene Teile vermessen, um die Signifikanz des arithmetischen Mittelwertes zu festigen. Alle Versuchsbauteile haben im Schraubstock durch Anschläge die gleiche Positionierung, um eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu erzielen.

Trotz des Hauptziels der Gratfreiheit werden die Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen- und Grathöhe ausgewertet, um ein ganzheitliches Bild über das neue Verfahren zu bekommen. Wird nur die Grathöhe dargestellt, so ist die Betrachtung lückenhaft, da das neue Verfahren trotz Gratfreiheit einen negativen Einfluss auf die anderen Schnittflächenkenngrößen haben kann. Das Auswertemerkmal ist somit die *gesamte* Schnittfläche.

7.5 Vermessung der Kerb- und Schneidaktivelemente

Die Vermessung der Kerb- und Schneidaktivelemente erfolgt bei den Dauerhubuntersuchungen auch mit dem Tastschnittverfahren. Hierfür wird wiederum das Profilmessgerät MarSurf XCR 20 verwendet (siehe Kap. 4.2.5, S. 36). Die Vermessung erfolgt mit Hilfe der Tastspitze PVC 350 + 59 mm. Für den geschlossenen Schnitt werden neben der Kerbe, der Stempel und die Matrize an jeweils vier wiederholgenauen Messpositionen in einem Winkelabstand von jeweils 90° in der Einspannvorrichtung vermessen. Die Vermessung des geschlossenen Schnittes erfolgt an jeweils vier Positionen an der Kerbe, sowie an vier Positionen (zwei mittig, zwei außen) am Unter- bzw. Obermesser. Im offenen Schnitt sind die zwei mittigen Positionen an den Messern dem Prägescherschneiden zuzuordnen, während die äußeren Positionen dem Vorgang des Normalschneidens entsprechen.

8 Versuchskonfigurationen, -ergebnisse und Diskussion

Die Interdependenz der Versuchsblöcke bedingt eine Beschreibung der jeweiligen Versuchskonfiguration für eine sinnvolle Ergebnisdeutung. Jeder Versuchsblock wird einzeln betrachtet, da seine Ergebnisse die Konfigurationen des folgenden Versuchsblockes stark beeinflussen. Durch diese Vorgehensweise erfolgt eine zielorientierte Erkenntnisgewinnung zur gesamtheitlichen Erforschung des Präge-Scherscheidens im Einzel- und Dauerhub.

8.1 Versuchsblock 1: Positionierung der Kerbe

8.1.1 Versuchskonfigurationen

Die Idee des gratfreien Schneidens wird in diesem Versuchsblock unter der Prämisse folgender konstanter Parameter untersucht: Schneidspalt (8%), Blechdicke (1 mm) und Kerbradius (0,05 mm). Die gewählten Parametereinstellungen gelten für den offenen und geschlossenen Schnitt. Um die Mechanismen des gratfreien Schneidens herausarbeiten zu können, werden zwei Konfigurationen von Kerbtiefen untersucht (0,4 mm und 0,6 mm). Die Auswahl der Kerbtiefen erfolgt basierend auf der Theorie des gratfreien Schneidens, die besagt, dass aufgrund frühzeitiger Werkstofftrennung keine Gratbildung entsteht (siehe Kap. 2.11, S. 27). Um einen Vergleich unterschiedlicher Blechwerkstoffe zu ermöglichen, werden die Blechwerkstoffe Tiefziehstahl (DC04), Edelstahl (1.4301), Aluminium (AA6014) und Kupfer (CuSn6) untersucht. Aus der Kombination der Einstellungen zweier Kerbtiefen, vier Blechwerkstoffen und zwei Schneidarten (offen und geschlossen) ergeben sich 16 Versuchsreihen. Alle 16 Versuchsreihen werden bezüglich der Positionierung getrennt voneinander durchgeführt, um die Grenzbereiche der Gratfreiheit für positive und negative Positionierung der Kerbe schrittweise festzustellen. Während beim offenen Schnitt eine Änderung der Positionierung problemlos über die Endmaße erfolgt (siehe Kap. 6.2.4, S. 50-52), ist beim geschlossenen Schnitt eine Änderung der Positionierung ausschließlich mit einem weiteren (kostenintensiven) Kerbaktivelement möglich. Daher erfolgt im geschlossenen Schnitt die Untersuchung unterschiedlicher Kerbpositionierungen nicht wie im offenen Schnitt hauptsächlich durch experimentelle Untersuchungen, sondern anhand der Simulation, welche durch Stützstellen (minimale Anzahl an Realversuchen) mit der Realität verifiziert werden.

8.1.2 Versuchsergebnisse

Offener Schnitt

Zuerst werden die grundlegenden, auftretenden Mechanismen des Präge-Scherschneidens am Stahlwerkstoff DC04 mit einer Kerbtiefe von 0,6 mm erklärt. Hiernach folgt ein Vergleich zum Kerbelement mit der Kerbtiefe von 0,4 mm, um die Positionierung für unterschiedliche Kerbtiefen

zu berücksichtigen. Abschließend werden die Grenzen der Positionierung für unterschiedliche Werkstoffe analysiert.

Abbildung 8-1 zeigt das eingekerbte Blech im Querschnitt (metallografischer Schliff) bei einer Kerbtiefe des Kerbaktivelementes von 0,6 mm. Die Kerbtiefe im Blech beträgt 0,57 mm, was einer prozentualen Eindringung des Kerbaktivelementes von 95 % entspricht. Die Einprägung der Kerbe ins Blech in den durchgeführten Versuchen ist nie 100%, sondern liegt zwischen 95 und 97%. Dies begründet sich zum einen in der elastischen Rückfederung des Blechwerkstoffes und zum anderen in der zunehmenden Behinderung der Kerbeinprägung durch die Kaltverfestigung und zusätzlichen Materialverdrängung infolge fortschreitender Kerbeindringung.

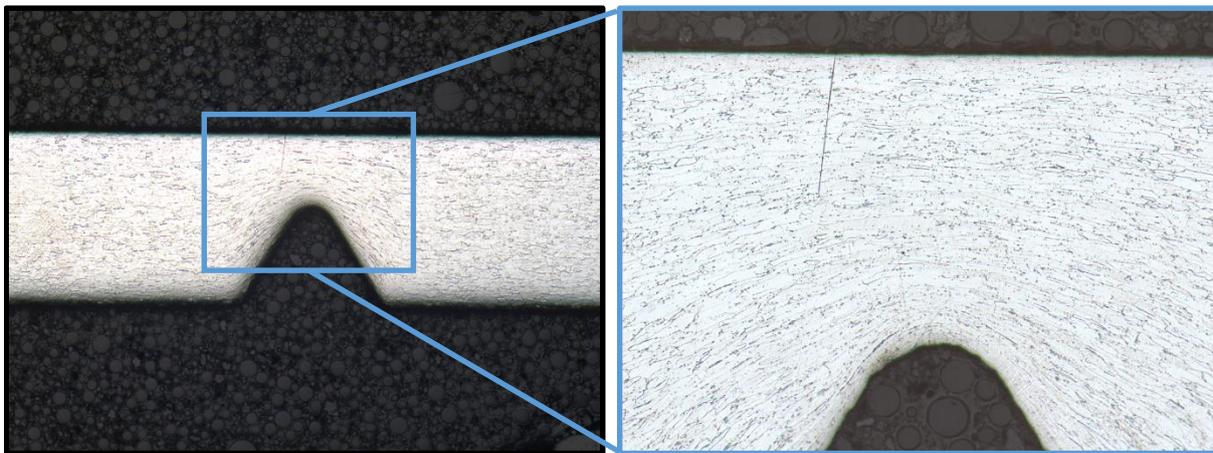


Abbildung 8-1: Metallografischer Schliff der Kerbeinprägung mit Vergrößerung des Bereiches um den Kerbgrund

In Abbildung 8-1 ist deutlich erkennbar, dass die Materialverdrängung infolge der Kerbeinprägung nicht zu einer Wellenbildung im Blech führt. Weiterhin zeigt der Verformungsmartensit eine deutliche Strukturänderung um den Bereich der Kerbspitze verglichen mit dem Grundzustand nach dem Walzprozess. Durch die Kerbeinprägung werden die Körner in diesem Bereich zusammengedrückt und verlaufen kurvig um den Bereich der Kerbspitze. Durch diese Veränderung der Mikrostruktur steigt im Bereich um die Kerbe die Härte an.

Die Abbildung 8-2 zeigt die Schnittflächenkenngrößen (Ordinate) für den Werkstoff DC04 in Abhängigkeit zur Positionierung der Kerbe (Abszisse) bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm. Es sind die Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen-, sowie Schnittgrathöhe in Abhängigkeit der Positionierung dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen die Werte der Schnittflächenkenngrößen aus den Referenzmessungen (Normalschneiden im offenen Schnitt). Die Schnittflächenkenngrößen des Präge-Scherschneidens sind als durchgezogene Linien zu erkennen. Der grüne Bereich entspricht einer gratfreien Schnittfläche, während hingegen der rote Bereich einer Schnittfläche mit Grat entspricht. Deutlich erkennbar ist, dass mit dem neuen Verfahren eine gratfreie Schnittfläche im Bereich der Positionierung von 0 mm bis -0,17 mm möglich ist.

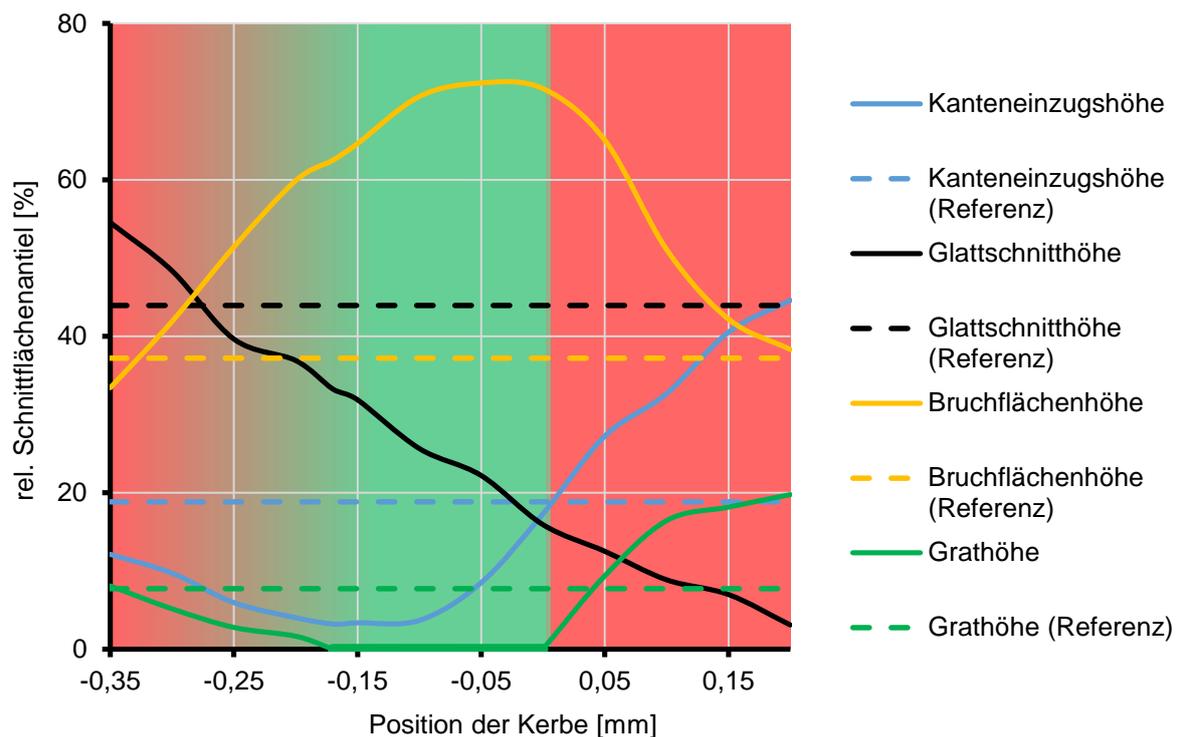


Abbildung 8-2: Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm (DC04, offener Schnitt)

Im Bereich der positiven Positionierung der Kerbe ist keine Gratfreiheit möglich, und die Grathöhe steigt mit positiver werdender Positionierung an. Bei einer Positionierung der Kerbe (im negativen Bereich) über den gratfreien Bereich hinausgehend, steigt die Schnittgrathöhe mit negativer werdender Positionierung an, bis die Grathöhe den Wert der Grathöhe beim Normalschneiden erreicht hat. Die Bruchflächenhöhe beträgt bei einer Positionierung der Kerbe von 0 mm das Maximum von 72% und fällt dann im Bereich negativer sowie positiver Positionierung ab. Die Glattschnitthöhe verzeichnet einen fast linearen Anstieg in Richtung negativer werdender Positionierung. Die Kanteneinzugshöhe erreicht ihr Minimum (5%) bei minimal negativer Positionierung mit Gratfreiheit.

Um den Verlauf der Schnittflächenkenngrößen beim Präge-Scherschneiden präzise nachzuvollziehen, erfolgt ein Vergleich zwischen den sechs Phasen des Scherschneidens (siehe Kap. 2.2, S. 5-11) und den entsprechenden Phasen beim Präge-Scherschneiden. Dieser Vergleich berücksichtigt beim Präge-Scherschneiden jeweils einem Schneidvorgang mit positiver (Positionierung der Kerbe: +0,1 mm) beziehungsweise negativer Positionierung (Positionierung der Kerbe: -0,1 mm) der Kerbe. Die ersten beiden Phasen des Scherschneidens (Aufsetzen des Niederhalters und Stempels sowie die elastische Verformung und beginnende Plastifizierung, S. 5-7) unterscheiden sich zum Normalschneiden nur geringfügig und können somit nicht der Grund für die unterschiedlichen Schnittflächenprägungen bei positiver bzw. negativer Positionierung sein. Hingegen zeigen

sich wesentliche Disparitäten in den folgenden zwei Phasen des Scherschneidens (Fortschreitende Scherdeformation sowie Rissbeginn, -fortschritt und Teilung des Materialzusammenhaltes, siehe S. 8-10) hinsichtlich der unterschiedlichen Positionierung der Kerbe.

In Phase 3 findet beim Normalschneiden erstmalig plastische Formänderung des Blechwerkstoffes statt (siehe Abbildung 2-6, S. 7-9). Abbildung 8-3 zeigt die entsprechende Phase beim Prägescherschneiden (positive und negative Positionierung) unter der Prämisse gleicher Stempelpositionen.

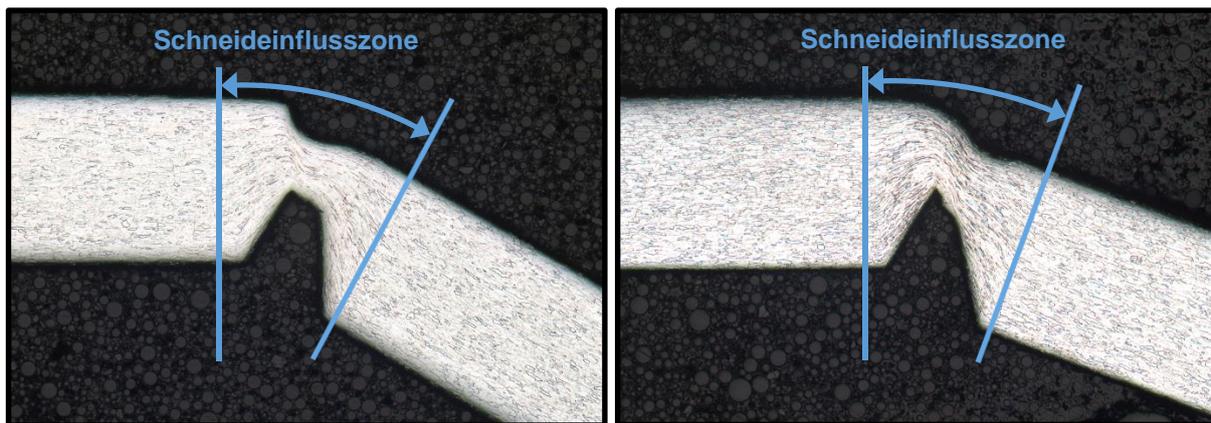


Abbildung 8-3: Metallografische Schlitze der plastischen Verformung bei positiver (rechts) und negativer (links) Kerbpositionierung

Deutlich erkennbar ist, dass die Kerbtiefe in der Abbildung 8-3 links nicht mehr der ursprünglichen Kerbtiefe von 0,57 mm entspricht, sondern nur noch etwa 0,5 mm tief ist. Aufgrund der Druckspannungen im Blech ist es bei der Positionierung in negativer Richtung (Abbildung 8-3, links) zu einem geringen Umklappvorgang im oberen Bereich des Kerbschenkels A gekommen. Der Kerbschenkel A ist durch die Stempelbewegung an seiner Spitze nach unten weggeklappt, sichtbar durch die geometrische, linienförmige Ausprägung zwischen Kerbschenkel A und B (Abbildung 8-3, links). Bei positiver Positionierung ist dieser ausgeprägte Umklappvorgang nicht sichtbar. Grund hierfür ist, dass der Kerbschenkel B, welcher sich in der Scherzone befindet, bereits bei geringen Druckspannungen zu geringem Abknicken führt und somit annähernd parallel zur Stempelrichtung verläuft, wodurch kein weiteres Umklappen mehr erfolgt. In der Abbildung 8-3 sind unterschiedliche Kanteneinziehungshöhen deutlich erkennbar. Während beim Prägescherschneiden mit negativer Positionierung von -0,1 mm die Kanteneinziehungshöhe mit 5% (0,048 mm) sogar kleiner als beim Normalschneiden ist (siehe Abbildung 2-6, S. 8), besteht bei positiver Positionierung in der Abbildung 8-3 mit 30% (0,29 mm) eine bedeutend größere Kanteneinziehungshöhe. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Umklappvorgänge in der Scherzone. Während beim Prägescherschneiden mit negativer Positionierung sich der Kerbschenkel A in der Scherzone be-

findet und die nötige Spannung zum Umklappen erst durch fortschreitende Stempelbewegung aufgebaut werden muss, ist dieser Umklappvorgang bei positiver Positionierung (Kerbschenkels B in der Scherzone) nicht so stark ausgeprägt. Für den Umklappvorgang der Kerbspitze müssen zuerst hohe Druckspannungen über dem Kerbschenkel A erreicht werden (bei negativer Positionierung), bevor es zum Umklappvorgang kommt. Bei einer Positionierung der Kerbe in positiver Richtung (siehe Abbildung 8-3, rechts, S. 72) befindet sich der Kerbschenkel B durch geringes Abknicken schon annähernd parallel zur Stempelrichtung, und ein ausgeprägter Umklappvorgang, wie bei der Positionierung der Kerbe in negativer Richtung, findet nicht statt. Daher bauen sich bei fortschreitender Hubzahl auch keine so hohen Druckspannungen wie bei negativer Positionierung auf. Metallphysikalisch begünstigen diese geringeren Druckspannungen die plastische Umformung, da die Versetzungen bei geringen Druckspannungen in ihrer Bewegung nur geringfügig eingeschränkt sind. Eine große Kanteneinzugsgröße ist die Folge (Abbildung 8-4, rechts). Zusätzlich ist der schlagartige Kontakt des Blechwerkstoffes mit dem Untermesser aufgrund des Abknickvorganges schädlich, da es zu erhöhtem Verschleiß am Untermesser kommt.

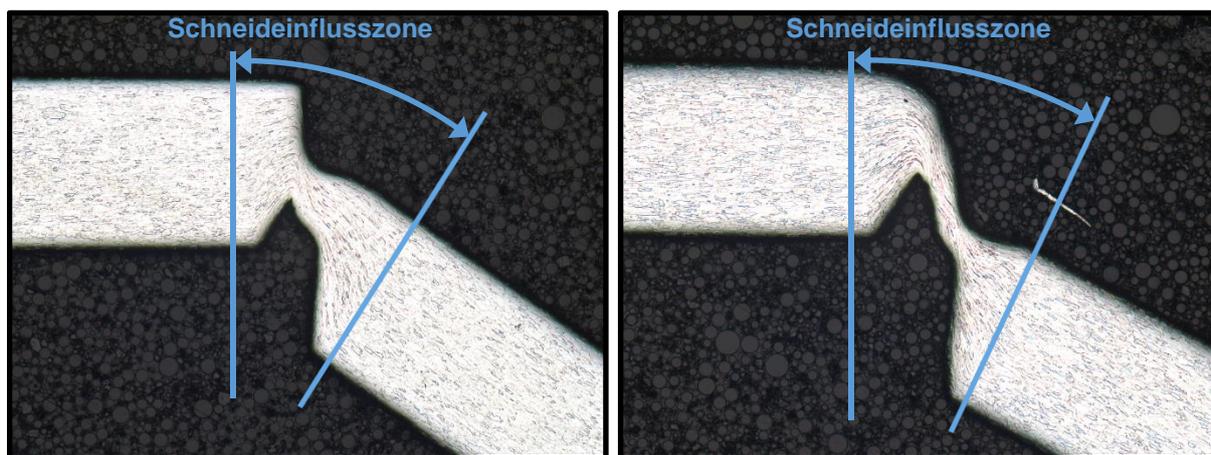


Abbildung 8-4: Metallografische Schlitze kurz vor Rissbeginn bei positiver (rechts) und negativer (links) Kerbpositionierung

Bei fortschreitender Stempelbewegung kommt es nach Ausbildung des Kanteneinzugsradius zur Ausbildung des Glattschnittanteils. Da der Kanteneinzugsradius bei negativer Positionierung der Kerbe sehr klein ist, beginnt somit die Glattschnittphase früher als bei positiver Positionierung. Im Bereich positiver Positionierung bildet sich ein schmaler Steg aus, der durch weitere plastische Verformung zu Zugspannungen führt (Abbildung 8-4 rechts). Während bei negativer Positionierung die Schubspannungen ähnlich dem Normalschneiden steigen (Spannungszustand um den Bereich der Triaxialität 0), liegt bei positiver Positionierung ein anderer Spannungszustand vor. Aufgrund fortschreitender Stempelbewegung steigen die Zugspannungen im Bereich des schmalen Steges an, und der Großteil der plastischen Formänderung findet hier statt (Abbildung 8-5).

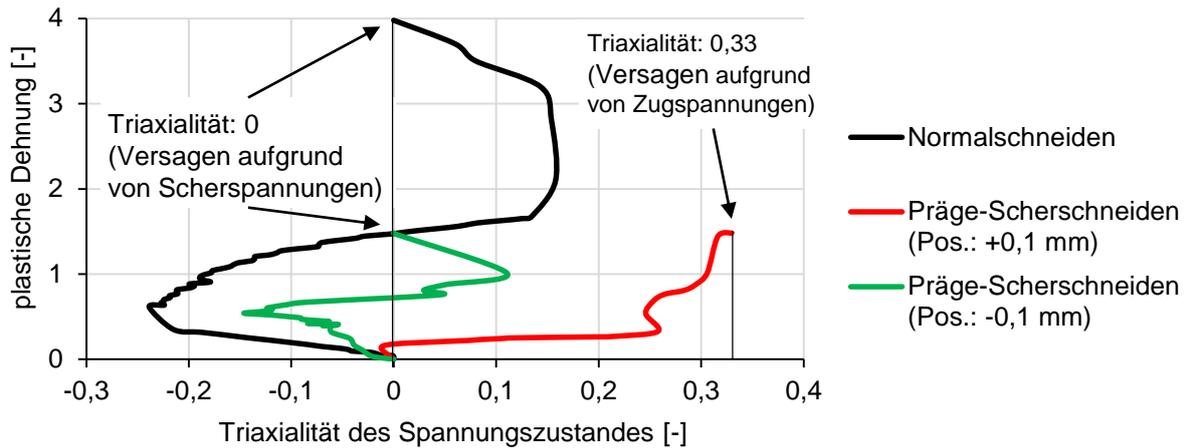


Abbildung 8-5: Vergleich der Triaxialität bei unterschiedlichen Parametereinstellungen

Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Triaxialität des Spannungszustandes und der plastischen Dehnung nach dem „Element-Kill“ Verfahren. Hierzu wird die Triaxialität des Spannungszustandes als Funktion der plastischen Dehnung aufgetragen, bis ab Erreichen des Versagensgrenzwertes das entsprechende Element gelöscht wird (siehe Ende der Kurven in Abbildung 8-5). Abbildung 8-5 verdeutlicht dieses Vorgehen anhand der gelöschten Elemente für die drei beschriebenen Parametereinstellungen (Normalschneiden, Präge-Scherschneiden mit den Positionierungen -0,1 mm und +0,1 mm). Die Abbildung zeigt jeweils ein Element je Verfahren bzw. Parametereinstellung, welches nach dem „Element-Kill“ Verfahren gelöscht wird. Schon während der plastischen Verformung sind Unterschiede zu erkennen. Während beim Präge-Scherschneiden mit positiver Positionierung ein deutlicher Zugspannungszustand frühzeitig auftritt, sind beim Normalschneiden und Präge-Scherschneiden mit negativer Positionierung Scherspannungen erkennbar (Triaxialität im Bereich um null).

Nach der Ausformung der Glattschnittzone folgt in Phase 4 des Scherschneidens der Rissbeginn (siehe Abbildung 2-7, S. 9). Beim Normalschneiden bilden sich zwei Risse an den beiden Schneidverrundungen, die bei fortschreitender Stempelbewegung sich ausbreiten und aufeinander zulaufen. Beim Präge-Scherschneiden hingegen tritt nur eine Rissinizierung an der Kerbspitze (Blechunterseite) des Blechwerkstoffes auf (Abbildung 8-6).

Dieser Rissbeginn tritt hierbei vor Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius auf. Die fortschreitende Stempelbewegung bedingt den Rissfortschritt und die Materialtrennung. Diese Materialtrennung erfolgt bei der Positionierung von -0,1 mm bevor es zum Kontakt zwischen dem Schneidmatrizenradius und der Blechunterseite kommt, und somit entfällt die Anformung an den Schneidmatrizenradius ansatzlos. Eine komplett gratfreie Schnittfläche ist das Ergebnis (Abbildung 8-7, links).

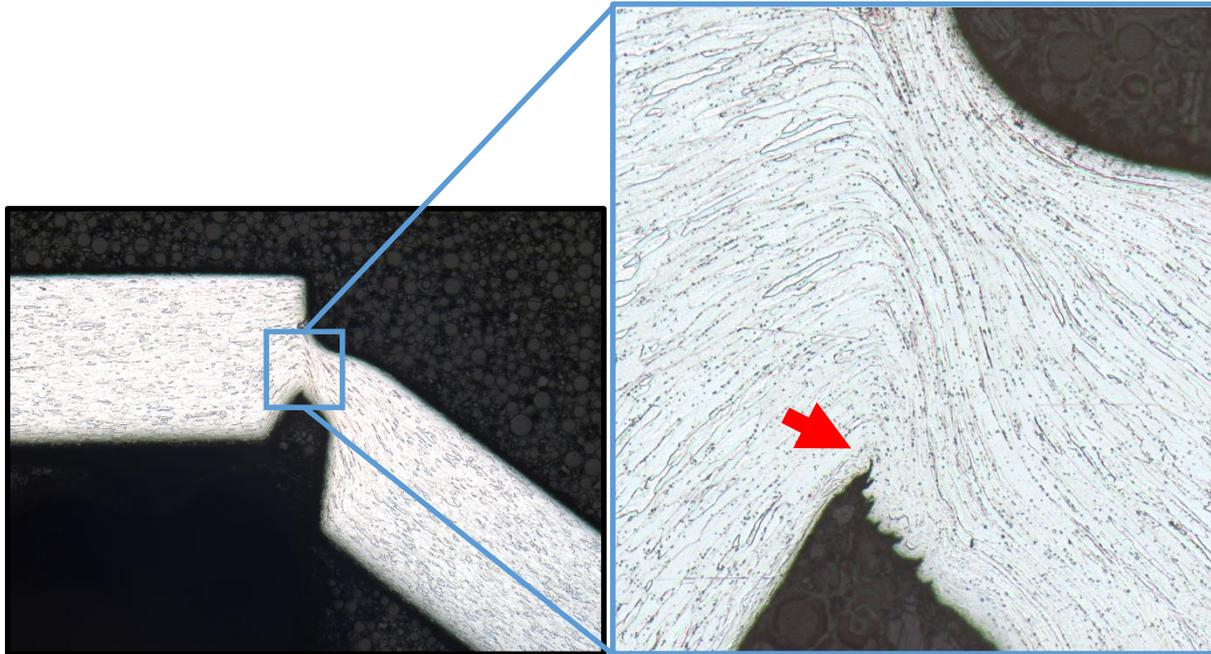


Abbildung 8-6: Metallografischer Schliffe des Rissbeginns beim Präge-Scherschneiden (roter Pfeil)

Bei positiver Positionierung steigen die Zugspannungen entlang des schmalen Steges und sind ausschlaggebend für die Materialtrennung. Wie in Abbildung 8-5 (siehe S. 74) ersichtlich, tritt die Materialtrennung bei positiver Positionierung (falsche Positionierung für Gratfreiheit) im Zugspannungszustand auf (Triaxialität: 0,33), während hingegen beim Normalschneiden und beim Präge-Scherschneiden mit negativer Positionierung die Materialtrennung infolge von Scherspannungen erzeugt wird (Triaxialität: 0). Eine positive Positionierung führt somit aufgrund der auftretenden Zugspannungen zu weiterer plastischer Umformung bis es zum Bruch kommt. Obwohl bei positiver Positionierung keine (großflächige) Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius stattfindet, kommt es zur deutlichen Gratausbildung (Abbildung 8-7). Der Gratbildungsmechanismus entspricht hierbei nicht dem gleichen Mechanismus wie beim Normalschneiden (Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius, siehe S. 5-11). Vielmehr ist dieser Mechanismus durch die Bildung eines schmalen Steges bedingt. Das anschließende Abreißen des Blechwerkstoffes infolge des Zugspannungszustandes wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Forschungsarbeit als „Abreißen“ bzw. „Abriss“-Mechanismus definiert. Der Abrissmechanismus bedingt einen Grat, der nicht unbedingt über die Blechdicke hinausragen muss.

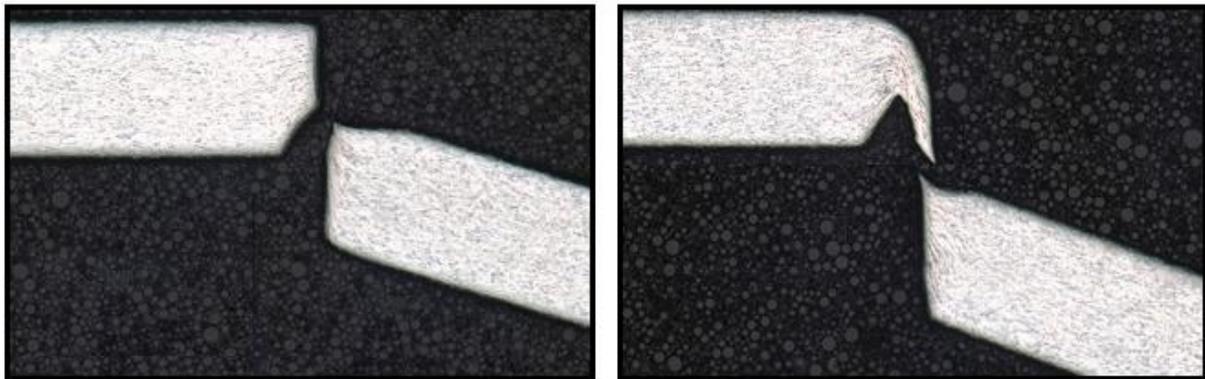


Abbildung 8-7: Metallografische Schliffe der Schnittflächenausprägung bei negativer (links) und positiver (rechts) Kerbpositionierung

Zum Vergleich sind die beiden beschriebenen Schnittflächen beim Präge-Scherschneiden und die entsprechende Schnittfläche beim Normalschneiden in der folgenden Abbildung übereinandergelegt dargestellt.

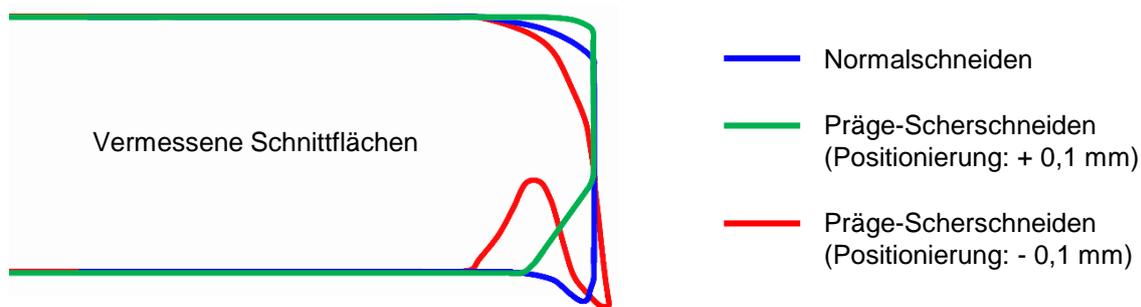
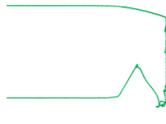


Abbildung 8-8: Vergleich unterschiedlicher Schnittflächen

Bei richtiger Positionierung der Kerbe (im negativen Bereich) ist eine ansatzlos gratfreie Schnittfläche mit bedeutend geringerer Kanteneinziehungshöhe als beim Normalschneiden möglich (vergleiche blaue und grüne Linie in Abbildung 8-8). Hingegen ist bei falscher Positionierung der Kerbe (im positiven Bereich) eine große Kanteneinziehungshöhe, die (gesamte) Kerbeinprägung, sowie eine ausgeprägte Gratbildung sichtbar (siehe rote Linie in Abbildung 8-8).

Aufgrund der auftretenden Mechanismen beim Präge-Scherschneiden ist der Positionierbereich für ein gratfreies Schneidergebnis von ausschlaggebender Bedeutung. Die Auswertung der durchgeführten Versuchsreihe ergibt eine Positioniergrenze bei null. Eine Positionierung im positiven Bereich (beim offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens) führt zwangsläufig immer aufgrund des Abreißmechanismus zur Gratbildung. Das Simulationsmodell bestätigt die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der absoluten Grenze im positiven Bereich, während im negativen Bereich ein anderer Mechanismus auftritt, der mit Hilfe von Tabelle 8-1 erklärt wird.

Tabelle 8-1: *Simulierte Schnittflächen in Abhängigkeit der Positionierung der Kerbe*

Position [mm]	- 0,4	- 0,3	- 0,2	- 0,1
Schnittfläche				
Position [mm]	0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,3
Schnittfläche				

Sowohl bei den experimentellen Untersuchungen des Blechwerkstoffes DC04, als auch bei der Simulation existiert keine absolute, starre Grenze für den gratfreien Bereich in negativer Positionierung im Gegensatz zur Grenze im positiven Bereich. Stattdessen zeigt sich ab einer bestimmten Positionierung im negativen Bereich eine geringe Wulstbildung an der Blechunterseite (siehe Tabelle 8-1 bei der Positionierung -0,2 mm und -0,3 mm). Der Mechanismus ist hierbei ähnlich wie beim Normalschneiden. Eine Anformung an den Schneidmatrizenradius erfolgt, wird aber durch die Rissbildung unterbrochen, was sich in einer stumpfen Gratbildung (Wulstbildung) niederschlägt. Eine weitere Positionierung im negativeren Bereich vergrößert diese Wulstausbildung, bis es bei weiterer negativerer Positionierung zur scharfkanten Geometrieausbildung, dem Schnittgrat wie beim Normalschneiden kommt. Die Anformung an den Schneidmatrizenradius findet in diesem Fall wie beim Normalschneiden statt. Der Übergang vom gratfreien Bereich zum gratbehafteten Bereich ist fließend. Bei größer werdendem Abstand zwischen eingekerbtem Blechbereich und der Scherzone (Positionierung negativer als -0,17 mm bei DC04) nimmt der Einfluss der Kerbgeometrie auf die Schnittflächenausprägung ab, und der Prozess des Normalschneidens überwiegt. Da dieser Gratbildungsmechanismus (Begrenzung in negative Positionierichtung) gekennzeichnet ist durch ein „Vorbeischneiden“ an der Kerbe, wird dieser Mechanismus in der vorliegenden Forschungsarbeit als „Vorbeischneiden“ definiert. Die zwei beschriebenen gratbildenden Mechanismen „Vorbeischneiden“ und „Abreißen“ zeigen auch unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der auftretenden Spannungen während der Werkstofftrennung (siehe Abbildung 8-5, S.74). Der Mechanismus Abreißen findet im reinen Zugspannungszustand (Triaxialität: 0,33) statt, der Mechanismus Vorbeischneiden im Bereich der Scherspannungen ähnlich dem Normalschneiden (Triaxialität: 0).

Die unterschiedlichen Bruchflächenhöhen in Abbildung 8-2 lassen sich aufgrund der unterschiedlichen effektiv zu trennenden Blechdicke erklären. Beim Präge-Scherschneiden ist die effektiv zu

trennende Blechdicke aufgrund der Kerbeinprägung geringer als beim Normalschneiden. Daher findet die Trennung des Werkstoffzusammenhaltes früher statt. Befindet sich die Kerbspitze in der Scherzone (Positionierung bei null), so ist die effektiv zu trennende Blechdicke am geringsten und somit erfolgt der Bruch bei geringer Stempel Eindringung in den Werkstoff. Bezogen auf die Blechdicke von 1 mm ist dann die Bruchflächenhöhe am größten.

In den letzten beiden Phasen des Scherschneidens (Ausstoßen des Schnittteils und Rückhub) ist der Trennvorgang bereits abgeschlossen. Somit ist auch die Schnittfläche vollständig ausgeprägt. Aus diesem Grund sind die beiden letzten Phasen des Scherschneidens für die Erklärung der auftretenden Mechanismen beim Präge-Scherschneiden nicht relevant.

Zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm können in Abbildung 8-9 die Werte der Schnittflächenkenngrößen für eine Kerbtiefe von 0,4 mm eingesehen werden.

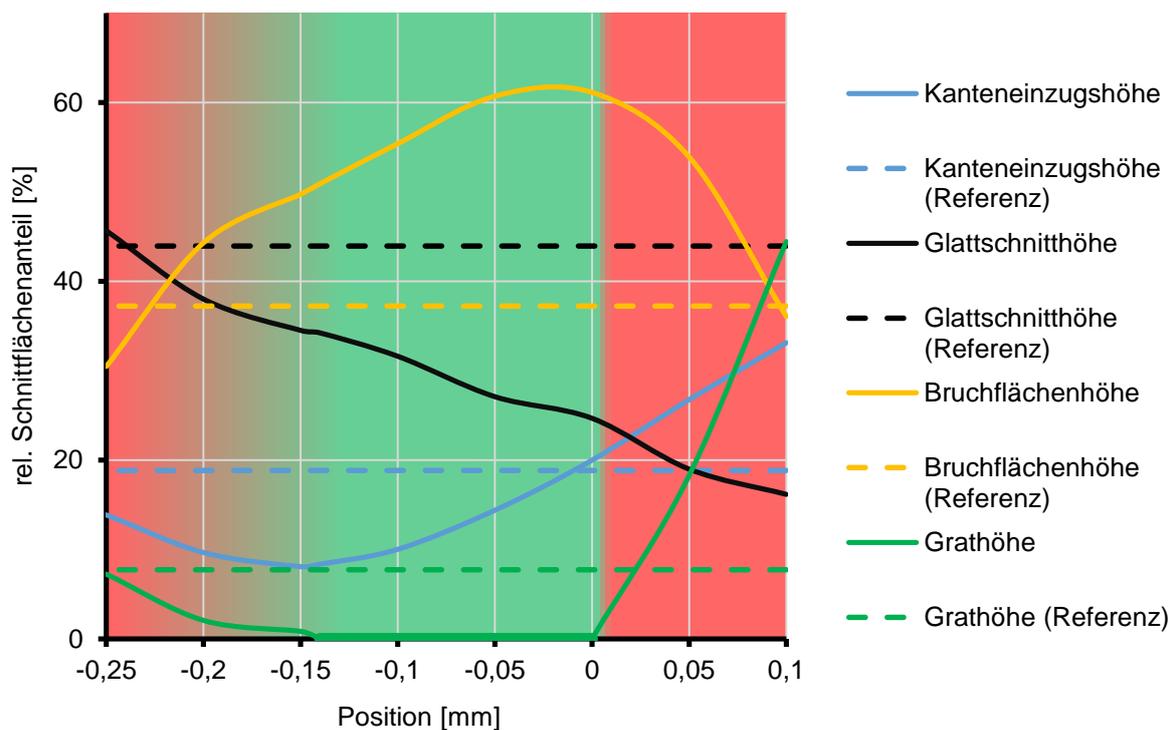


Abbildung 8-9: Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm (DC04, offener Schnitt)

Der Vergleich zwischen Abbildung 8-2 (Kerbtiefe 0,6 mm) und Abbildung 8-9 (Kerbtiefe 0,4 mm) zeigt gleiche Tendenzen und Mechanismen, allerdings sind unterschiedliche Absolutwerte feststellbar. Die unterschiedlichen Absolutwerte können der Tabelle 8-2 entnommen werden.

Tabelle 8-2: Werte ausgewählter Schnittflächenkenngrößen bei unterschiedlichen Kerbtiefen

	Kerbtiefe 0,4 mm	Kerbtiefe 0,6 mm
Zu trennende Blechdicke [mm]	0,6	0,4
Gratfreier Bereich [mm]	-0,14 bis 0	-0,17 bis 0
Kanteneinziehungshöhe bei der Position 0 mm [%]	20	9
Glattschnitthöhe bei der Position 0 mm [%]	27	16
Maximale Bruchflächenhöhe [%]	63	72

Aus der Tabelle wird deutlich, dass bei größerer Kerbtiefe die Kanteneinziehungshöhe und die Glattschnitthöhe sinken (beispielhaft gezeigt an der Kerbposition von 0 mm in Tabelle 8-2). Grund hierfür ist die effektiv zu trennende Blechdicke, welche bei einer Kerbeinprägung von 0,4 mm (minimal zu trennende Blechdicke: 0,6 mm) größer ist als bei einer Kerbeinprägung von 0,6 mm (minimal zu trennende Blechdicke: 0,4 mm). Weiterhin findet die Rissinduzierung bei einer geringen effektiven Blechdicke (Kerbtiefe 0,6 mm) früher statt als bei größeren (Kerbtiefe 0,4 mm). Bezogen auf die Ausgangsblechdicke von 1 mm bedeutet dies, je größer die Kerbtiefe, desto früher der Rissbeginn und somit ergibt sich eine größere Bruchflächenhöhe als bei einer kleineren Kerbtiefe.

Auch der gratfreie Bereich ändert sich mit kleinerer Kerbtiefe. Die Mechanismen „Abreißen“ und „Vorbeischneiden“ sind auch bei der Kerbtiefe von 0,4 mm deutlich erkennbar, jedoch zeigen sich Unterschiede. Während die Begrenzung des gratfreien Bereiches in positiver Kerbpositionierung (Mechanismus: Abreißen) an gleicher Stelle ist wie bei der Kerbeinprägung von 0,6 mm, findet die Begrenzung in negativer Positionierichtung (Wulstbildung; Mechanismus: Vorbeischneiden) deutlich früher statt. Grund hierfür ist der kürzere Kerbschenkel A. Da der Riss notwendigerweise für ein gratfreies Schneidergebnis auf dem Kerbschenkel A beginnen muss (siehe Abbildung 8-6, S. 75), führt ein kürzerer Kerbschenkel zu einem kleineren gratfreien Bereich.

Alle vier untersuchten Blechwerkstoffe (AA 6014, 1.4301, DC04 und CuSn6) zeigen die gratfreiheit-begrenzenden Mechanismen „Abreißen“ und „Vorbeischneiden“. Die vier untersuchten Werkstoffe haben eine absolute, werkstoffunabhängige Grenze beim Übergang von Gratfreiheit zur Gratausbildung in positiver Positionierichtung der Kerbe. Diese Grenze ist für alle Werkstoffe bei einer Position der Kerbe von 0 mm gegeben. Gratfreiheit bei positiver Positionierung der Kerbe ist *nicht* möglich.

Hingegen lässt sich eine andere Tendenz der Begrenzung des gratfreien Bereiches in negativer Positionierichtung erkennen. Die experimentell untersuchten Werkstoffe zeigen zwar alle den Mechanismus „Vorbeischneiden“, allerdings an unterschiedlichen Positionen. Abbildung 8-10 weist die Begrenzungen der gratfreien Bereiche für alle vier untersuchten Werkstoffe aus.

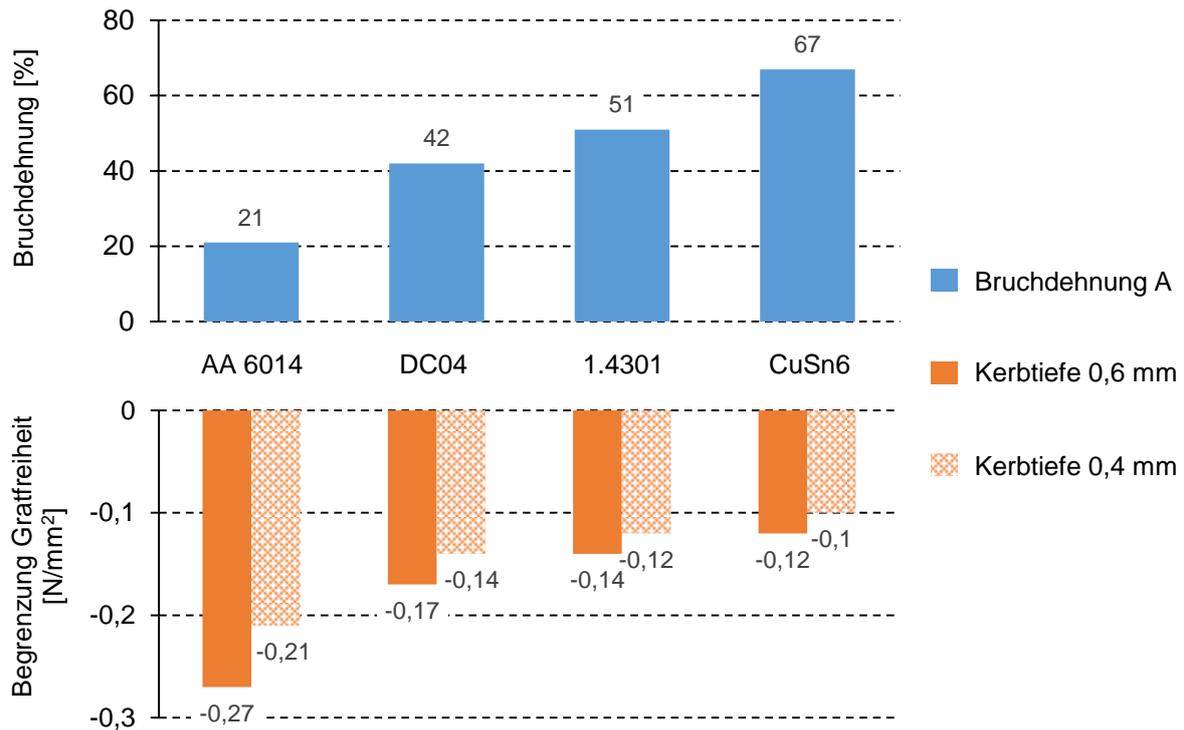


Abbildung 8-10: Begrenzung des gratfreien Bereiches im offenen Schnitt

Abbildung 8-10 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der Begrenzung des gratfreien Bereiches in negativer und positiver Positionierichtung (Mechanismus Vorbeischneiden und Abreißen) für alle vier untersuchten Werkstoffe. Der Werkstoff AA 6014 zeigt den größten gratfreien Bereich, während der Werkstoff CuSn6 den kleinsten gratfreien Bereich aufzeigt. Sobald die Kerbspitze weit genug außerhalb der Scherzone ist (negative Positionierung der Kerbe), kommt es beim Werkstoff CuSn6 zur Gratbildung, während der untersuchte Aluminiumwerkstoff bei gleicher Positionierung noch keine Gratbildung aufweist.

Beim Normalschneiden liegt der Grund für die unterschiedliche Gratausbildung unter anderem in der Schubbruchgrenze (Bruch im dreidimensionalen Spannungszustand) bzw. Bruchdehnung (Bruch im uniaxialen Spannungszustand). Dies verhält sich ähnlich beim Präge-Scherschneiden. Ist die Bruchdehnung bzw. Schubbruchgrenze groß, so erfährt der Werkstoff beim Präge-Scherschneiden ein hohes Maß an plastischer Verformung vor der Bruchinitiierung, und eine Anformung an den Schneidmatrizenradius kann bei falscher Positionierung problemlos erfolgen (siehe Abbildung 8-10). Erst während dieser Anformung beginnt der Bruch. Bei kleiner Schubbruchgrenze bzw. Bruchdehnung erfolgt die Werkstofftrennung (bei gleicher Positionierung) beim Präge-Scherschneiden bereits nach geringer plastischer Verformung. Der Werkstoff hat somit nicht die nötige Zeit, sich an den Schneidmatrizenradius anzuformen, und es findet keine Gratbildung statt. Die Begrenzung der Positionierung für Gratfreiheit in negativer Positionierichtung

zeigt im Gegensatz zur Begrenzung in positiver Richtung (starre, fixe Grenze bei 0 mm) eine eindeutige Werkstoffabhängigkeit. Je größer die Bruchdehnung, desto kleiner der gratfreie Bereich (vergleiche Begrenzungen in negativer Richtung und Bruchdehnungen der Blechwerkstoffe in Abbildung 8-10, S. 80).

Der Einfluss unterschiedlicher Kerbtiefen macht sich in der negativen Begrenzung des gratfreien Bereiches bemerkbar. Eine geringe Kerbtiefe (z.B.: 0,4 mm) besteht aus kürzeren Kerbschenkeln. Dadurch tritt der gratfreiheit-begrenzende Mechanismus „Vorbeischneiden“ früher ein als bei einer größeren Kerbtiefe (z.B.: 0,6 mm). Wie Abbildung 8-10 (siehe S. 80) zeigt, gilt diese Erkenntnis für alle vier untersuchten Werkstoffe.

Geschlossener Schnitt sowie Vergleich zum offenen Schnitt

Beim geschlossenen Schnitt zeigen sich ähnliche Tendenzen wie beim offenen Schnitt. Mit Hilfe der Abbildung 8-11 werden Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zum offenen Schnitt herausgearbeitet.

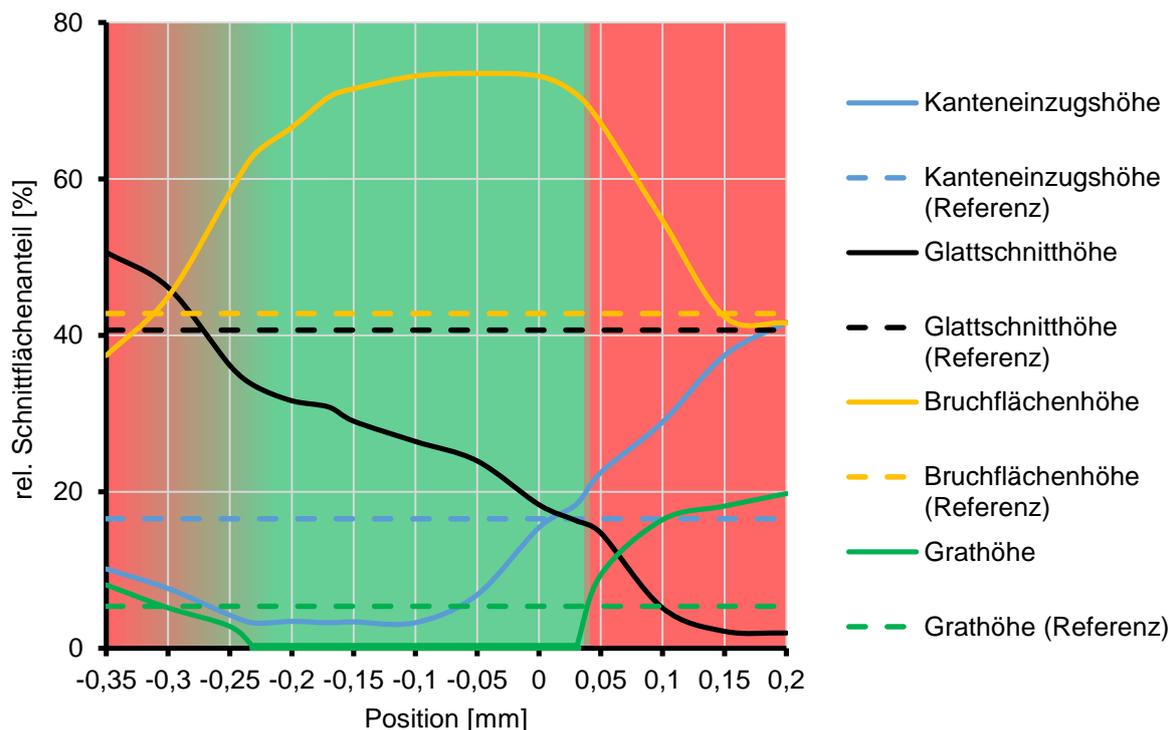


Abbildung 8-11: Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm (DC04, geschlossener Schnitt)

In der Abbildung zeigen sich gleiche Tendenzen wie beim offenen Schnitt (siehe Abbildung 8-2, S. 71) für die Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen- und Grathöhe. Der Bereich der Gratfreiheit ist allerdings beim geschlossenen Schnitt größer und zeigt eine

Begrenzung bei 0,03 mm im positiven Bereich bzw. -0,23 mm im negativen Bereich. Die detaillierte Erklärung des Schneidvorganges erfolgt, wie schon beim offenen Schnitt, anhand von metallografischen Schliffen unter Berücksichtigung der sechs Phasen des Scherschneidens (vergleiche Kap. 2.2, S. 5-11). Die metallografischen Schliffe werden, wie schon im offenen Schnitt, für die Positionierungen -0,1 mm und +0,1 mm untersucht. Zusätzlich wird die Positionierung +0,03 mm berücksichtigt, da diese für die Grاتفreiheit eine unterschiedliche Begrenzung darstellt als beim offenen Schnitt.

In den ersten beiden Phasen des Scherschneidens (Aufsetzen des Niederhalters und Stempels sowie elastische Verformung und beginnende Plastifizierung, S. 5-7) und des Präge-Scherschneidens im offenen Schnitt kommt es zu keinem signifikanten Unterschied im Vergleich zum geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneidens. Daher bleiben diese beiden Phasen unberücksichtigt. Abbildung 8-12 zeigt die Scherung und fortschreitende Scherdeformation des Werkstückwerkstoffes (vergleiche Phase drei des Scherschneidens, S. 5).

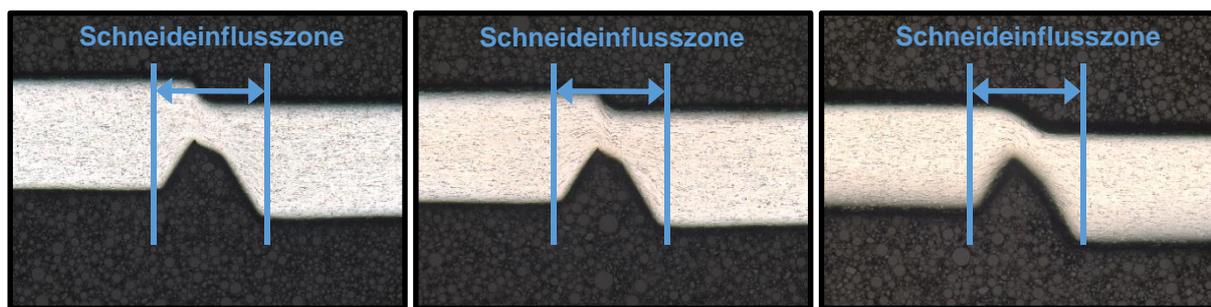


Abbildung 8-12: Metallografische Schliffe zu Beginn der plastischen Deformation bei den Kerbpositionen -0,1 mm (links), +0,03 mm (mitte) und +0,1 mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden

Wie schon beim offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens zeigt eine Positionierung im Bereich außerhalb der Grاتفreiheit (Positionierung bei +0,1 mm) eine große Kanteneinziehungshöhe, während hingegen eine Positionierung im Bereich der Grاتفreiheit (siehe Abbildung 8-12, Positionierung bei -0,1 mm und +0,03 mm) eine geringe Kanteneinziehungshöhe ergibt (siehe Abbildung 8-11, S. 81). Da im Gegensatz zum offenen Schnitt prozessbedingt kein Abknicken des Blechwerkstoffes erfolgt, ist die Kanteneinziehungshöhe im geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneidens (Abbildung 8-13) durchgehend bei jeder Versuchseinstellung nochmals geringer als bei entsprechender Versuchseinstellung im offenen Schnitt des neuen Verfahrens.

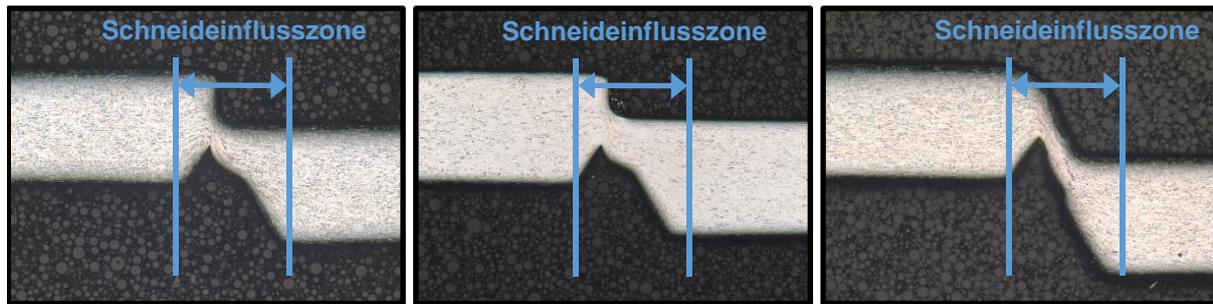


Abbildung 8-13: Metallografische Schliffe kurz vor Rissbeginn bei den Kerbpositionen $-0,1$ mm (links), $+0,03$ mm (mitte) und $+0,1$ mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden

Bei fortschreitender Stempelbewegung bildet sich für die Positionierungen im gratfreien Bereich die Glattschnitthöhe aus, während hingegen bei der Positionierung außerhalb des gratfreien Bereiches annähernd keine Glattschnitthöhe entsteht. Grund hierfür ist die ausgeprägte Kanteneinziehungshöhe. Wie schon beim offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens (siehe Abbildung 8-4, S. 73) bildet sich bei positiver Positionierung außerhalb des gratfreien Bereiches ein deutlicher Steg aus, der zu Zugspannungen im Stegbereich führt. Abbildung 8-14 zeigt den Rissbeginn für die drei gewählten Positionen.

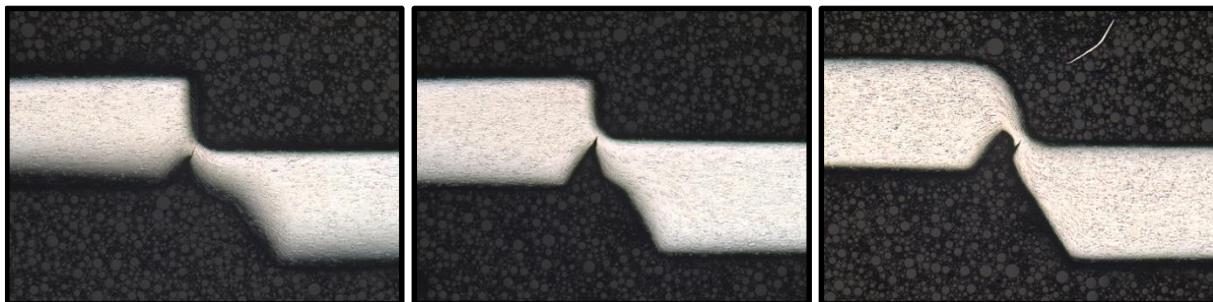


Abbildung 8-14: Metallografische Schliffe des Rissbeginns bei den Kerbpositionen $-0,1$ mm (links), $+0,03$ mm (mitte), $+0,1$ mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden

Während beim Normalschneiden der Rissbeginn von der Stempelkante (Blechoberseite) ausgeht (siehe Kap. 2.2, S. 9), zeigt sich beim Präge-Scherschneiden für den geschlossenen Schnitt sowie für den offenen Schnitt (siehe Abbildung 8-6, S. 75) der Rissbeginn *immer* von der Blechunterseite. Ein weiterer wesentlicher Unterschied des Präge-Scherschneidens zum Normalschneiden existiert im Rissfortschritt. Beim Normalschneiden bildet sich oftmals (prozessbedingt) ein zweiter Riss ausgehend vom Matrizenradius, und beide Risse laufen aufeinander zu (siehe Kap. 2.5.1, S. 15-15). Hingegen tritt beim Präge-Scherschneiden nur ein Rissfortschritt auf (Abbildung 8-15).

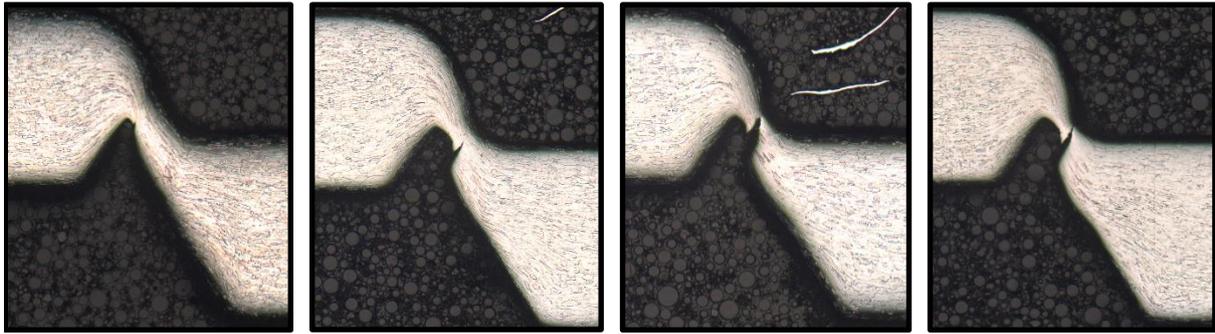


Abbildung 8-15: Metallografische Schliffe des Rissbeginn (links), des -wachstums (mitte links und mitte rechts) und kurz vor der Werkstofftrennung (rechts) bei der Kerbposition $+0,1$ mm im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden

Beim Präge-Scherschneiden führt der Rissfortschritt ausgehend von der Blechunterseite zur vollständigen Materialtrennung (siehe Abbildung 8-15). Wie die metallografischen Schliffe in Abbildung 8-15 zeigen, wird mit der Positionierung der Kerbe der Ort festgelegt, an dem die Rissinizierung beginnt. Ist dieser Ort falsch gewählt, so beginnt der Riss nicht in der Kerbspitze. Beim anschließenden Rissfortschritt kommt es daher zur Ausbildung eines Schnittgrates. Auch beim geschlossenen Schnitt zeigt das Präge-Scherschneiden gegenüber dem Normalschneiden denselben Vorteil wie beim offenen Schnitt, wenn die Kerbposition richtig gewählt wird: Die Gratbildung findet im Prozess nicht statt und entfällt somit ansatzlos. Die entstehenden Schnittflächenausprägungen beim geschlossenen Schnitt sind in der Abbildung 8-16 zu erkennen.

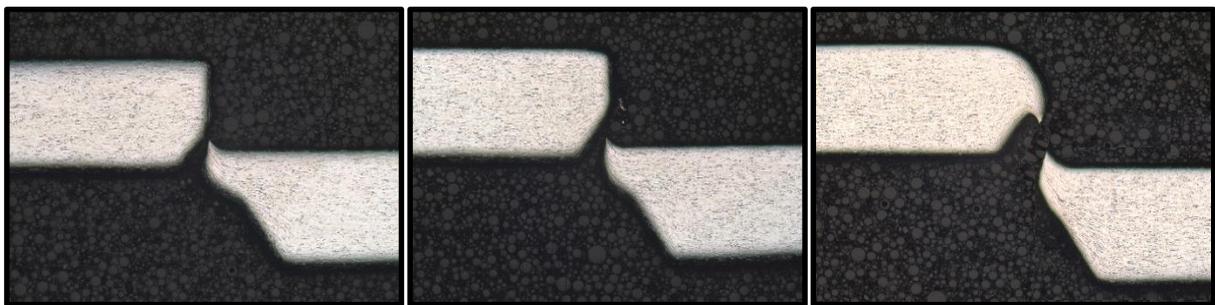


Abbildung 8-16: Metallografische Schliffe der Schnittflächenausprägungen bei den Kerbpositionen $-0,1$ mm (links), $+0,03$ mm (mitte) und $+0,1$ mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneidens

Die unterschiedlichen Bereiche der Gratfreiheit von offenem und geschlossenem Schnitt beim Präge-Scherschneiden erklären sich mit den unterschiedlichen Spannungen im Blechwerkstoff. Während beim offenen Schnitt (Präge-Scherschneiden) das Abknicken des Blechwerkstoffes Zugspannungen an der Blechoberseite und Druckspannungen an der Blechunterseite induziert, entfällt dieses deutlich sichtbare Abknicken beim geschlossenen Schnitt vollständig. Da der Riss beim Präge-Scherschneiden ausschließlich an dieser mit Druckspannungen überlagerten Blechunterseite induziert wird, kommt es zu einer Verzögerung des Rissbeginns im offenen Schnitt im Vergleich zum geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneiden. Metallphysikalisch werden durch die

Druckspannungen im offenen Schnitt die Poren und der Riss an ihrer Ausbreitung gehindert. Ein verzögerter Rissbeginn und -fortschritt und eine verzögerte Materialtrennung im Vergleich zum geschlossenen Schnitt sind die Folgen. Somit hat der Blechwerkstoff im offenen Schnitt mehr Zeit, sich an den Matrizenradius anzuformen. Bei jeweils gleicher Positionierung von offenem und geschlossenem Schnitt im Präge-Scherschneiden existieren nach dieser Hypothese somit zwei Bereiche (Übergangsbereich von Gratfreiheit zur Gratbildung), die beim offenen Schnitt zur Gratbildung führen, während der geschlossene Schnitt noch Gratfreiheit aufweist. Hieraus ist die Konsequenz für das Präge-Scherschneiden, dass der gratfreie Bereich im geschlossenen Schnitt immer größer als im offenen Schnitt ist (bei gleichbleibenden Konfigurationen aller übrigen Prozessparameter). Diese Erkenntnis (größerer gratfreier Bereich beim geschlossenen Schnitt als beim offenen Schnitt) zeigt sich bei allen vier untersuchten Blechwerkstoffen (vergleiche Abbildung 8-10, S. 80 und Abbildung 8-17, S. 85).

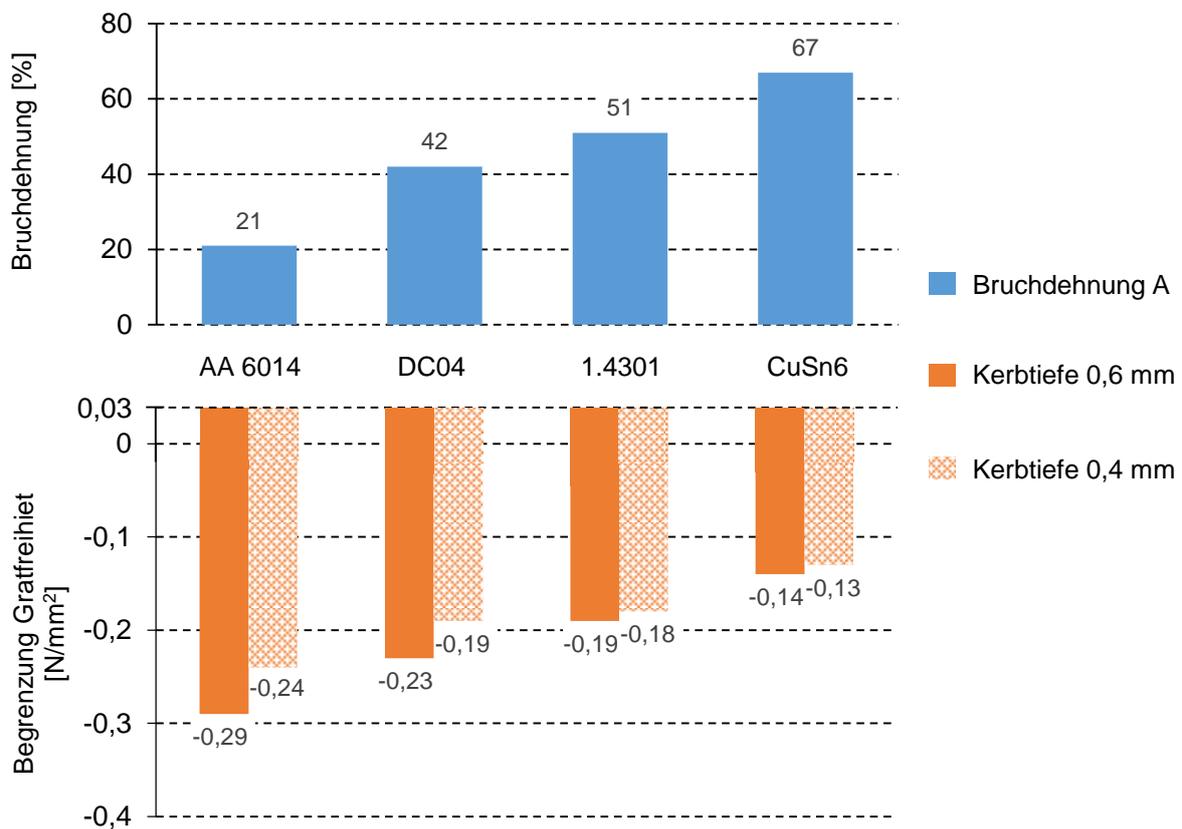


Abbildung 8-17: Begrenzung des gratfreien Bereiches im geschlossenen Schnitt

Während die Begrenzung durch den Mechanismus Abreißen im offenen Schnitt bei null auftritt, ist im geschlossenen Schnitt diese Grenze erst bei +0,03 mm für alle vier Blechwerkstoffe zu erkennen. Die Begrenzung durch den Mechanismus Vorbeischneiden tritt im offenen Schnitt bei einer um 0,02-0,04 mm negativeren Positionierung der Kerbe auf als im geschlossenen Schnitt (bei allen vier untersuchten Blechwerkstoffen). Analog zum offenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden zeigt der geschlossene Schnitt auch eine starke Abhängigkeit der Bruchdehnung für alle

vier untersuchten Blechwerkstoffe in der Begrenzung der negativen Positionierung der Kerbe durch den Mechanismus Vorbeischneiden (Abbildung 8-17). Die Erklärung hierzu ist identisch wie beim offenen Schnitt (siehe S. 80).

In der Prozesskette definiert sich der zu verwendende Werkstoff nicht über den gratfreien Bereich, sondern ist über das Endprodukt und die Anwendung festgelegt. Ist dieser Werkstoff in der Anwendung nicht einer der vier untersuchten Werkstoffe, so kann trotzdem mit den Ergebnissen des ersten Versuchsblockes der vorliegenden Forschungsarbeit eine Abschätzung des gratfreien Positionierbereiches erfolgen, indem die Bruchdehnung des verwendeten Werkstoffes mit den Bruchdehnungen der untersuchten vier Werkstoffe verglichen wird, um bereits bei der Werkzeugauslegung die Kerbposition so zu konstruieren, dass ein gratfreies Schneidergebnis verwirklicht wird.

8.2 Versuchsblock 2: Sensitivitätsanalyse

8.2.1 Versuchskonfigurationen

Für die vorliegende Forschungsarbeit werden in diesem Versuchsblock vier Einflussparameter (Position der Kerbe, Kerbtiefe, Kerbradius und Schneidspalt) in einem teilfaktoriellen Versuchsplan (Klein, 2014, S. 294) näher untersucht. Um die Wirkung der einzelnen Parameter auf das gratfreie Schneiden adäquat zu untersuchen, sind für jeden Parameter (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) drei Stufen (-1, 0, +1) vorgesehen. Somit ergibt sich der teilfaktorielle Versuchsplan $L_9(3^4)$, der in der Tabelle 8-3 dargestellt ist.

Tabelle 8-3: Teilfaktorieller Versuchsplan $L_9(3^4)$

Versuchsnummer	Einflussparameter			
	X_1	X_2	X_3	X_4
T1	-1	-1	-1	-1
T2	-1	0	+1	+1
T3	-1	+1	0	0
T4	0	-1	+1	0
T5	0	0	0	-1
T6	0	+1	-1	+1
T7	+1	-1	0	+1
T8	+1	0	-1	0
T9	+1	+1	+1	-1

Die Ergebnisse des Versuchsblockes eins zeigen bei allen Werkstoffen und Kerbgeometrien Gratfreiheit im Bereich der Positionierung von 0 mm bis -0,1 mm (siehe Kapitel 8.1.2, S. 80). Deshalb werden im zweiten Versuchsblock drei Stufenwerte für die Positionierung aus diesem Bereich

übernommen. Diese für das gratfreie Schneiden erforschten Positionseinstellungen lauten 0 mm, -0,05 mm sowie -0,1 mm und werden den Stufen -1, 0, +1 im Versuchsplan L_9 (3^4) zugeordnet.

Bei gleichem Kerbwinkel führt eine Kerbgeometrie mit großer Kerbtiefe zu einer stärkeren Materialverdrängung als eine Kerbgeometrie mit kleiner Kerbtiefe. Eine große Materialverdrängung erhöht das Risiko der Wellenbildung im Blech, da das verdrängte Material zu Druckspannungen führt. Daher ist das Ziel, möglichst wenig Material zu verdrängen, um ein ebenes Blech sicherzustellen. Aus diesem Grund sind die Stufen der Kerbtiefe möglichst klein gewählt. Allerdings liegt die Gefahr einer zu kleinen Kerbtiefe darin, dass der gewünschte Effekt (Gratfreiheit beim Schneidprozess) nicht auftritt und der Schneidprozess des Normalschneidens überwiegt. Die Ergebnisse des ersten Versuchsblockes führen zur Gratfreiheit bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm. Deshalb wird neben der Konfigurationseinstellung der Kerbtiefe von 0,4 mm eine weitere Stufe bei einer Kerbtiefe von 0,3 mm festgelegt. Die dritte Stufe erfolgt bei 0,5 mm, um einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen.

Gemäß der VDI-Richtlinie 3368 ist für das Normalschneiden bei diesen Versuchsbedingungen ein Schneidspalt von 8 % der Blechdicke vorgesehen. Im industriellen Fertigungsprozess werden Schneidspalte von maximal bis zu 10 % bzw. minimal bis 6 % der Blechdicke verwendet. Daher wird der Einfluss des Parameters Schneidspalt in diesen drei Stufen im neuen Verfahren untersucht (6 %, 8 % und 10 %).

Empirische Erkenntnisse zeigen, die Gefahr eines scharfkantigen Kerbradius besteht darin, dass bei steigender Hubzahl infolge der Druckspannungen eine Verformung zu einem stumpfen Radius erfolgt. Deshalb werden neben dem scharfkantigen Kerbradius von 0,05 mm die beiden verrundeten Kerbradien von 0,125 mm und 0,2 mm untersucht.

Aufgrund ihrer weit verbreiteten industriellen Anwendung haben die Werkstofflegierungen Stahl (DC04), Edelstahl (1.4301), Aluminium (AA 6014), und Kupfer (CuSn6) ein großes Anwendungspotential für das Präge-Scherschneiden und werden deshalb in diesem Versuchsblock in jeweils einer Versuchsreihe pro Werkstofflegierung im offenen und geschlossenen Schnitt untersucht. Somit ergeben sich acht Versuchsreihen zu jeweils einem statistischen Versuchsplan L_9 (3^4).

8.2.2 Versuchsergebnisse

Wie auch im vorherigen Versuchsblock sollen die grundlegenden Mechanismen und Ergebnisse zuerst am Werkstoff DC04 erklärt werden, bevor der Vergleich zu den Versuchsreihen mit den Werkstoffen 1.4301, AA 6014 und CuSn6 erfolgt. In Gegenüberstellung des offenen und geschlossenen Schnittes erfolgt ausschließlich die Auswertung der Grathöhe, da die Ausformung der Grathöhe im vorliegenden Forschungsprojekt vorrangig untersucht wird. Abbildung 8-18 zeigt den

Einfluss der untersuchten Prozessparameter auf die Grathöhe. Die Graphen repräsentieren die Mittelwerte der Grathöhen in Abhängigkeit der jeweiligen veränderten Prozessparameter (Schneidspalt, Kerbradius, Position und Kerbtiefe).

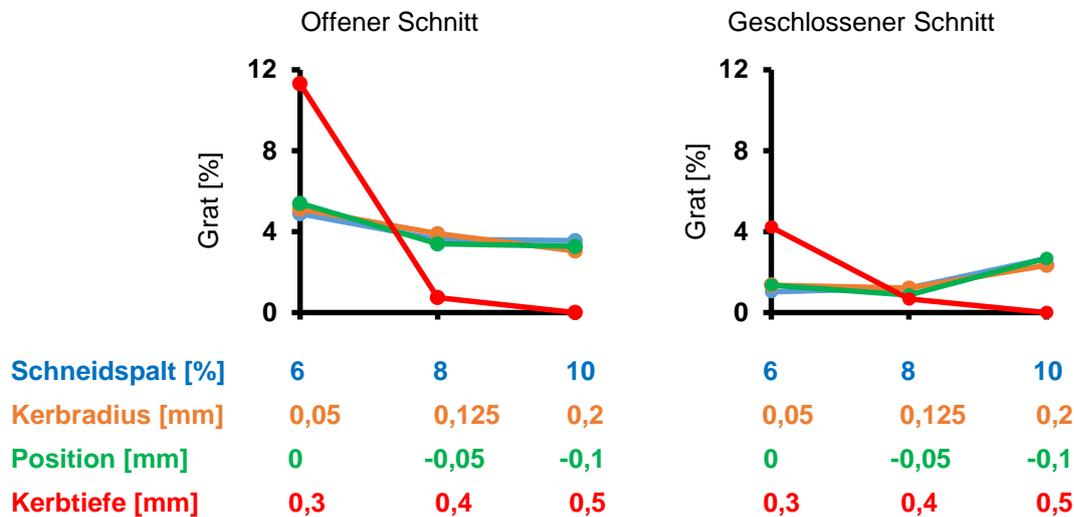


Abbildung 8-18: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (DC04)

Der offene Schnitt zeigt tendenziell größere Grathöhen (bei gleicher Versuchskonfiguration) als der geschlossene. Beim offenen Schnitt knickt das Blech ab und eine verzögerte Rissinduzierung infolge der Druckspannungen an der Blechunterseite bedingt eine längere Zeit zur Bildung des Schnittgrates.

Während der Parameter Kerbtiefe, sowohl beim offenen als auch beim geschlossenen Schnitt, einen maßgeblichen Einfluss auf die Grathöhe zeigt, wird in Abbildung 8-18 deutlich, dass die Parameter Schneidspalt, Kerbradius und Positionierung der Kerbe in den eingestellten Versuchskonfigurationen die Gratausprägung nur geringfügig beeinflussen. So ergibt sich bei den Mittelwerten ein maximaler Unterschied der Grathöhe von 2,1% beim offenen Schnitt und 1,7% beim geschlossenen Schnitt. Die Ergebnisse zeigen somit, dass die drei Parameter Schneidspalt, Kerbradius und Positionierung der Kerbe (in den gewählten Konfigurationen) keinen maßgeblichen Einfluss auf die Grاتفreiheit haben und lediglich zur Feineinstellung des Prozesses anzuwenden sind.

Im offenen Schnitt existiert im Mittel eine maximale Grathöhe von 11,8% (der Blechdicke), während der geschlossene Schnitt als Mittelwert eine maximale Grathöhe von 4,3% (der Blechdicke) zeigt. Diese maximalen Grathöhen treten alle bei der Konfiguration der Kerbtiefe von 0,3 mm (Kerbtiefe entspricht 30% der Blechdicke) auf, während ab einer Kerbtiefe von 0,4 mm die Grathöhe entscheidend abnimmt. Alle drei Versuchskonfigurationen mit einer Kerbtiefe von 0,3 mm (Versuchsnummer T1, T5 und T9) weisen beim offenen sowie beim geschlossenen Schnitt eine ausgeprägte Grاتفormung aus. Eine Grاتفreiheit bei einer Kerbtiefe von 0,3 mm ist nicht möglich.

Neben dem Werkstoff DC04 werden weiterhin die Blechwerkstoffe CuSn6, 1.4301 und AA 6014 untersucht. Die Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung dieser drei Blechwerkstoffe können der Abbildung 8-19 (Blechwerkstoff: CuSn6), Abbildung 8-20 (Blechwerkstoff: 1.4301) und Abbildung 8-21 (Blechwerkstoff: AA 6014) entnommen werden.

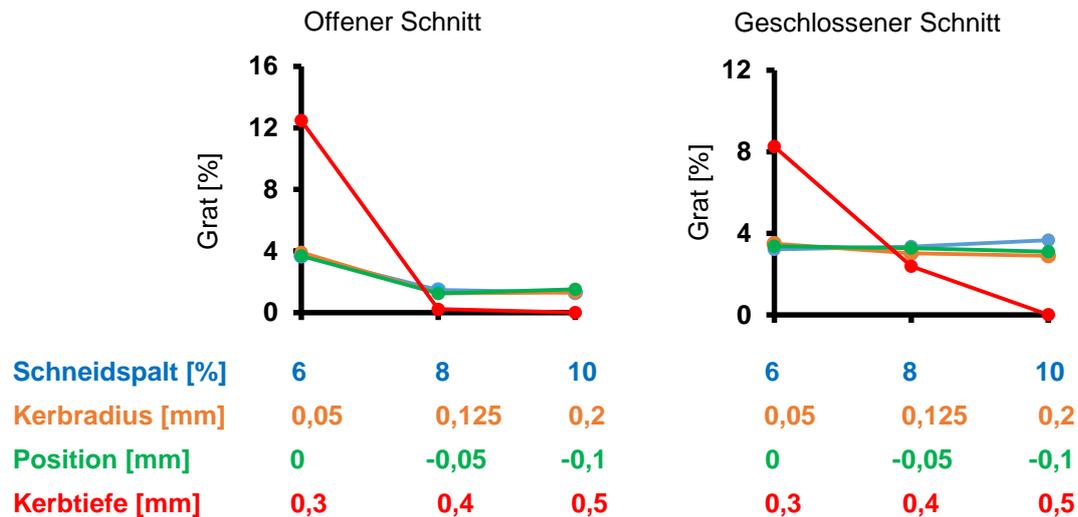


Abbildung 8-19: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (CuSn6)

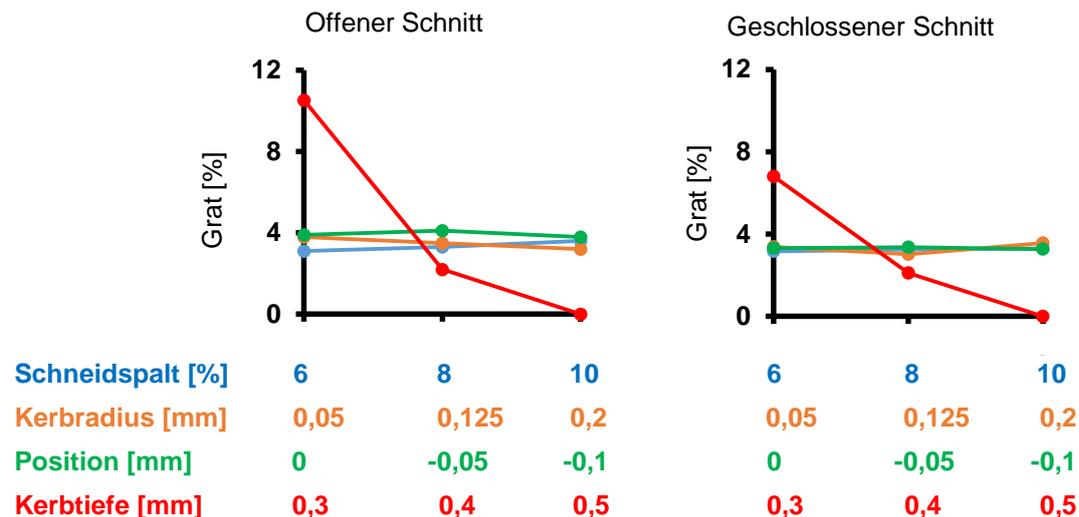


Abbildung 8-20: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (1.4301)

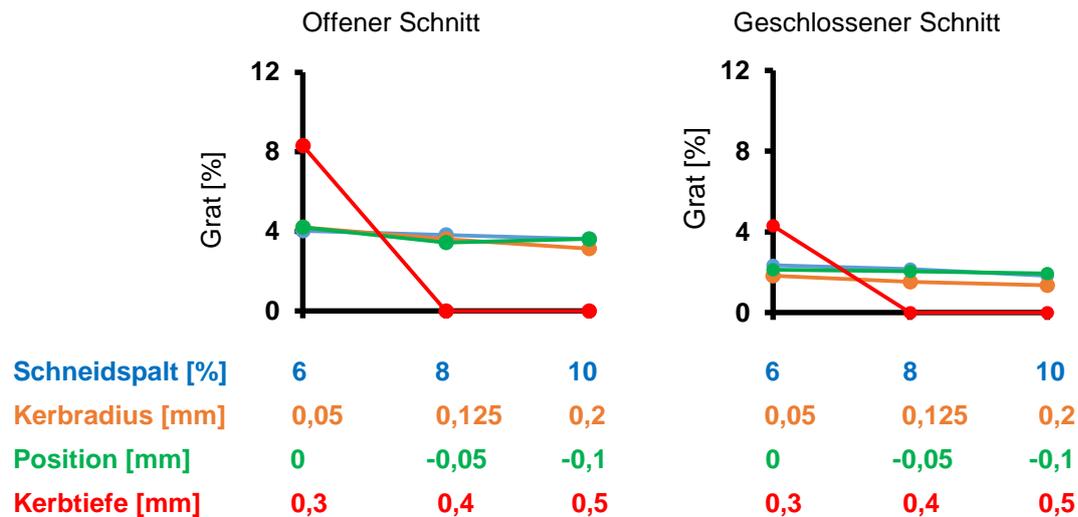


Abbildung 8-21: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (AA 6014)

Aus Abbildung 8-19 bis Abbildung 8-21 ist ersichtlich, dass die Tendenzen der vier untersuchten Konfigurationsparameter (Schneidspalt, Kerbradius, Position der Kerbe und Kerbtiefe) des Werkstoffes DC04 auch auf die Werkstoffe CuSn6, 1.4301 und AA 6014 zutreffen. Somit ergibt sich als Ergebnis für alle untersuchten Blechwerkstoffe, dass der Parameter Kerbtiefe einen signifikanten, maßgeblichen Einfluss auf ein gratfreies Schneidergebnis hat und mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung als Haupteinflussparameter identifiziert ist.

Basierend auf den Ergebnissen des zweiten Versuchsblockes ist es zum ganzheitlichen Verständnis des Präge-Scherschneidens unerlässlich, den Parameter Kerbtiefe eingehend zu untersuchen. Im folgenden Versuchsblock erfolgt daher die nähere Untersuchung dieses Haupteinflussparameters. Ziel ist es hierbei, neben dem Verständnis dieses Parameters, die Erforschung der minimalen Kerbtiefe, die im Präge-Scherschneiden zu Gratfreiheit führt.

8.3 Versuchsblock 3: Haupteinflussparameter

8.3.1 Versuchskonfigurationen

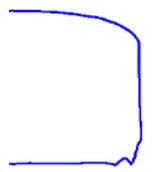
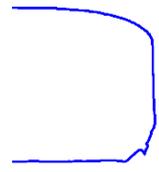
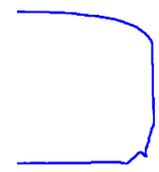
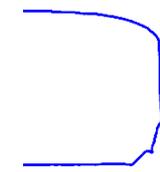
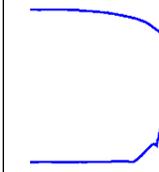
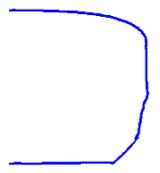
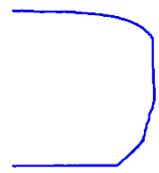
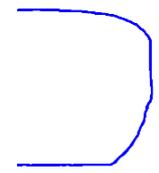
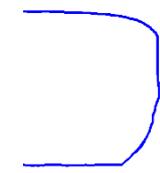
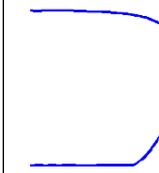
Der Parameter Kerbtiefe ist von entscheidender Bedeutung für ein gratfreies Schneidergebnis beim Präge-Scherschneiden. In diesem Versuchsblock erfolgt die genauere Untersuchung dieses Parameters. Auf Grundlage der für ein gratfreies Schneidergebnis ausgewählten Versuche aus dem Versuchsblock 2, erfolgt durch Verringerung der Ausgangshubhöhe in jeweils 0,01 mm-Schritten eine geringere Kerbeinprägung, bis ein gratbehaftetes Schneidergebnis erkennbar ist. Auf diese Weise wird die Grenze des gratbehafteten Bereiches zum gratfreien Bereich in Abhängigkeit der Kerbtiefe ermittelt. Wie auch in den vorherigen Versuchsblöcken werden in diesem Versuchsblock die Blechwerkstoffe Tiefziehstahl (DC04), Edelstahl (1.4301), Aluminium (AA 6014), und Kupfer (CuSn6) untersucht.

8.3.2 Versuchsergebnisse

In Analogie zu den vorherigen Versuchsblöcken (siehe Kap. 8.1 und 8.2, S. 69-90) erfolgt in diesem Versuchsblock zuerst der offene Schnitt am Werkstoff DC04, bevor eine Gegenüberstellung mit dem geschlossenen Schnitt, sowie ein Vergleich zwischen den untersuchten Werkstoffen (DC04, 1.4301, AA 6014 und CuSn6) durchgeführt wird.

Tabelle 8-4 zeigt die realen Schnittflächenausprägungen beim Werkstoff DC04 in Abhängigkeit des Parameters Kerbtiefe im offenen Schnitt (übrige Versuchseinstellungen: T2, siehe Tabelle 8-3, S. 86).

Tabelle 8-4: Schnittflächenausprägungen (experimentell) in Abhängigkeit des Parameters Kerbtiefe

Kerbtiefe [mm]	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
Schnittfläche					
Kerbtiefe [mm]	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48
Schnittfläche					

Die Ergebnisse zeigen bei einer Kerbtiefe von mindestens 0,4 mm (40% der Blechdicke) eine gratfreie Schnittflächenausprägung. Ist die Kerbtiefe geringer als 0,4 mm, entsteht an der Blechunterseite eine doppelt scharfkantige Geometriebildung, die im weiteren Verlauf der vorliegenden Forschungsarbeit als Doppelgrat definiert wird. Je geringer die Kerbtiefe, desto deutlicher ist diese Geometriebildung des Doppelgrates zu beobachten. Tritt Doppelgrat auf, so ist die ursprüngliche Kerbgeometrie meist nur noch ansatzweise erkennbar.

Dieser Gratbildungsmechanismus basiert weder auf dem Gratbildungsmechanismus des Normalschneidens (Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius, siehe Kap. 2.2, S. 5-11), noch auf den bereits erforschten gratfreiheit-begrenzenden Mechanismen bei der Positionierung der Kerbe (Vorbeischneiden bzw. Abreißen, siehe Kap. 8.1, S. 69-86). Begründen lässt sich dieser Doppelgrat bei genauerer Betrachtung des Werkstoffverhaltens mit Hilfe des Simulationsmodells (siehe Kap. 7.3, S. 62-67). Tabelle 8-5 veranschaulicht das Werkstoffverhalten während des Schneidprozesses beim Präge-Scherschneiden. Hierbei ist der Schneidprozess mit einer

Kerbtiefe von 0,3 mm (Doppelgratbildung aufgrund zu geringer Kerbtiefe) dem Schneidprozess mit einer Kerbtiefe von 0,4 mm (gratfreie Schnittflächenausprägung) gegenübergestellt.

Tabelle 8-5: Schneidprozess beim Präge-Scherschneiden für unterschiedliche Kerbtiefen

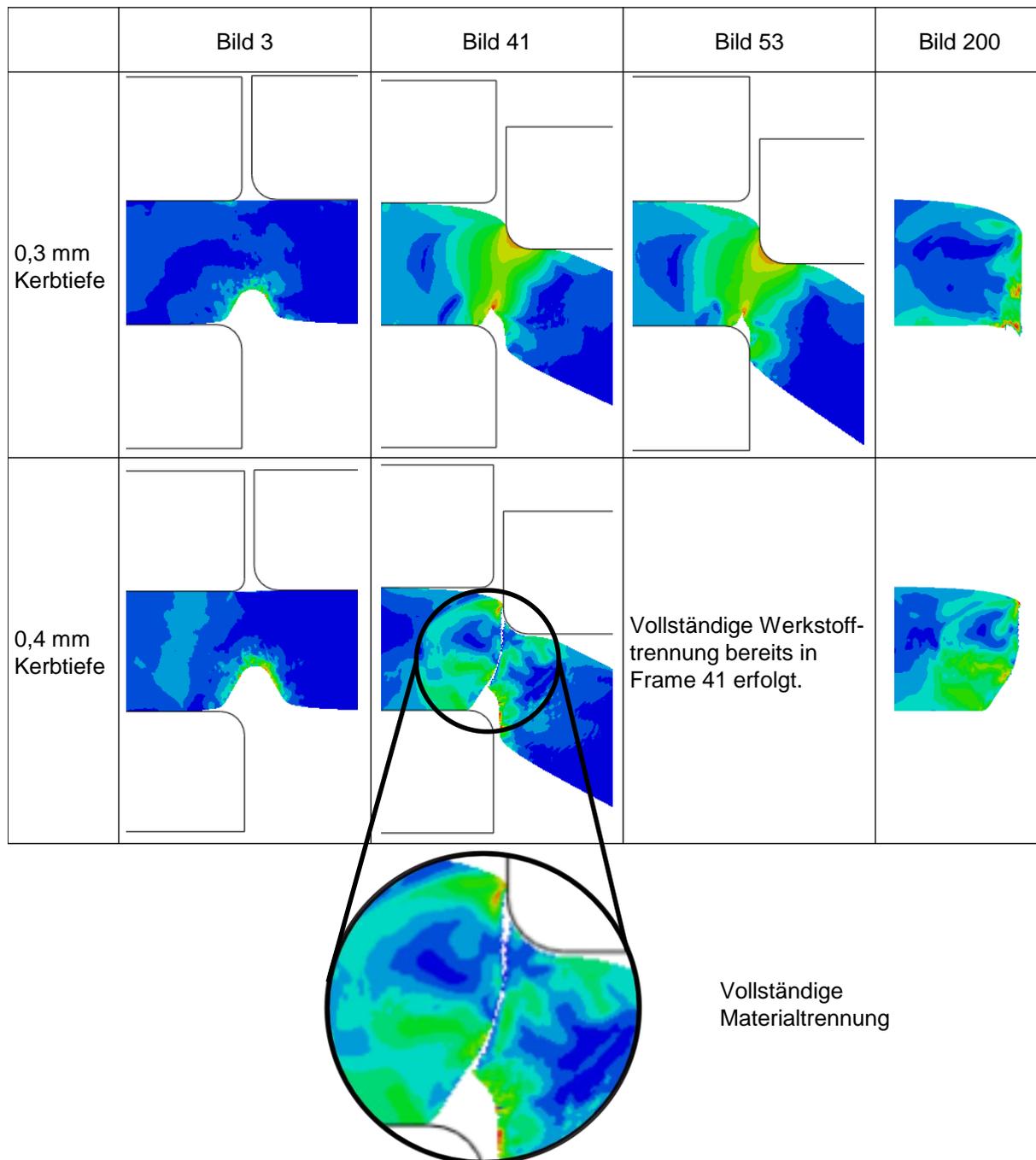


Bild 3 der Tabelle stellt das Klemmen des Blechstreifens durch den Niederhalter dar, bevor der Schneidvorgang durch die Stempelbewegung beginnt. Bild 41 zeigt den Schneidvorgang. Es kommt zur vollständigen Werkstofftrennung bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm (siehe vergrößerter Bereich), während die Simulation mit zu geringer Kerbtiefe (0,3 mm) eine weitere plastische Ver-

formung erkennen lässt. Bei zu geringer Kerbtiefe ist ein starkes Umklappen der Kerbe zu beobachten und der Blechwerkstoff dringt in den Kerbbereich ein. Hierdurch ist die ursprüngliche Kerbgeometrie nicht mehr vorhanden bzw. nur noch ansatzweise, stark verzerrt sichtbar. Die weitere plastische Verformung führt zwangsläufig zum schlagartigen, ungewünschten Kontakt mit dem Matrizenradius (siehe Tabelle 8-5, Bild 53). Erhöhter Verschleiß am Stempel und Flitterbildung im Werkzeug sind gravierende negative Folgen. Während die Werkstofftrennung bei einer groß genug gewählten Kerbtiefe bereits vollständig erfolgt ist, findet bei zu gering gewählter Kerbtiefe eine Anformung an den Schneidmatrizenradius statt. Hierbei entsteht Grat. Aufgrund des starken Umklappens des Blechwerkstoffes bei zu gering eingestellter Kerbtiefe wird dieser Mechanismus in der vorliegenden Forschungsarbeit als „Umklappmechanismus“ bzw. „Umklappen“ definiert. Ein Indikator für diesen Mechanismus ist die doppelte Gratbildung an der Blechunterseite. Mit entsprechend großen Werten für den Parameter Kerbtiefe kann dieser Umklappmechanismus vollständig verhindert werden. Beim Blechwerkstoff DC04 beträgt dieser Wert (Mindestkerbtiefe für Gratfreiheit) im offenen Schnitt 40% der Blechdicke (0,4 mm im untersuchten Fall). Bei den vier untersuchten Werkstoffen in Kombination mit den beiden Schneidvarianten (offener und geschlossener Schnitt) zeigen sich unterschiedliche Mindesteindringtiefen für Gratfreiheit am Schnittteil. Abbildung 8-22 zeigt diese erforderlichen Mindesteindringtiefen. Neben den Mindesteindringtiefen ist weiterhin die Bruchdehnung der einzelnen Werkstoffe dargestellt.

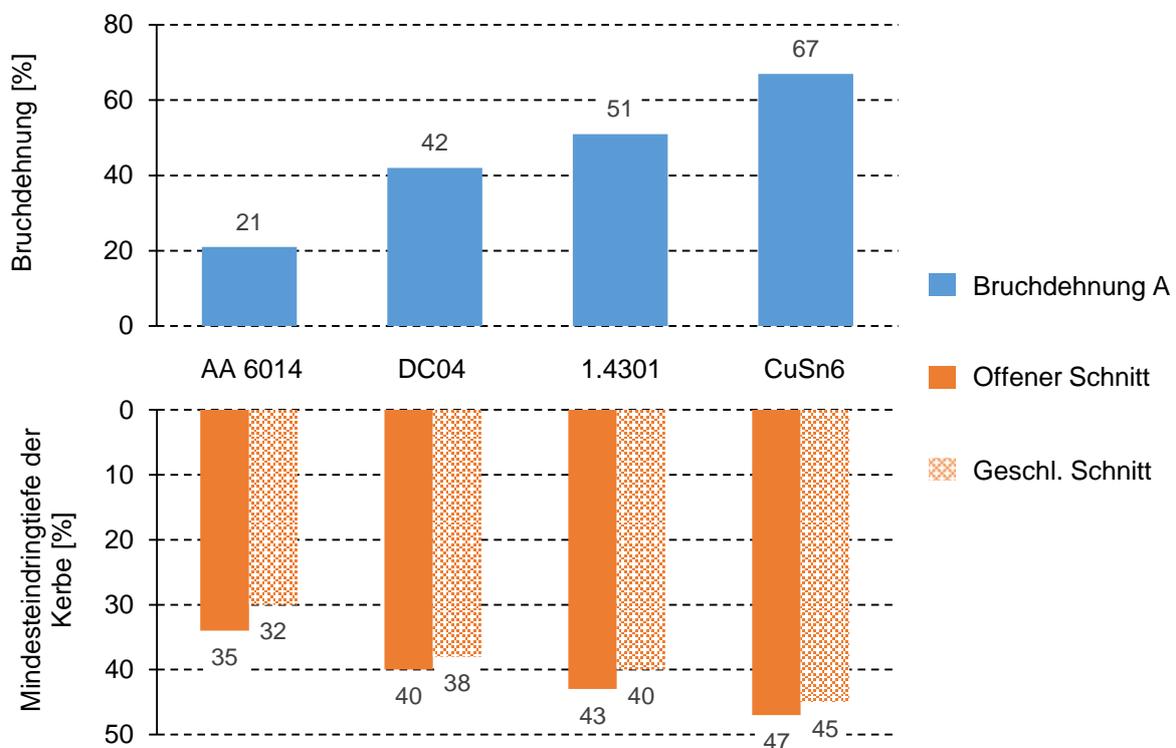


Abbildung 8-22: Mindesteindringtiefe der Kerbe in Abhängigkeit der Bruchdehnung

Deutlich erkennbar in Abbildung 8-22 ist die Abhängigkeit der nötigen Mindesteindringtiefe von der Bruchdehnung. Je größer die Bruchdehnung, desto größer muss die nötige Mindesteindringtiefe für Gratfreiheit gewählt werden. Erklären lässt sich diese Abhängigkeit wie bei der Erklärung zur Begrenzung der negativen Positionierung (siehe Kap. 8.1.1, S. 80). Während beispielsweise der Aluminiumwerkstoff frühzeitig bricht und somit bei einer Eindringtiefe der Kerbe von 0,35 mm (35% der Blechdicke) im offenen Schnitt bereits Gratfreiheit aufzeigt, ist bei gleicher Eindringtiefe der Kerbe bei den anderen drei Werkstoffen noch kein Bruch vorhanden. Weitere plastische Verformung in der Scherzone führt bei diesen drei Werkstoffen zum Umklappvorgang und zur Anformung an den Schneidmatrizenradius. Die vollständige Werkstofftrennung erfolgt bei diesen Werkstoffen erst nach dieser Anformung an den Schneidmatrizenradius. Somit kann sich der Schnittgrat problemlos ausbilden. Wird die Eindringtiefe bei den drei Werkstoffen (1.4301, DC04 und CuSn6) jedoch erhöht, so kommt es auch hier zur frühzeitigen Werkstofftrennung, und die Gratbildung entfällt vollständig. Je duktiler ein Werkstoff ist, desto größer muss die nötige Mindesteindringtiefe der Kerbe gewählt werden.

Aus Abbildung 8-22 ist zu entnehmen, dass der offene Schnitt für Gratfreiheit bei allen vier untersuchten Blechwerkstoffen immer eine deutlich größere Mindesteindringtiefe (2% - 4%) benötigt als der geschlossene Schnitt. Grund hierfür ist das Abknicken beim offenen Schnitt, welches zu Druckspannungen im Blechwerkstoff führt. Durch diese Überlagerung mit Druckspannungen kommt es (mikroskopisch) zu einer späteren Öffnung der Poren und die Rissinduzierung, die beim Präge-Scherschneiden ausschließlich an der Blechunterseite beginnt, findet im offenen Schnitt erst später statt als im geschlossenen. So ist beispielsweise bei einer Kerbtiefe von 0,32 mm (32% der Blechdicke) und dem Blechwerkstoff AA 6014 gratfreies Präge-Scherschneiden im geschlossenen Schnitt möglich, während der offene Schnitt bei ansonsten gleichen Parametern aufgrund einer späteren Rissinduzierung und dem damit verbundenen Umklappmechanismus noch zur Gratabbildung führt. Eine Erhöhung der Kerbtiefe beim offenen Schnitt um 4% führt hingegen zur frühen Rissinduzierung, bei der kein Umklappmechanismus mehr auftritt. Analog verhalten sich die übrigen untersuchten Werkstoffe (DC04, 1.4301 und CuSn6) bezüglich der Schneidvarianten offen und geschlossen. Die Mindesteindringtiefe beträgt im offenen 2-4% mehr als im geschlossenen Schnitt für alle untersuchten Blechwerkstoffe.

Wie bei der Positionierung stellen die gezeigten Mindesteindringtiefen (siehe Abbildung 8-22, S. 93) absolute, werkstoffabhängige Grenzen dar, die essentiell für ein gratfreies Schneiden sind. Ohne Beachtung dieser Mindesteindringtiefen ist auch bei optimaler Einstellung aller übrigen Kerb- und Schneidparameter keine gratfreie Schnittfläche zu erzielen.

8.4 Versuchsblock 4: einstufiges Verfahren

8.4.1 Versuchskonfigurationen

Die Erkenntnisse aus den grundlegenden Untersuchungen (siehe Kap. 8.1-8.3, S. 69-94) werden in diesem Versuchsblock verwendet, um eine sinnvolle Kerbgeometrie für das einstufige, gratfreie Schneiden zu finden. Im Gegensatz zum zweistufigen Verfahren besteht in der Realität beim einstufigen Verfahren keine Möglichkeit im negativen Bereich (Bereich der Gratfreiheit beim zweistufigen Verfahren) die Kerbe zu positionieren, da sonst die Kerbe mit dem Obermesser kollidiert. Aus Abbildung 8-2 (siehe Kap. 8.1.2, S. 71) ist ersichtlich, dass bei größer werdender positiver Positionierung die Grathöhe annähernd linear ansteigt. Verfahrenstechnisch ist die Positionierung beim einstufigen Verfahren aber nur im positiven Bereich möglich und erfolgt daher im Bereich kleiner, positiver Positionierung. Um den Bereich kleinster positiver Positionierung zu realisieren, verläuft der Kerbschenkel B als Verlängerung der Untermessermantelfläche (Abbildung 8-23).

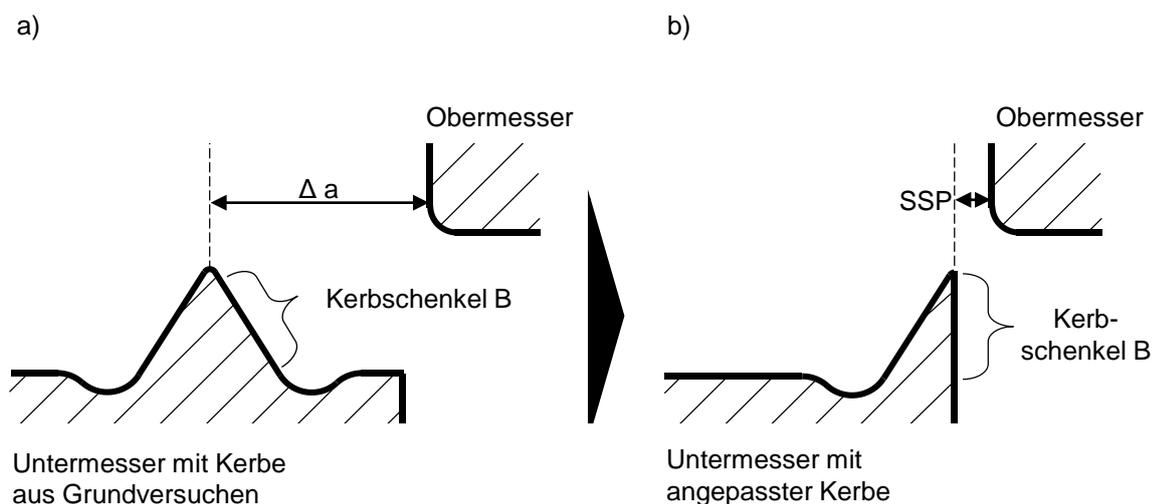


Abbildung 8-23: Ausgangsform (a) und angepasste Form des Untermessers (b)

Sobald der Kerbschenkel B kongruent zur Mantelfläche des Untermessers verläuft, ist der horizontale Abstand von der Kerbspitze zum Obermesser minimal (Abbildung 8-23). In diesem Fall entspricht der horizontale Abstand von der Kerbspitze zum Obermesser dem Schneidspalt (SSP). Somit stellt die Positionierung der Kerbe den geringstmöglichen positiven Positionierungswert dar.

Da die Fertigung des Untermessers mit entsprechend geringen Toleranzen sehr kostenintensiv ist, werden die beiden Parameter Kerbtiefe und -radius zu Beginn dieses Versuchsblockes mit Hilfe einer Simulationsstudie analysiert. In der Simulationsstudie erfolgt die vollfaktorielle Untersuchung des Parameters Kerbtiefe (0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm) in Kombination mit dem Parameter Kerbradius (0 mm, 0,05 mm, 0,15 mm und 0,2 mm). Diese insgesamt 16 Simulationen sollen zur Lösungsfindung sinnvoller Kerbgeometrien beim einstufigen Verfahren führen. Mit

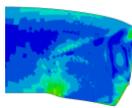
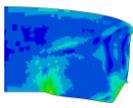
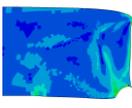
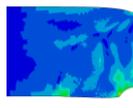
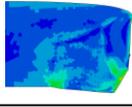
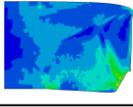
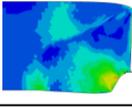
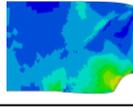
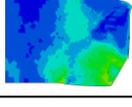
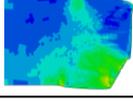
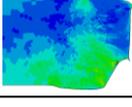
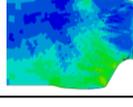
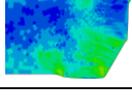
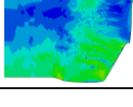
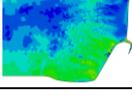
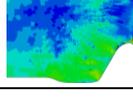
Hilfe mehrerer Versuchsschleifen wird die Geometrie der Kerbe auf diese Weise verbessert. Nachdem sinnvolle Geometrien mit Hilfe der Simulation gefunden worden sind, erfolgt die Fertigung ausgewählter Kerbgeometrien zum Ziel der experimentellen Überprüfung des einstufigen Prägescherschneidens. Der Blechwerkstoff CuSn6 wird verwendet, da dieser die geringste Festigkeit aller Versuchswerkstoffe hat (siehe Kapitel 5.1.4, S. 41) und somit die Gefahr einer Beschädigung der Kerbe (Ausbrechen der Kerbe) möglichst verhindert werden soll.

8.4.2 Versuchsergebnisse

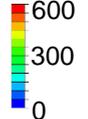
Simulation zur Findung der Kerbgeometrie

Die Versuchsergebnisse der Simulation zeigt Tabelle 8-6. Zu sehen sind die Schnittflächen in Abhängigkeit der Parameter Kerbtiefe und Kerbradius.

Tabelle 8-6: Simulationsergebnisse der ersten Simulationsreihe

Kerbradius [mm] \ Kerbtiefe [mm]	0	0,05	0,15	0,20
0,1				
0,2				
0,3				
0,4				

$\sigma_{v. Mises}$ [N/mm²]



600
300
0

Alle simulierten Schnittflächen zeigen eine Wulstbildung an der Blechunterseite. Grund hierfür ist der konstruierte Hinterschnitt am Untermesser. Abbildung 8-24 verdeutlicht den simulierten Schneidprozess in mehreren Schneidphasen. Nachdem das Blech auf dem Untermesser aufliegt (Abbildung 8-24 a und b), erfolgt aufgrund der weiteren Stempelbewegung eine plastische Formänderung des Blechwerkstoffes in den Bereich des Hinterschnittes hinein (Abbildung 8-24 c-e). Hierdurch entsteht die Wulstbildung (rote Markierung in Abbildung 8-24).

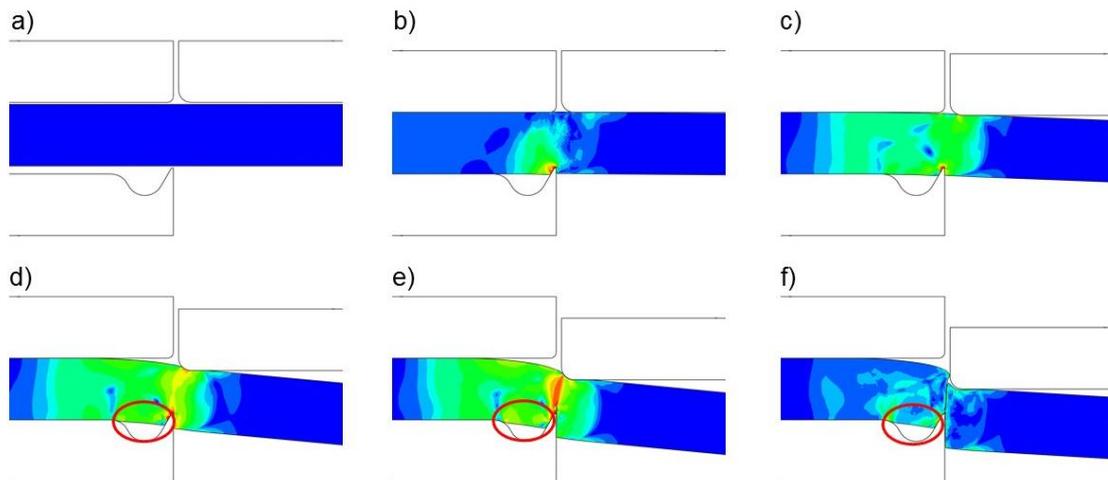


Abbildung 8-24: Simulation des Scherschneidvorganges mit Einförmigkeit in den Hinterschnitt

Da die Wulstbildung unerwünscht ist, erfolgt in einer weiteren Simulationsschleife die Diskretisierung des Untermessers ohne Hinterschnitt (Abbildung 8-25 b), um eine verbesserte Schnittflächengeometrie zu erhalten.

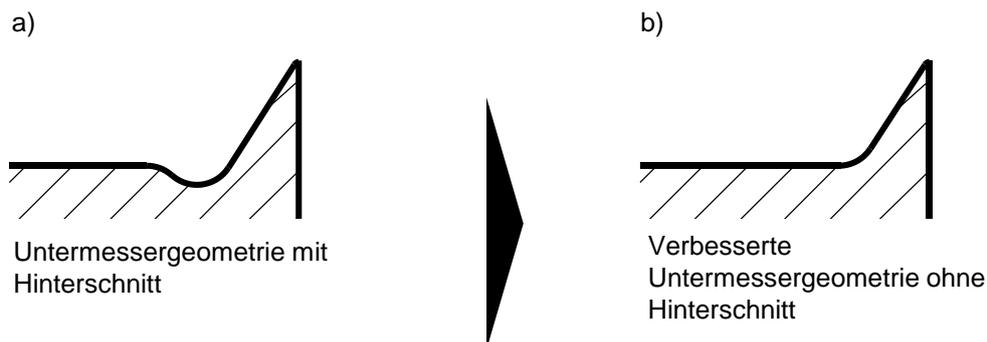
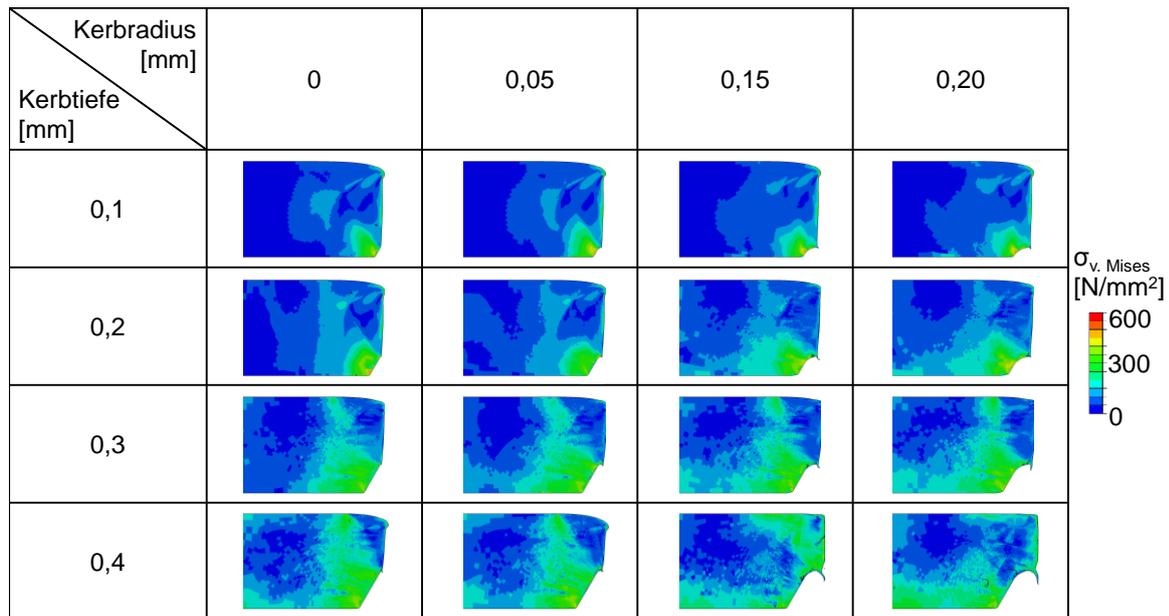


Abbildung 8-25: Untermessergeometrie mit (a) und ohne (b) Hinterschnitt

Der Radius zwischen Kerbschenkel und horizontaler Gerade ist fertigungstechnisch unvermeidbar, da in der Fertigung beim Drahterodieren der minimale Radius dem Radius des Erodierdrahtes entspricht ($20\ \mu\text{m}$). Die Simulationsergebnisse der Simulationsreihe mit dem veränderten Untermesser (ohne Hinterschnitt) können in Tabelle 8-7 eingesehen werden.

Neben der geometrischen Ausprägung der Schnittflächen zeigt die Tabelle 8-7 die auftretenden Spannungen nach von Mises. Diese Spannungen sind aufgrund der Materialverdrängung maximal im Bereich der Kerbe ($583\ \text{N/mm}^2$). Weiterhin zeigen die Simulationsergebnisse Grاتفreiheit bei Kerbradien von $0\ \text{mm}$ und $0,05\ \text{mm}$, während hingegen bei den übrigen beiden Kerbradien ($0,15\ \text{mm}$ und $0,2\ \text{mm}$) Grat vorhanden ist. Geringe Kerbradien führen in der Simulation zu einem (gerichteten) Riss hin zur Kerbspitze und somit zur Grاتفreiheit. Bei größerer Kerbverrundung findet hingegen keine gerichtete Rissbildung zur Kerbspitze statt, und erhöhte Grاتفbildung liegt vor.

Tabelle 8-7: Simulationsergebnisse der zweiten Simulationsreihe



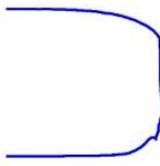
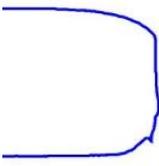
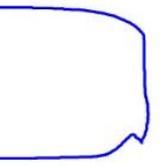
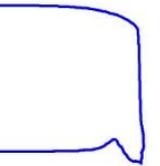
Die Simulationsergebnisse zum Parameter Kerbtiefe zeigen Gratfreiheit bei geringen Kerbtiefen (0,1 mm und 0,2 mm), während hingegen bei der größten gewählten Kerbtiefe (0,4 mm) unabhängig vom Kerbradius keine Gratfreiheit vorhanden ist. Aufgrund dieser Simulationsergebnisse werden für die experimentellen Versuche möglichst kleine Kerbradien in Kombination mit den vier bereits in der Simulation untersuchten Kerbtiefen näher untersucht.

Experimentelle Versuche

In Anlehnung an die Simulationsergebnisse (kein Hinterschnitt, geringer Kerbradius) findet die Konstruktion der Untermessergeometrien statt. Um des Ausbrechen der Kerbspitze zu vermeiden, wird diese mit einem Radius von 20 μm verrundet. Die Kerbtiefen 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm werden experimentell untersucht.

Die Schnittflächenausprägungen aus den experimentellen Untersuchungen zum einstufigen Verfahren können in der folgenden Tabelle eingesehen werden.

Tabelle 8-8: Schnittflächenausprägungen (experimentell) beim einstufigen Präge-Scherschneiden

Kerbtiefe [mm]	0,10	0,20	0,30	0,40
Schnittfläche				

Alle vier untersuchten Kerbtiefen führen zu Gratausprägung. In Abbildung 8-26 sind die zugehörigen Schneidleisten nach den Versuchen dargestellt. Alle vier Schneidleisten zeigen einen makroskopischen Ausbruch an der Schneidkante (Ausbruch der Kerbgeometrie). Je größer die Kerbtiefe gewählt ist, desto größer ist das Volumen der weggebrochenen Kerbe und der Grat am Schnittteil (siehe Tabelle 8-8 und Abbildung 8-26). So wird bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm eine Grathöhe von etwa 24,9% erreicht, während bei einer Kerbtiefe von 0,1 mm die Grathöhe nur 2,9% beträgt. Die Ausbrüche der Kerbgeometrie entsprechen der gesamten Blechbreite. Aufgrund der größeren Breite der Schneidleisten als die Breite der Blechstreifen stehen an beiden Seiten der Schneidleisten 5 mm unbeschadete Kerbgeometrie über (siehe Vergrößerung in Abbildung 8-26).

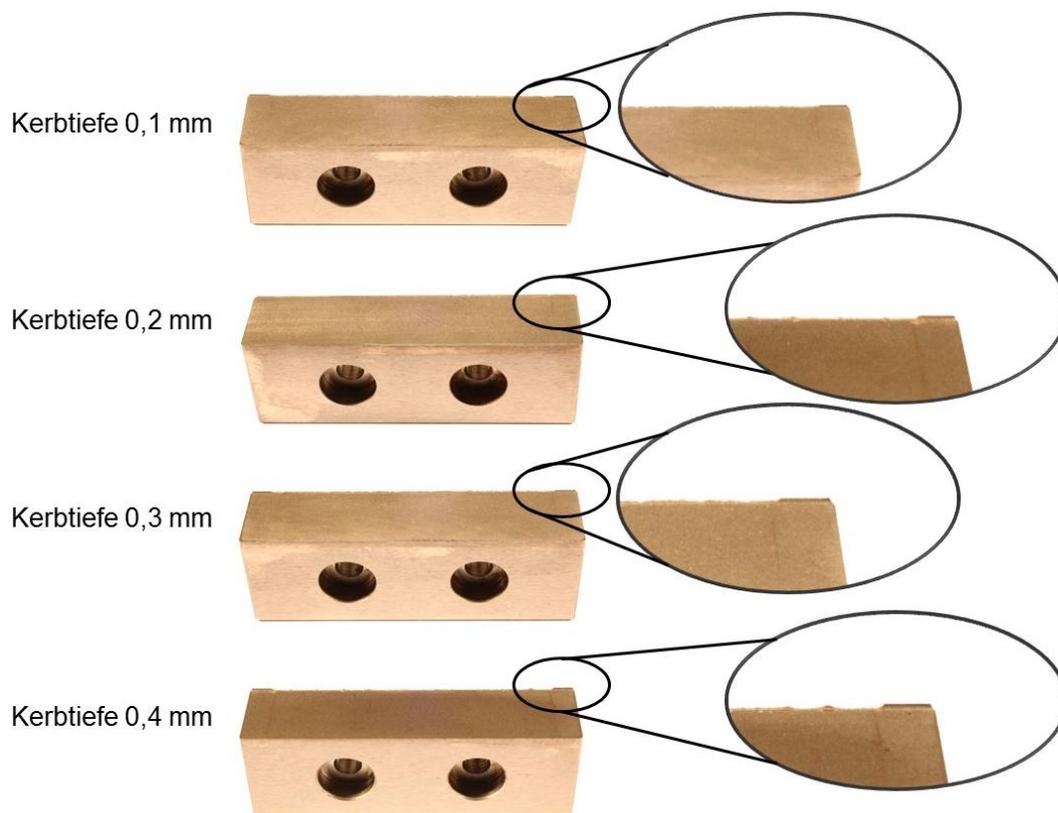


Abbildung 8-26: verwendete Schneidleisten mit Ausbrüchen

Der Effekt des Ausbrechens der Kerbe tritt beim ersten Hub auf, weil hohe Querkräfte auf die Kerbe wirken. Aufgrund des Ausbrechens der Kerben entspricht der Prozess nicht mehr dem Präge-Scherschneiden sondern dem Normalschneiden, und Grاتفreiheit kann nicht mehr gewährleistet werden. Abbildung 8-27 zeigt die auftretenden Querkräfte aus der Simulation.

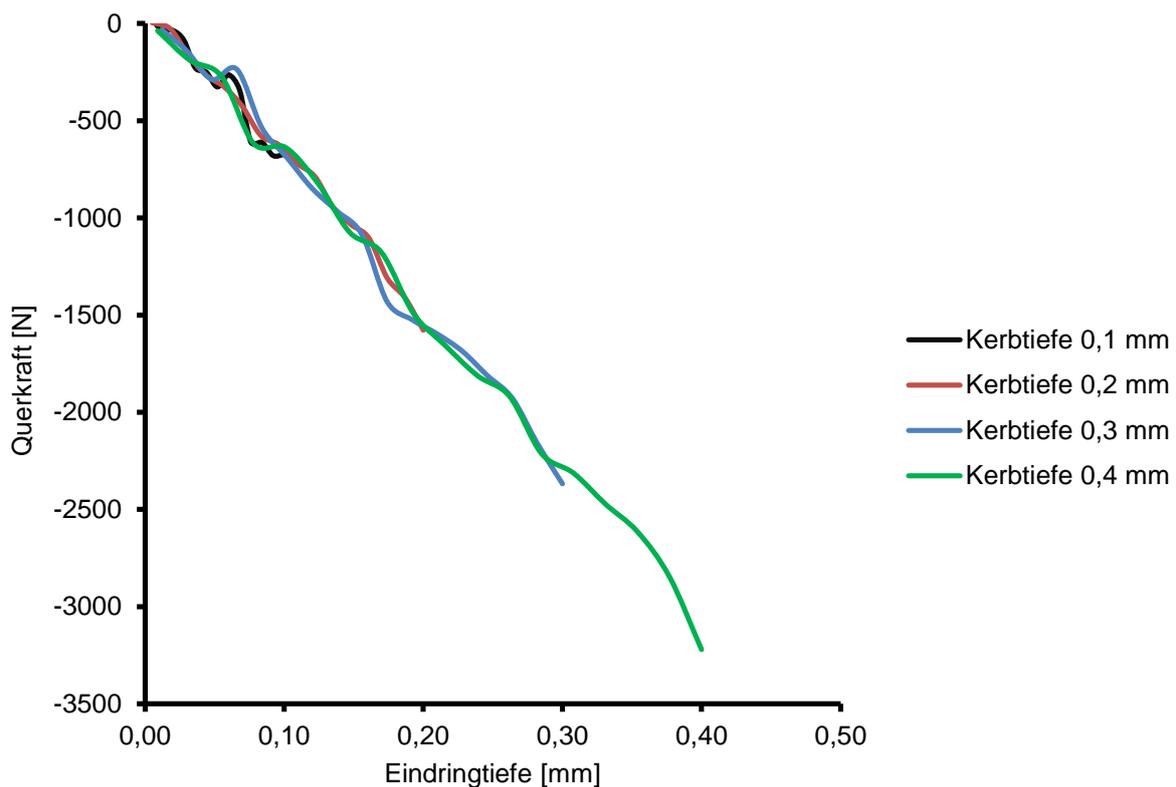


Abbildung 8-27: simulierte Querkräft in Abhängigkeit der Kerbtiefe

Der funktionale Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Querkräft ist annähernd linear mit einem Maximalwert von -3220 N bei einer Eindringtiefe von 0,4 mm. Schon bei einer Kerbtiefe von 0,1 mm zeigen sich hohe Querkräfte von 723 N. Diese hohen Querkräfte führen zum Ausbrechen der Kerbgeometrien aller vier Untermesser. Dadurch ist am Bauteil keine Gratfreiheit vorhanden.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen eindeutig, dass die gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchsblöcken des zweistufigen Verfahren (siehe Kap. 8.1-8.3, S. 69-94) nicht für das einstufige Verfahren übernommen werden können. Mit den erforschten Parameterkonfigurationen, die im zweistufigen Verfahren Gratfreiheit als Folge haben, lässt sich keine Gratfreiheit im einstufigen Verfahren sicherstellen.

8.5 Versuchsblock 5: Kerbwinkel

8.5.1 Versuchskonfigurationen

In diesem Versuchsblock wird ausschließlich der Kerbwinkel variiert. Konstante Parameter sind die Kerbtiefe (0,5 mm), der Kerbradius (0,05 mm) sowie die Positionierung der Kerbe (-0,1 mm), die in den Versuchsblöcken 1 bis 3 zu einer gratfreien Schnittfläche geführt haben (siehe Kap. 8.1-8.3, S. 69-94). Ausgehend von den gratfreien Schneidergebnissen in den Versuchsblöcken 1 bis 3

wird der in den bisherigen Experimenten verwendete Kerbwinkel von 60° in diesem Versuchsblock in Abständen von 10° -Schritten variiert, um den Einfluss unterschiedlicher Kerbwinkel auf das Schneidergebnis zu untersuchen (Abbildung 8-28).

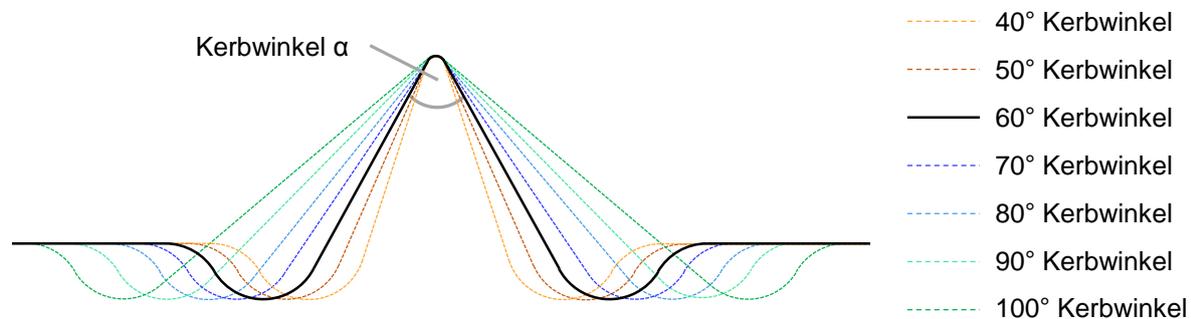


Abbildung 8-28: Detailansicht der untersuchten Kerbkonturlinien

Der Hinterschnitt bleibt bei allen Geometrien erhalten. Insgesamt werden 7 unterschiedliche Kerbwinkel untersucht (40° , 50° , 60° , 70° , 80° , 90° , 100°). Die Untersuchung erfolgt am offenen und geschlossenen Schnitt beim Blechwerkstoff DC04. Es wird nur ein Blechwerkstoff verwendet, da es sich um eine Prinzipuntersuchung des Parameters Kerbwinkels handelt, und der Blechwerkstoff nicht im Vordergrund der Untersuchung steht. Somit ergeben sich 14 Versuche.

8.5.2 Versuchsergebnisse

Die Konturvermessungen der Schnittflächen aus den Versuchen für den offenen und geschlossenen Schnitt können Tabelle 8-9 entnommen werden.

Tabelle 8-9: Einfluss des Kerbwinkels auf die reale Schnittflächenausprägung

Kerbwinkel [°]	40	50	60	70	80	90	100
Schnittfläche (offen)							
Schnittfläche (geschl.)							

Sowohl beim offenen als auch beim geschlossenen Schnitt zeigen sich ähnliche Tendenzen: Kleine Kerbwinkel (z. B.: 40°) führen zu einem gratfreien Ergebnis mit geringem Kanteneinzug, während hingegen große Kerbwinkel (z. B.: 100°) zur Gratausbildung und großen Kanteneinzugshöhen führen. Allerdings tritt die Gratausbildung beim offenen Schnitt schon ab einem Kerbwinkel von

70° auf, wohingegen beim geschlossenen Schnitt dies erst bei einem Kerbwinkel von 80° zu beobachten ist. Im Falle der Gratausbildung zeigt sich, dass der Grat nicht über die Blechdicke hinausragt und somit nicht der Gratbildungsmechanismus des Normalschneidens (Anformung der Blechunterseite an den Schneidmatrizenradius) vorliegt. Der Gratbildungsmechanismus wird mit Hilfe der Abbildung 8-29 ersichtlich.

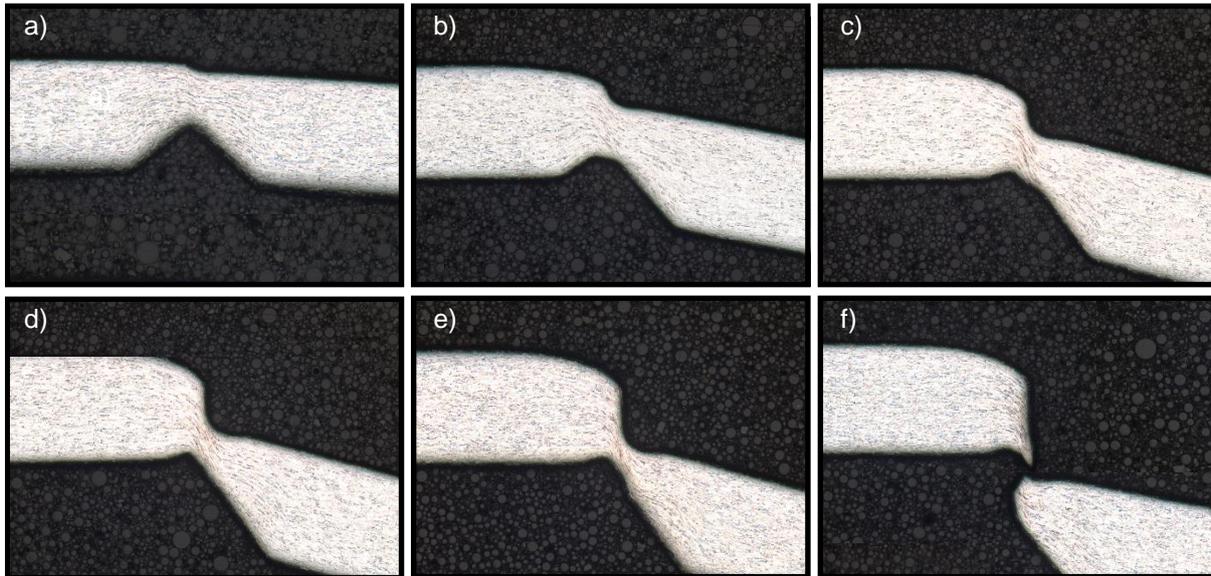


Abbildung 8-29: Metallografische Schliffe des Schneidvorgangs beim 100°-Kerbwinkel

Abbildung 8-29 zeigt das Werkstoffverhalten in der Scherzone während des Schneidvorgangs für einen großen Kerbwinkel (100°). Zu Beginn des Schneidvorganges (siehe Abbildung 8-29 a) ist die gesamte Kerbgeometrie noch vollständig im Blech sichtbar. Durch fortschreitende Stempelbewegung (siehe Abbildung 8-29 b-e) findet eine geometrische Veränderung der Kerbgeometrie im Blech statt. Die plastische Umformung bedingt ein Fließen des Materials in den Kerbbereich hinein. Als Ergebnis ist die Kerbe nur noch ansatzweise sichtbar (siehe Abbildung 8-29 e). Die Schnittflächenausprägung (siehe Abbildung 8-29 f) zeigt den schon beschriebenen Doppelgrat aus dem dritten Versuchsblock (siehe Kap. 8.3, S. 90-94).

Der hier vorliegende Gratbildungsmechanismus kann eindeutig dem „Umklappmechanismus“ zugeordnet werden (siehe Kap. 8.3.2, S. 91-94). In der Scherzone klappt der linke Kerbschenkel (Kerbschenkel a) nach unten weg, und das Material dringt in den Kerbbereich (Luftspalt an der Blechunterseite aufgrund der Kerbeinprägung) ein. Es findet keine frühe Rissinduzierung statt, und das Ziel der frühen Werkstofftrennung tritt nicht auf. Eine doppelte, scharfkantige Geometrieausbildung („Doppelgrat“) an der Blechunterseite ist erkennbar. Die Grenzen für gratfreie Schnittflächenausprägungen liegen beim offenen Schnitt bei 60° und beim geschlossenen Schnitt bei 70°. Eine Gratfreiheit bei größeren Kerbwinkeln ist bei den durchgeführten Versuchskonfigurationen nicht möglich.

Der Unterschied in den maximal möglichen Gratwinkeln für eine gratfreie Schnittflächenausprägung erklärt sich aus dem Abknicken im offenen Schnitt. Das Abknicken induziert Druckspannungen an der Blechunterseite, und es findet beim offenen Schnitt ein verzögerter Rissbeginn statt. Während beim geschlossenen Schnitt die Materialtrennung bereits vollständig erfolgt ist, bewirkt der verzögerte Rissbeginn im offenen Schnitt deutlich mehr Zeit für die Durchführung des Gratbildungsmechanismus „Umklappvorgang“ (siehe Kap. 8.3.2, S. 91-94). Somit entsteht ein Bereich von Kerbwinkeln (60° - 70°), der beim offenen Schnitt Gratbildung aufzeigt, während beim geschlossenen Schnitt noch Gratfreiheit vorliegt.

Dieser Versuchsblock zeigt auf, dass die Gratausbildung infolge des Umklappmechanismus neben dem Parameter Kerbtiefe bzw. Mindesteindringtiefe (siehe Kap. 8.3, S. 90-94) zusätzlich vom Parameter Kerbwinkel abhängig ist. Durch einen entsprechend geringen Kerbwinkel (maximal 60° beim offenen Schnitt bzw. 70° beim geschlossenen Schnitt) in Kombination mit der nötigen Mindesteindringtiefe kann der Gratbildungsmechanismus „Umklappvorgang“ verhindert werden.

8.6 Versuchsblock 6: Blechdicke

8.6.1 Versuchskonfigurationen

Für die Untersuchungen im Versuchsblock 6 kommt der Werkstoff Cu-ETP (Zustand: H040) zur Anwendung (siehe Kap. 5.1.4, S. 41). Dieser wird meist in dünnen Blechen (Blechdicke ≤ 1 mm) zu Steckern und Kontakten verarbeitet und neigt aufgrund seiner Gratbildung beim Scherschneidprozess zu Kurzschlüssen im Anwendungsbereich. Eine Untersuchung unterschiedlicher Blechdicken dieses weit verbreiteten Werkstoffes ist wichtig, um zu klären, ob die erforschten Parameter für das Präge-Scherschneiden bei unterschiedlichen Blechdicken skalierbar sind. Die experimentellen Untersuchungen gehen von den Blechdicken 0,6 mm, 0,8 mm und 1,0 mm aus. Aufgrund der unterschiedlichen Blechdicken werden für die Versuche die Parameter Schneidspalt, Kerbradius, Kerbhöhe, Position der Kerbe und Schneidkantenverrundung skaliert auf die entsprechenden (oben genannten) Blechdicken. Die Untersuchungen erfolgen an den Versuchen T2, T7 und T8 im offenen Schnitt aus dem Versuchsblock 2 (siehe Kap. 8.2, S. 86), da diese Versuchskonfigurationen gratfreie Schnittflächen ergeben haben. Die skalierten Parametereinstellungen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 8-10: Übersicht der skalierten Parameter in Abhängigkeit der Blechdicke

Versuchsbezeichnung	Blechdicke [mm]	Skalierte Parameter				
		Schneidspalt [mm]	Kerbradius [mm]	Kerbtiefe [mm]	Position [mm]	Schneidkantenverrundung [mm]
T2	1,0	0,06	0,125	0,5	- 0,1	0,20
	0,8	0,048	0,1	0,4	- 0,8	0,16
	0,6	0,036	0,075	0,3	- 0,6	0,12
T7	1,0	0,1	0,05	0,5	- 0,05	0,20
	0,8	0,08	0,04	0,4	- 0,04	0,16
	0,6	0,06	0,03	0,3	- 0,03	0,12
T8	1,0	0,1	0,125	0,4	0	0,20
	0,8	0,08	0,1	0,32	0	0,16
	0,6	0,06	0,075	0,24	0	0,12

8.6.2 Versuchsergebnisse

Um eine bessere Signifikanz der Ergebnisse zu gewährleisten und mögliche Abweichungen so gering wie möglich zu halten, werden zu jedem Versuch 10 Schnittflächen vermessen. Der Vergleich der skalierten Schnittflächen erfolgt anhand der bisher untersuchten Kenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen- und Grathöhe. Die vermessenen Schnittflächen der skalierten Versuche können der Tabelle 8-11 entnommen werden.

Tabelle 8-11: Ausgewertete Schnittflächenkenngrößen (offener Schnitt) bei unterschiedlichen Blechdicken

Versuchsbezeichnung	Blechdicke [mm]	Ausgewertete Schnittflächenkenngrößen			
		Kanteneinzugs- höhe [%]	Glattschnitt- höhe [%]	Bruchflächen- höhe [%]	Grathöhe [%]
T2	1,0	9,5	42,2	48,3	0
	0,8	9,4	43,0	47,6	0
	0,6	9,7	42,0	48,3	0
T7	1,0	10,3	49,9	39,8	0
	0,8	9,8	49,4	40,8	0
	0,6	10,7	49,8	39,5	0
T8	1,0	19,4	41,8	38,8	0
	0,8	18,3	42,5	39,2	0
	0,6	18,1	42,1	39,8	0

Alle Versuche zeigen eine gratfreie Schnittfläche. Der prozentuale Anteil der Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt- und Bruchflächenhöhe stimmt jeweils bei den drei Versuchskonfigurationen für alle untersuchten Blechdicken annähernd überein. Es sind nur geringe Abweichungen in den prozentualen Schnittflächenkennwerten von maximal $\pm 1,5\%$ festzustellen. Die Versuche mit unterschiedlichen Blechdicken (0,6 mm bis 1,0 mm) zeigen bei den entsprechenden skalierten Parametern (Schneidspalt, Kerbradius, Kerbhöhe, Position der Kerbe und Schneidkantenverrundung) eindeutig gleiche (prozentuale) Schnittflächenausprägungen.

Beim Normalschneiden können mit Hilfe entsprechender Skalierung der Schneidparameter (Schneidspalt und Kantenverrundung) annähernd gleiche (prozentuale) Schnittflächenkennwerte erreicht werden (Dolmetsch et al., 2013, S. 42–52). Für das Präge-Scherschneiden zeigen die Versuche wie beim Normalschneiden eine annähernd gleiche (prozentuale) Schnittflächenausprägung bei den unterschiedlichen Blechdicken im Bereich von 0,6 mm bis 1,0 mm. Allerdings müssen neben den Schneidparametern (Schneidspalt und Kantenverrundung) die Kerbparameter (Kerbradius, Kerbtiefe und Positionierung der Kerbe) adäquat skaliert werden. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Blechdicke (im Bereich von 0,6 mm bis 1,0 mm) und den Kerb- und Schneidparametern beim Präge-Scherschneiden. Mit den in diesem Versuchsblock gewonnen Erkenntnissen ist bewiesen, dass das neue Verfahren für ein breites Anwendungsspektrum (Blechdicken von 0,6 mm bis 1,0 mm) verfügbar ist. Die vorliegenden Ergebnisse aus den vorherigen Versuchsblöcken (siehe Kap. 8.1-8.3, S. 69-94) sind auf unterschiedliche Blechdicken (0,6 mm bis 1,0 mm) anwendbar. Die Erkenntnisse der linearen Skalierung aller Schneid- und Kerbparameter innerhalb des Blechdickenbereiches von 0,6 mm bis 1,0 mm erweitern den Anwendungsbereich für das Präge-Scherschneiden erheblich, denn die Gratfreiheit in diesem Blechdickenbereich stellt in der Praxis, z.B. im Bereich der Steck- und Kontaktverbindungen aus Cu-ETP, eine unerlässliche Prämisse dar.

8.7 Versuchsblock 7: Werkstofffestigkeit

8.7.1 Versuchskonfigurationen

Im Walzprozess und im oftmals anschließenden Glühprozess können unterschiedliche mechanische Eigenschaften eines Werkstoffes eingestellt werden. In diesem Versuchsblock wird der Werkstoff Cu-ETP (siehe Kap. 5.1.4, S. 41) bewusst in der Konfiguration H040 mit der Konfiguration R360 verglichen, da diese beiden Konfigurationen die Extremwerte der Festigkeit (H040: geringe Festigkeit und hohe Duktilität bzw. R360: hohe Festigkeit und geringe Duktilität) für derzeitige industrielle Anwendungen aufweisen. Der Vergleich soll Auskunft darüber geben, welchen Einfluss ausschließlich unterschiedliche Festigkeitszustände eines Werkstoffes auf die Schnittflä-

chenausprägung bzw. Gratfreiheit haben. Die Versuchseinstellungen in diesem Versuchsblock basieren auf den Ergebnissen gratfreier Schnittflächen aus dem Versuchsblock eins mit der Kerbtiefe von 0,6 mm und dem offenen Schnitt (siehe Kap. 8.1, S. 69). Anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Kerbpositionen erfolgt ein Vergleich der beiden Werkstoffklassen H040 und R360.

8.7.2 Versuchsergebnisse

Wie im vorherigen Kapitel erfolgt die Auswertung der Schnittflächenkenngrößen an jeweils 10 gemessenen Schnittflächen pro Positionseinstellung um einen arithmetischen Mittelwert zu erhalten. Die Untersuchung wird anhand der Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen- und Grathöhe durchgeführt. Abbildung 8-30 zeigt die entsprechenden Mittelwerte in Abhängigkeit der Positionierung.

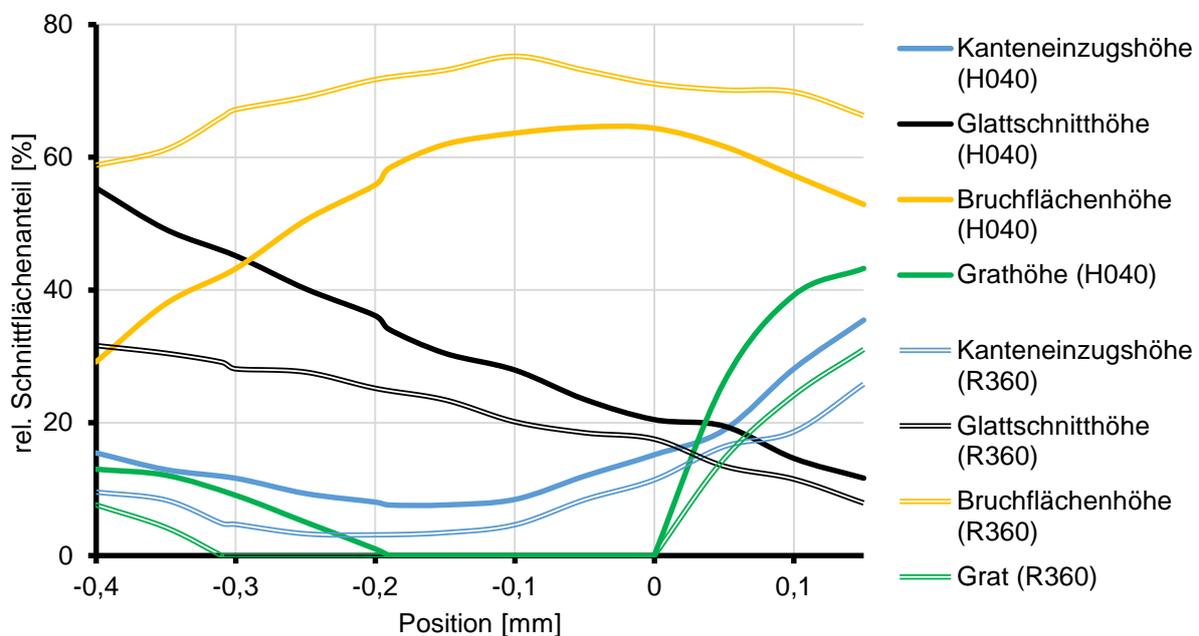


Abbildung 8-30: Vergleich der Schnittflächenausprägungen bei den Cu-ETP-Werkstoffklassen H040 und R360

In der Abbildung 8-30 beziehen sich einfach durchgezogene Linien auf die Werkstoffklasse H040, während doppelt durchgezogene Linien der Werkstoffklasse R360 zugeordnet sind.

Im Präge-Scherschneiden der beiden Werkstoffklassen sind die gleichen Tendenzen bezüglich Gratfreiheit zu erkennen wie im ersten Versuchsblock (siehe Kap. 8.1, S. 71). Bei Positionierung der Kerbe im positiven Bereich ist aufgrund des Abknickmechanismus keine Gratfreiheit möglich. In diesem Bereich liegt eine absolute, werkstoffunabhängige Grenze bezüglich Gratfreiheit (Kerbposition bei null) vor. Im negativen Bereich beginnt die Gratbildung bei 0,19 mm (H040) bzw. 0,31 mm (R360). Wie auch im ersten Versuchsblock ist der Grund für die unterschiedlichen Bereiche der Gratfreiheit die Duktilität der jeweiligen Werkstoffklasse. Die Bruchdehnung bei H040 ist mit 44% bedeutend größer als bei R360 (4%). Dies bedeutet, dass die Werkstoffklasse R360

früher bricht als H040 und daher weniger Zeit zur Anformung an den Schneidmatrizenradius besteht. Deshalb ist der Bereich für Gratfreiheit bei R360 um 0,12 mm größer als bei H040. Während aufgrund des frühen Bruches mit der Positionierung der Kerbe von z. B. 0,31 mm und der Werkstoffklasse R360 keine Gratbildung stattfindet, kann bei dieser Positionierung der Kerbe und der Werkstoffklasse H040 eine problemlose Anformung an den Schneidmatrizenradius erfolgen (späterer Bruch). Weiterhin verhalten sich die Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitt- und Bruchflächenhöhe beim Präge-Scherschneiden mit gleichen Tendenzen wie beim Normalschneiden. So zeigt die Werkstoffklasse H040 eine größere Kanteneinzugs- und Glattschnitthöhe, während die Bruchflächenhöhe bedeutend geringer ist als bei gleicher Position der Kerbe und dem Werkstoff R360. Grund hierfür ist wiederum die unterschiedliche Duktilität der beiden Werkstoffklassen (vergleiche Tabelle 5-5, S. 43).

Allein durch die Variation der Werkstoffklasse ist in diesem Versuchsblock nachgewiesen, dass die Duktilität des jeweiligen Werkstoffes einen entscheidenden Einfluss auf den Bereich der Gratfreiheit hat. Beim Präge-Scherschneiden zeigen spröde Werkstoffe einen frühzeitigen Bruch, weshalb eine Anformung an den Schneidmatrizenradius und der damit verbundene Gratbildungsmechanismus „Vorbeischneiden“ (siehe Kap. 8.1.2, S. 77) erst bei weiterer negativerer Positionierung eintritt als bei duktilen Werkstoffen. Die eindeutige Abhängigkeit des gratfreien Bereiches ausschließlich von der Festigkeit des Materials ist in diesem Versuchsblock erstmals einwandfrei nachgewiesen.

8.8 Versuchsblock 8: Mengenuntersuchung

8.8.1 Versuchskonfigurationen

Die Dauerhubversuche zum Präge-Scherschneiden erfolgen am kostengünstigen Blechwerkstoff DC04 (siehe Kap. 5.1.1, S. 38). Basierend auf den Grundlagenuntersuchungen aus den Versuchsblöcken eins bis drei (siehe Kap. 8.1-8.3, S. 69-94) wird für diese Versuche ein gratfreies Schneidergebnis bei einer Kerbtiefe von 0,5 mm, einem Kerbradius von 0,125 mm, einer Positionierung der Kerbe von -0,1 mm, einem Kerbwinkel von 60° sowie einem Schneidspalt von 8% erzielt (siehe teilfaktorierter Versuchsplan Versuch T2, S. 86). Aus diesem Grund erfolgen diese Einstellungen der Kerb- und Schneidparameter in diesem Versuchsblock zu Beginn der Dauerhubuntersuchungen am offenen und geschlossenen Schnitt. Die Verrundungen der Schneidkantenaktivelemente (Schneidmatrizen und Stempel) erfolgen mit 40 µm. Dieser Wert ist ein Erfahrungswert der industriellen Massenfertigung und wird oftmals für neu gefertigte Aktivelemente verwendet (siehe Kap. 2.5.2, S. 16). Zusätzliche Dauerhubversuche mit einer weiteren Festigkeitsklasse erfolgen mit dem härtesten Werkstoff CuZn37 (Zustand R550). Hierbei werden die gleichen

Versuchskonfigurationen (Kerb- und Schneidparameter) wie bei dem Blechwerkstoff DC04 verwendet, um einen direkten Vergleich dieser Blechwerkstoffe zu ermöglichen.

8.8.2 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Mengenuntersuchungen für die beiden Blechwerkstoffe DC04 und CuZn37 erfolgt im direkten Vergleich. Da eine geometrische Änderung einen direkten Einfluss auf die Schnittflächenqualität hat, muss zuerst die Vermessung der Aktivelemente (Kerb- und Schneidaktivelemente) vorgenommen werden, bevor die daraus resultierenden Schnittflächenausprägungen bei steigender Hubzahl analysiert werden.

Vermessung der Aktivelemente

Die geometrische Vermessung der Kerbaktivelemente stellt einen grundlegenden Untersuchungspunkt des Präge-Scherschneidens dar. Durch die ständige Belastung beim Dauerhub kann ein Verschleiß bzw. ein Ausbruch der Kerbe auftreten. Dies ist oftmals beim Feinschneiden der Fall, da hierbei die Kerbe aufgrund ihrer filigranen Bauform sowie der Dauerhubbelastung als erstes Aktivelement in der Prozesskette versagt. Eine geometrische Veränderung der Kerbgeometrie hat bei dem hier untersuchten Verfahren einen direkten Einfluss auf die Schnittflächenausprägung, wodurch eventuell die geforderte Gratfreiheit nicht mehr realisiert werden kann. Das neue Verfahren hätte in diesem Fall eine erhebliche Restriktion. Daher muss die Kerbgeometrie bei fortschreitender Hubzahl eingehend untersucht werden. Abbildung 8-31 zeigt die taktill vermessenen Kerbgeometrien im Bereich der Kerbspitze bei fortschreitender Hubzahl.

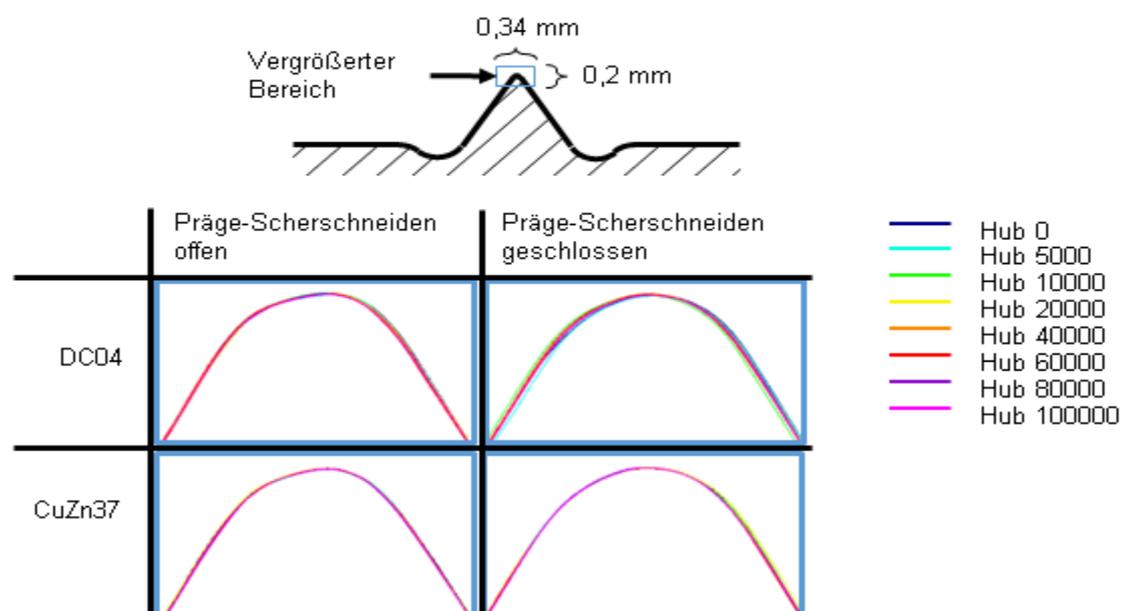


Abbildung 8-31: Kerbspitzengeometrie bei fortschreitender Hubzahl

Die Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Verformung (Ausbrechen der Kerbe) im Bereich der Kerbspitze ist vor den Dauerhubversuchen als hoch bewertet worden, da in diesem Bereich sehr

hohe Druckspannungen entstehen. Die Konturvermessungen der Kerbspitzen (offener und geschlossener Schnitt) werden in den untersuchten Messintervallen in Abbildung 8-31 dargestellt. Zu sehen sind jeweils die Spitzen der vermessenen Kerbelemente über einen Bereich von 0,34 mm Länge und 0,2 mm Höhe. Die Konturlinien werden in der Reihenfolge der Hubzahlen (Konturlinien kleiner Hubzahlen zu Beginn) übereinandergelegt. Konturlinien geringer Hubzahlen, die keine signifikanten Geometrieänderungen aufzeigen, werden somit von Konturlinien höherer Hubzahlen verdeckt. Abbildung 8-31 zeigt, dass weder beim Tiefziehstahl DC04 noch beim höherfesten Blechwerkstoff CuZn37 Geometrieänderungen der Kerben (im offen sowie geschlossenen Schnitt) bei fortschreitender Hubzahl erfolgen. Selbst nach 100000 Hüben weisen die Kerben weder Verschleiß, noch Ausbrüche bzw. messbare, mikroskopische Veränderungen auf. Der für die Kerbaktivelemente verwendete Werkzeugwerkstoff 1.2379 (Härte: 60 HRC \pm 2) besitzt somit die nötige Festigkeit, um den auf die Kerbe wirkenden Kräften während 100000 Hüben problemlos standzuhalten. Die Befürchtung der frühzeitigen Abnutzung der Kerbe während der Versuche tritt nicht ein. Mit Hilfe dieser Dauerhubuntersuchungen wird deutlich, dass die Gefahr des frühzeitigen Verschleißes der Kerbaktivelemente unter den genannten Versuchskonfigurationen nicht frühzeitig auftritt. Beim Präge-Scherschneiden zeigen die Ergebnisse der Dauerhubuntersuchungen weder makroskopische, noch mikroskopisch messbare Abnutzungen an der Kerbe. Eine mögliche auftretende Änderung der Schnittflächenausprägung kann somit nur durch den Verschleiß der Schneidaktivelemente erfolgen.

Vermessung der Schneidaktivelemente

Abbildung 8-32 zeigt die Konturzustände der Stempelradien in Abhängigkeit von unterschiedlichen Konfigurationen (Blechwerkstoff und Schneidverfahren) und Hubzahlen. Zum besseren Vergleich sind die beiden verwendeten Blechwerkstoffe DC04 und CuZn37 untereinander angeordnet. Das Normalschneiden im offenen Schnitt zeigt einen deutlichen, makroskopischen Mantelverschleiß bei den Versuchsreihen mit beiden Blechwerkstoffen DC04 und CuZn37. Aufgrund der stetigen Belastung vergrößert sich der Radius an der Stempelkante mit steigender Hubzahl. Hingegen zeigt das Präge-Scherschneiden für den offenen und geschlossenen Schnitt einen merklich geringeren Stempelverschleiß als das Normalschneiden. Für eine quantitative Aussage wird die Verschleißkenngröße 45°-Verschleißlänge hinzugezogen (siehe Kap. 2.7, S. 20). Abbildung 8-33 zeigt die 45°-Verschleißlänge bei fortschreitender Hubzahl.

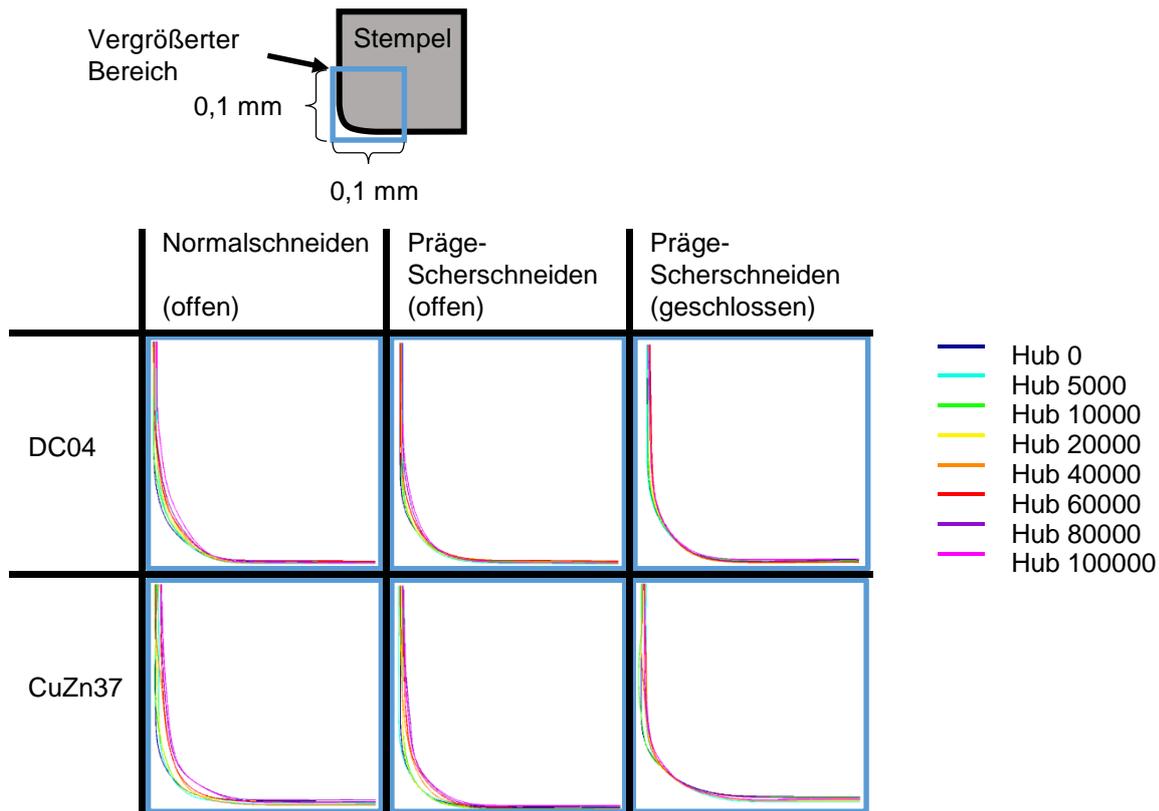


Abbildung 8-32: Stempelverschleiß (qualitativ)

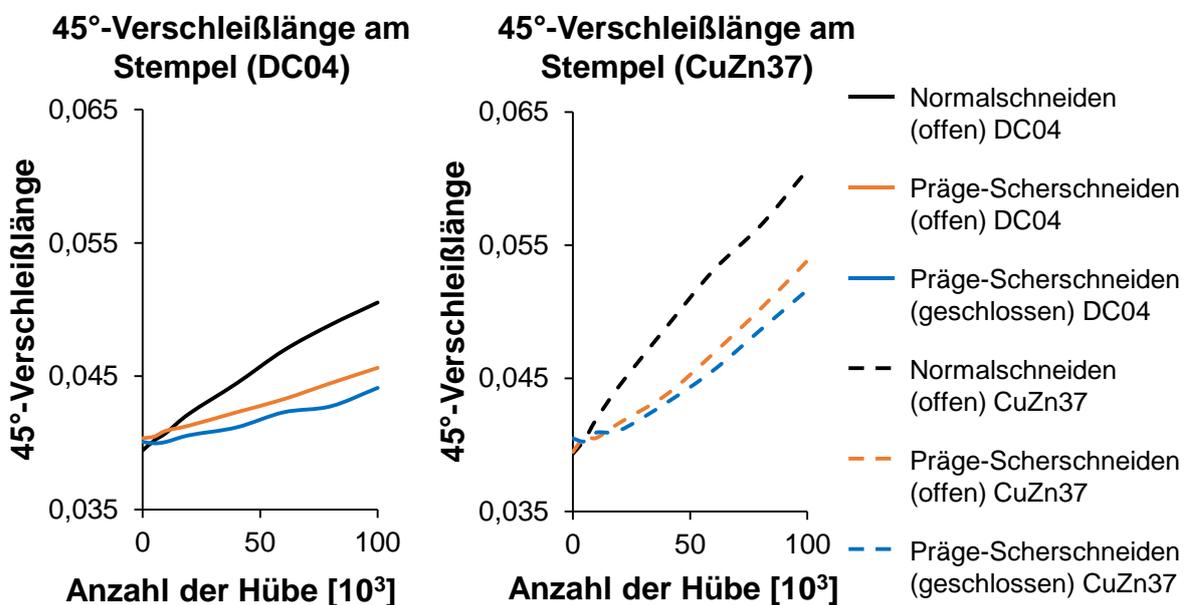


Abbildung 8-33: 45°-Verschleißlänge (stempelseitig) bei fortschreitender Hubzahl

Die Abbildung 8-33 differenziert zwischen den sechs untersuchten Kombinationen aus Blechwerkstoffen (DC04 und CuZn37) und Schneidverfahren (Normalschneiden offen, Präge-Scherschneiden offen und geschlossen). Zu Beginn sind alle zu untersuchenden Stempel mit einer Ver-

rundung von 40 μm präpariert (siehe Kap. 8.8, S. 107). In Abbildung 8-33 ist bei allen sechs Kombinationen aus Schneidverfahren und Blechdicke ein annähernd linearer Anstieg der 45°-Verschleißlänge zu erkennen. Das Normalschneiden mit der härtesten Werkstofflegierung CuZn37 weist hierbei nach 100000 Hübem mit 0,062 mm die größte 45°-Verschleißlänge auf. Der geringste Anstieg in der 45°-Verschleißlänge zeigt das Präge-Scherschneiden im geschlossenen Schnitt am Werkstoff DC04. Hierbei tritt nach 100000 Hübem eine 45°-Verschleißlänge von 0,045 mm auf. Der Materialvergleich zwischen den beiden untersuchten Blechwerkstoffen zeigt eindeutig eine größere 45°-Verschleißlänge beim Blechwerkstoff CuZn37 als bei dem jeweiligen entsprechenden Schneidverfahren am Werkstoff DC04. Der Grund liegt in der höheren Festigkeit des Blechwerkstoffes CuZn37 im Vergleich zu DC04. Zur Materialtrennung sind beim Werkstoff CuZn37 höhere Druckspannungen am Stempel erforderlich. Diese höheren Druckspannungen führen zu einem größeren Stempelverschleiß als beim Werkstoff DC04 mit bedeutend geringerer Festigkeit.

Deutlich zu erkennen ist, dass der Verschleiß nach 100000 Hübem bei beiden Blechwerkstoffen am größten beim Normalschneiden ist (DC04: 0,051 mm; CuZn37: 0,062 mm), während beim neuen Verfahren ein deutlich geringerer Verschleiß auftritt (DC04 offen: 0,045 mm; DC04 geschlossen: 0,044 mm; CuZn37 offen: 0,053 mm; CuZn37 geschlossen: 0,051 mm). Grund für den geringeren Verschleiß beim Präge-Scherschneiden als beim Normalschneiden ist die effektiv zu trennende Blechdicke. Während diese Blechdicke beim Normalschneiden 1 mm ist, beträgt die effektive Blechdicke beim Präge-Scherschneiden aufgrund der Kerbeinprägung von 0,5 mm und der Positionierung bei -0,1 mm nur 0,57 mm im Bereich der Scherzone. Die geringere effektive Blechdicke führt zu einer geringeren Belastung des Stempels und somit zu geringerem Verschleiß.

Sowohl beim Blechwerkstoff DC04 als auch beim Blechwerkstoff CuZn37 ist der auftretende Verschleiß beim Präge-Scherschneiden im geschlossenen Schnitt geringer als im offenen. Grund hierfür ist (wie schon in den vorherigen Versuchsblöcken erwähnt) das Abknicken des Blechstreifens im offenen Schnitt (vergleiche Abbildung 8-7, S. 76 und Abbildung 8-16, S. 84). Hierdurch verzögert sich der Rissbeginn und ein zeitlich längerer Kontakt zwischen Stempel und Blechwerkstoff ist die Folge. Der (zeitlich) längere Kontakt zwischen Stempel und Blechwerkstoff bedingt einen höheren Verschleiß im offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens.

Neben dem Verschleiß am Stempel tritt beim Normalschneiden bei steigender Hubzahl Verschleiß an der Matrize auf. Der Matrizenverschleiß bei steigender Hubzahl (Prägen-Scherschneiden und Normalschneiden) kann Abbildung 8-34 entnommen werden. Analog zur Darstellung des Stempels findet hier auch die Darstellung der unterschiedlichen Konturzustände statt. Während das Normalschneiden bei beiden untersuchten Blechwerkstoffen deutlichen Verschleiß an der Schneidkante aufweist, ist beim Präge-Scherschneiden für alle vier Konfigurationen kein Verschleiß zu erkennen. Die Geometrie nach 100000 Hübem entspricht der Anfangsgeometrie. Dies

zeigt auch die quantitative Betrachtung des Verschleißes anhand der 45°-Verschleißlänge an der Matrize in Abbildung 8-35.

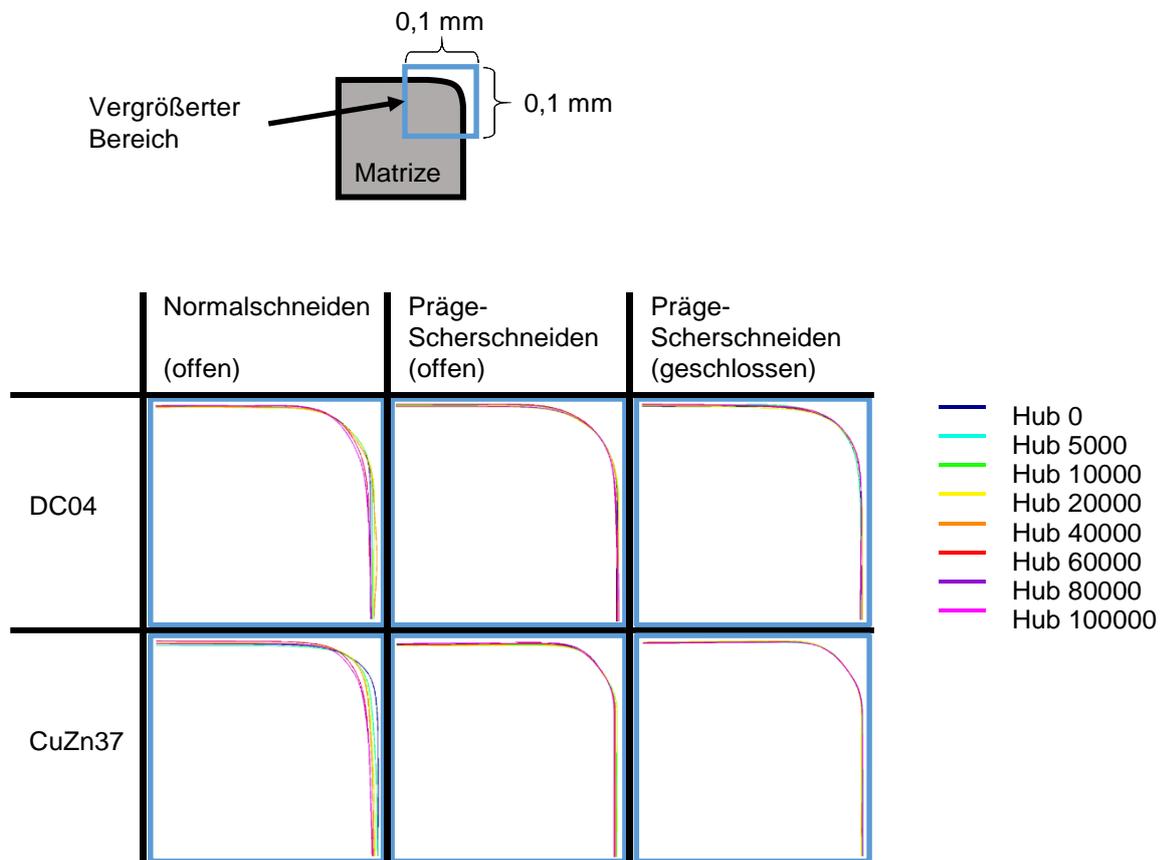


Abbildung 8-34: Matrizenverschleiß (qualitativ)

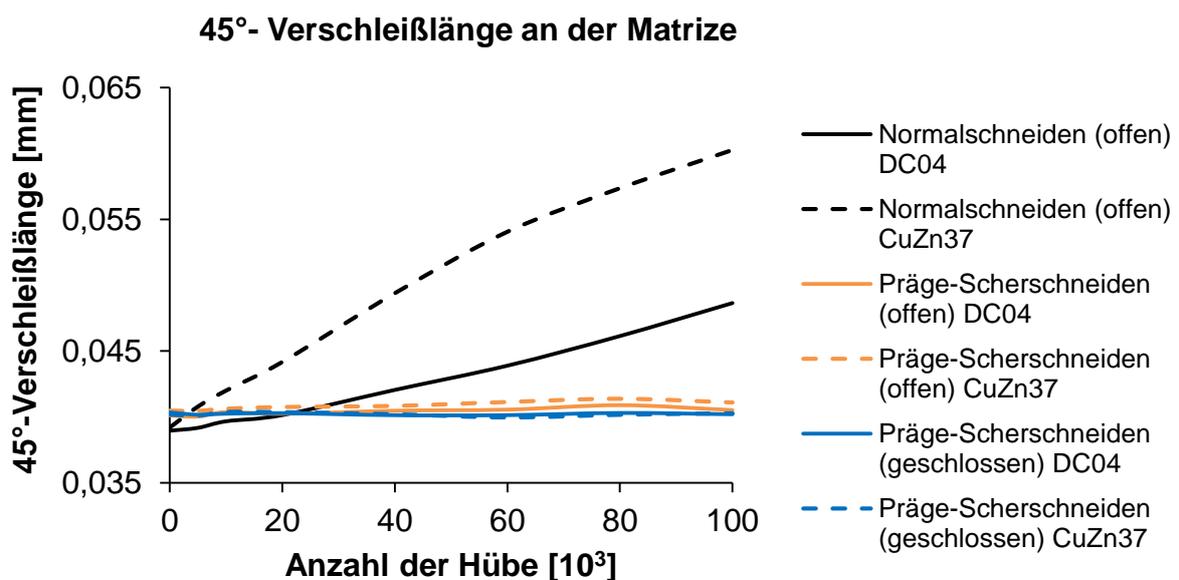


Abbildung 8-35: 45°-Verschleißlänge (matrizenseitig) bei fortschreitender Hubzahl

In Abbildung 8-35 ist ersichtlich, dass der größte Verschleiß wie auch schon bei der stempelseitigen Verschleißbetrachtung (siehe Abbildung 8-33, S. 110) beim Normalschneiden mit dem Blechwerkstoff CuZn37 auftritt. Diese 45°-Verschleißlänge bei den beiden untersuchten Werkstoffen beträgt 0,061 mm (CuZn37) bzw. 0,048 mm (DC04) nach 100000 Hieben. Beim Präge-Scherschneiden hingegen ist im offenen sowie im geschlossenen Schnitt an der Matrize kein Verschleiß zu erkennen, und die Schneidkantengeometrie bleibt konstant erhalten. Bei näherer Betrachtung der Schneidsimulation ist der Grund hierfür in Tabelle 8-12 ersichtlich.

Tabelle 8-12: *Simulationsvergleich Normalschneiden und Präge-Scherschneiden*

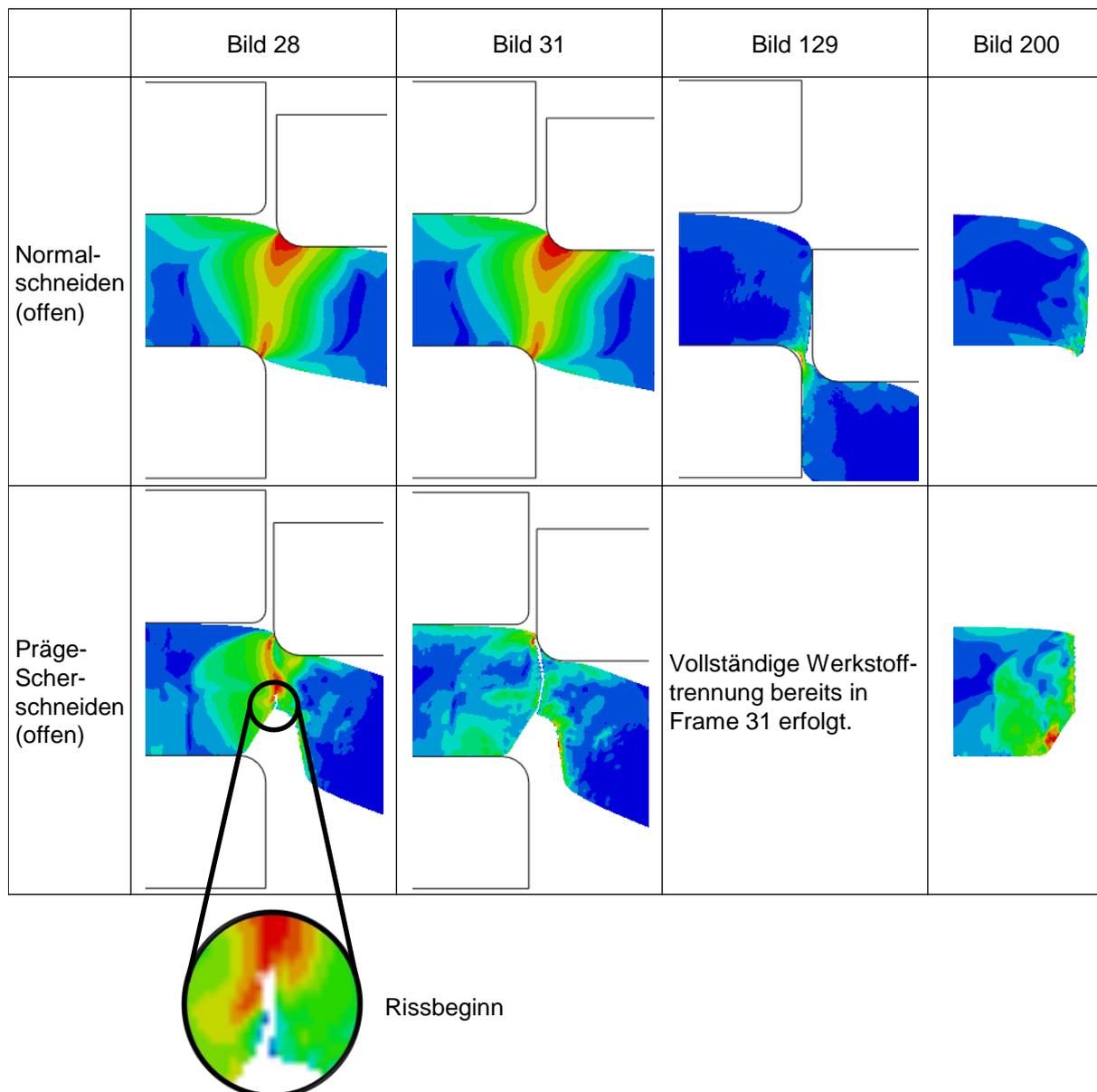


Tabelle 8-12 zeigt eine simulative Gegenüberstellung der beiden Schneidarten Normalschneiden und Präge-Scherschneiden für den offenen Schnitt. Während hingegen beim Präge-Scherschneiden die Rissinduzierung frühzeitig beginnt (siehe Bild 28 in Tabelle 8-12), ist beim Normalschneiden noch kein Rissbeginn zu beobachten, und es findet weitere plastische Umformung in der

Scherzone statt. Beim Präge-Scherschneiden folgen der Rissfortschritt und die Materialtrennung, welche in Bild 31 (siehe Tabelle 8-12, S. 113) abgeschlossen sind. Während beim Präge-Scherschneiden die vollständige Werkstofftrennung, wie in Tabelle 8-12 ersichtlich, vor einer Anformung an den Schneidmatrizenradius abgeschlossen ist, hat die Rissinduzierung beim Normalschneiden noch nicht einmal begonnen, wodurch eine Anformung des Blechwerkstoffes an den Schneidmatrizenradius beim Normalschneiden unweigerlich stattfindet. Sowohl beim offenen als auch beim geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneidens erfolgen die Rissinduzierung und der -fortschritt nicht wie beim Normalschneiden von beiden Schneidkanten der Aktivelemente, sondern ausschließlich matrizenständig (siehe Abbildung 8-15, S. 84). Die Rissinduzierung beginnt beim Präge-Scherschneiden hierbei deutlich früher als beim Normalschneiden. Aufgrund des fehlenden Kontaktes zwischen Blechwerkstoff und Schneidmatrizenradius tritt kein Verschleiß am Schneidmatrizenradius auf. Die Schnittflächenausprägung ist vollständig gratfrei (siehe Bild 200 in Tabelle 8-12, S. 113). Die frühzeitige Werkstofftrennung beim Präge-Scherschneiden im offenen Schnitt tritt auch im geschlossenen Schnitt auf. Analog zum offenen Schnitt im Präge-Scherschneiden ist beim geschlossenen Schnitt daher auch kein Verschleiß an der Matrize vorhanden.

Neben des Vorteils der Gratfreiheit beim neuen Verfahren, verdeutlicht dieser Versuchsblock einen weiteren erheblichen Vorteil des Präge-Scherschneidens gegenüber dem Normalschneiden: Geringer Verschleiß am Stempel aufgrund der geringeren effektiven Blechdicke und kein Verschleiß an der Matrize als Folge frühzeitiger Werkstofftrennung bzw. dem fehlenden Kontakt des Blechwerkstoffes zum Schneidmatrizenradius.

Schnittflächenausprägungen

Die beschriebenen Geometrieänderungen an den Schneidaktivelementen haben einen direkten Einfluss auf die Schnittflächenqualität (DIN 6507, 2006). Nachfolgend wird die Schnittflächenausprägung während der Dauerhubversuche zuerst am Blechwerkstoff DC04 erklärt, bevor Erklärung und Vergleich zwischen DC04 und dem Blechwerkstoff CuZn37 erfolgen. Abbildung 8-36 zeigt für den Blechwerkstoff DC04 die Veränderung der Schnittflächenausprägung (Kanteneinzugs-, Glattschnitt-, Bruchflächen- und Grathöhe; alle Angaben in Abbildung 8-36 in Prozent der Blechdicke) für bestimmte Hubzahlen. Hierbei sind die Ergebnisse des Normalschneidens (offener Schnitt in blau) sowie des Präge-Scherschneidens (offener und geschlossener Schnitt in grün) zum Vergleich gegenübergestellt. Die Dauerhubversuche mit dem Blechwerkstoff DC04 zeigen unterschiedliche Schnittflächenausprägungen in Abhängigkeit von der Hubzahl und dem Schneidverfahren.

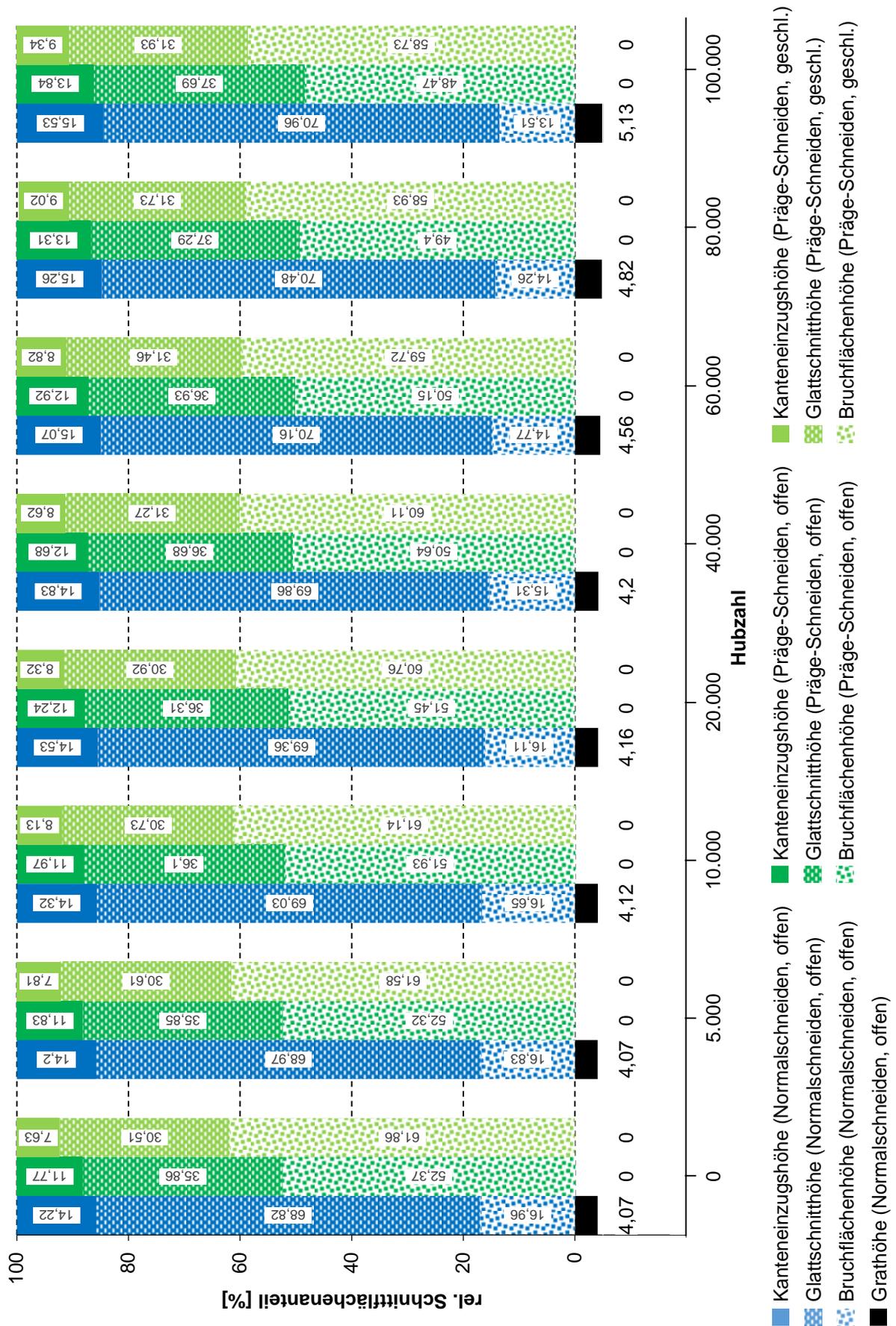


Abbildung 8-36: Schnittflächenausprägung im Dauerhub (Blechwerkstoff DC04)

Beim Normalschneiden (offener Schnitt) ist zu Beginn der Versuche eine Kanteneinzugshöhe von 14,22%, eine Glattschnitthöhe von 68,82%, eine Bruchflächenhöhe von 16,96%, sowie eine Grathöhe von 4,07% festzustellen. Mit steigender Hubzahl werden die Kanteneinzugshöhe, die Glattschnitthöhe und die Grathöhe stetig größer bis, nach 100000 Hübten die Kanteneinzugshöhe 15,53%, die Glattschnitthöhe 70,96% und die Grathöhe 5,13% betragen. Durch die Erhöhung dieser Schnittflächenkenngrößen verringert sich die Bruchflächenhöhe von anfangs 16,96% auf 13,51% nach 100000 Hübten (siehe Abbildung 8-36, S. 115).

Beim Präge-Scherschneiden im offenen Schnitt zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Die Kanteneinzugs- und Glattschnitthöhe nehmen bei steigender Hubzahl zu (Kanteneinzugshöhe steigt von 11,77% auf 13,84%, Glattschnitthöhe steigt von 35,86% auf 37,69%). Hiermit ist wiederum eine Verringerung der Bruchflächenhöhe verbunden (von 52,37% auf 48,47%). Eine Gratbildung ist beim Präge-Scherschneiden während der Dauerhubversuche nicht vorhanden. Das Präge-Scherschneiden mit dem Ziel komplett gratfreier Schnittflächen ist somit auch im Dauerhub problemlos möglich. Selbst bei zunehmender Hubzahl und dem daraus resultierenden Verschleiß am Obermesser (siehe Abbildung 8-33, S.110) wird das Ziel gratfreier Schnittflächen erreicht.

Der Vergleich der beiden Schneidverfahren Normalschneiden und Präge-Scherschneiden (im offenen Schnitt) zeigt anschaulich einen weiteren erheblichen Vorteil des neuen Verfahrens. Bei allen 100000 Hübten ist eine geringere Kanteneinzugshöhe beim Präge-Scherschneiden im Vergleich zum Normalschneiden deutlich erkennbar. Grund hierfür ist die geringere effektiv zu trennende Blechdicke aufgrund der Kerbeinprägung. Die Kanteneinzugshöhe bildet sich während der Glattschnitthöhe aus. Abbildung 8-36 (siehe S. 115) zeigt deutlich, dass die Glattschnitthöhe bedeutend geringer beim Präge-Scherschneiden als beim Normalschneiden ist. Somit kommt es beim neuen Verfahren zu einer erheblich geringeren Kanteneinzugshöhe.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied beider Verfahren sind die deutlich unterschiedlichen Werte der Bruchflächenhöhen. Beim Präge-Scherschneiden im offenen Schnitt ist die Bruchflächenhöhe bei allen 100000 durchgeführten Hübten annähernd dreimal so groß wie beim Normalschneiden (offener Schnitt). Der hier festgestellte Unterschied wird auf den Kerbeffekt und der lokalen Erschöpfung des Formänderungsvermögens zurückgeführt. Beim Präge-Scherschneiden kommt es zur frühzeitigen Rissinduzierung (siehe Abbildung 8-12, S. 82). Während beim Normalschneiden die Ausformung der Glattschnittzone stattfindet, erfolgt beim Präge-Scherschneiden bei gleicher Stempelposition bereits die Rissinduzierung infolge der Kerbeinprägung (Kerbeffekt und Erschöpfung des Formänderungsvermögens). Die Rissinduzierung, der Rissfortschritt und die Materialtrennung erfolgen hierbei so frühzeitig, dass während des gesamten Materialtrennvorganges keine Anformung an den Schneidmatrizenradius stattfindet. Vollständige Gratfreiheit an der Schnittfläche ist die Folge.

Beim neuen Verfahren zeigt der Vergleich des offenen mit dem geschlossenen Schnitt grundsätzlich gleiche Tendenzen. So erhöhen sich bei beiden Schneidvarianten die Kanteneinzugs- und Glattschnitthöhen mit steigender Hubzahl, während sich die Bruchflächenhöhen bei beiden Verfahren verringern. Im geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneidens können nochmals eine geringere Kanteneinzugs- und Glattschnitthöhe realisiert werden als beim offenen Schnitt des neuen Verfahrens. Im offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens entsteht infolge des Abknickens des Blechstreifens eine verzögerte Rissinizzierung (siehe Tabelle 8-12, S. 113). Somit findet die Werkstofftrennung im geschlossenen Schnitt früher statt als im offenen. Das Ergebnis ist eine größere Bruchflächenhöhe, aber eine kleinere Kanteneinzugs- und Glattschnitthöhe im geschlossenen als im offenen Schnitt (beim Präge-Scherschneiden).

Die Ergebnisse der Schnittflächenausprägung beim Werkstoff CuZn37 sind in Abbildung 8-37 dargestellt. Grundsätzlich lassen sich beim Werkstoff CuZn37 die gleichen Tendenzen erkennen wie beim Werkstoff DC04 (siehe Abbildung 8-36, S. 115). Sowohl beim Normalschneiden als auch beim Präge-Scherschneiden erhöhen sich die Werte der Schnittflächenkenngrößen Kanteneinzugs-, Glattschnitthöhe und Grathöhe (wenn vorhanden) mit steigender Hubzahl, während hingegen die Bruchflächenhöhe geringere Werte annimmt. Weiterhin tritt wie auch beim Blechwerkstoff DC04 der Bruch im neuen Verfahren deutlich früher ein als beim Normalschneiden. Gratfreiheit ist beim Blechwerkstoff CuZn37 bei allen 100000 Hübten für den offenen und geschlossenen Schnitt vorhanden.

Unterschiede zwischen dem duktilen Blechwerkstoff DC04 und dem spröden CuZn37 zeigen sich in den prozentualen Werten der Schnittflächenkenngrößen. Beim Präge-Scherschneiden (offen) bricht der Werkstoff CuZn37 (durchschnittliche Bruchflächenhöhe: 68%) deutlich früher als der Werkstoff DC04 (durchschnittliche Bruchflächenhöhe: 51%). Aufgrund der größeren Bruchflächenhöhe beim Werkstoff CuZn37 sind die Glattschnitt- und die Kanteneinzugshöhe geringer als beim Werkstoff DC04. Der Grund hierfür liegt in der geringen Bruchdehnung (sprödes Werkstoffverhalten) des CuZn37. Hierdurch tritt der Riss beim Werkstoff CuZn37 früher ein als beim Werkstoff DC04. Eine geringere Glattschnitt- und Kanteneinzugshöhe sind die Folgen.

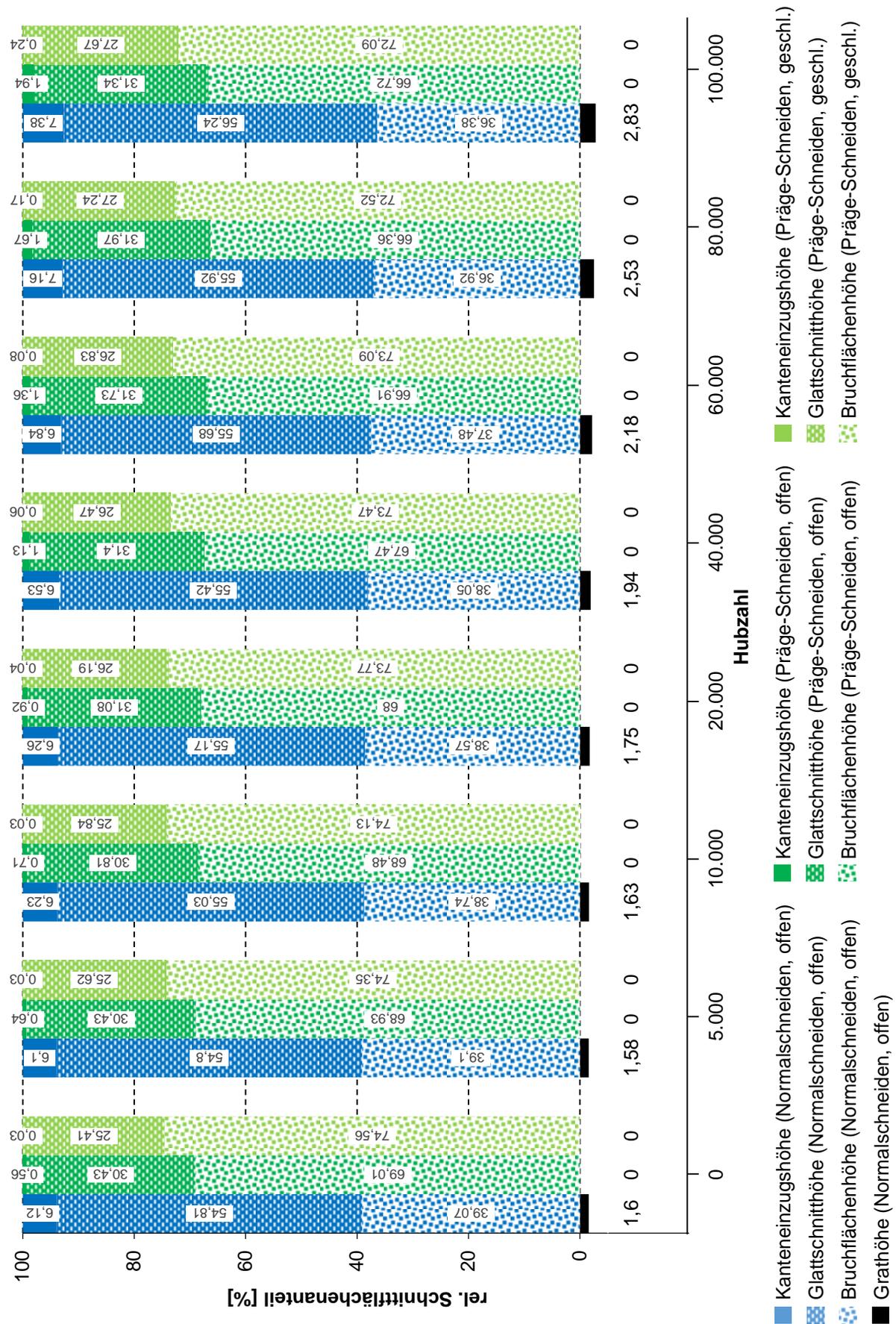


Abbildung 8-37: Schnittflächenausprägung im Dauerhub (Blechwerkstoff CuZn37)

Zusammenfassend lassen sich die entscheidenden Unterschiede bzw. Vorteile des neuen Verfahrens (Präge-Scherschneiden) im Vergleich zum Normalschneiden durch die Dauerhubversuche eindeutig fokussieren:

- Vollständige, prozesssichere Gratfreiheit bei steigender Hubzahl (siehe Abbildung 8-36 bzw. Abbildung 8-37, S. 115 bzw. S. 118)
- Geringerer Verschleiß am Obermesser (siehe Abbildung 8-33, S. 110)
- Kein Verschleiß um Untermesser (siehe Abbildung 8-35, S. 112)
- Geringere Kanteneinzugshöhe (siehe Abbildung 8-36 bzw. Abbildung 8-37, S. 115 bzw. S. 118)
- Früherer Werkstoffbruch (siehe Abbildung 8-36 bzw. Abbildung 8-37, S. 115 bzw. S. 118)

Durch den geringeren Verschleiß der Aktivelemente beim Präge-Scherschneiden ergibt sich der Vorteil eines längeren Gebrauchs dieser Aktivelemente im Vergleich zum Normalschneiden. Die genannten Vorteile des Präge-Scherschneidens gegenüber dem Normalschneiden führen zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens für die industrielle Anwendung und veranschaulichen das hohe Potential für die industrielle Serienfertigung.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schnittflächenausprägung beim Scherschneiden wird neben den Werkstoffeigenschaften des zu trennenden Blechbauteils wesentlich bestimmt in den Einstellungen der Schneidparameter und zeigt prozessbedingt eine scharfkantige Geometriebildung, einen Schnittgrat an der Blechunterseite. Sowohl in der Weiterverarbeitung als auch in der Anwendung des Bauteils ist dieser Schnittgrat in der Regel störend. Bislang können zusätzliche, ressourcenintensive Nachbearbeitungsschritte diesen Schnittgrat entfernen. In der vorliegenden Arbeit wird nun erstmals eine komplett neue Lösungsidee zur Verhinderung des Schnittgrates verwirklicht. Ein Prägeprozess mit einem nachgeschalteten, auf den Prägeprozess abgestimmten Schneidprozess soll die Entstehung des Grates ansatzlos verhindern. Dieser neue Prozess wird als Präge-Scherschneiden definiert. Somit setzt sich die vorliegende Forschungsarbeit erstmals mit dieser neuen Verfahrensidee auseinander und bildet einen zentralen Beitrag für gratfreie Schnittflächenausprägungen ohne kostenintensive, nachgeschaltete Entgratungsprozesse. Das Präge-Scherschneiden führt zudem maßgeblich zu einer gesamten Verbesserung der Prozesskette des Trennens von Blechwerkstoffen.

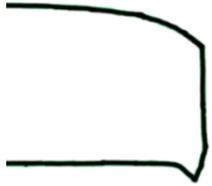
Durch die Einprägung einer Kerbe im Bereich potentieller Gratbildung erfolgt eine Kaltverfestigung und Erschöpfung des Formänderungsvermögens. Im nachfolgenden Schneidprozess wird durch die Ausnutzung dieses Kerbeffektes ein früher Rissbeginn initiiert. Der Gratbildungsmechanismus des Normalschneidens (Anformung an den Schneidmatrizenradius) entfällt somit ansatzlos. Aufgrund der genauen Anforderungen an den Präge- und Schneidprozess ist ein kommerziell erhältliches Säulengestell nicht zielführend und ein eigens für das Präge-Scherschneiden konzipiertes Werkzeugkonzept muss entwickelt werden. Dieses Konzept ist zieldeterminiert durch das Präge-Scherschneiden, bei dem eine hohe Steifigkeit und geringe Toleranzen in der Positionierung der Präge- und Schneidstufe nötig sind.

Die Untersuchung zur Schnittflächenausprägung wird mit experimentellen Versuchen zum Präge-Scherschneiden durch die Analyse unterschiedlicher Konfigurationen der Parameter Kerbposition, Kerbradius, Kerbtiefe, Schneidspalt, Werkstoff und Werkzeug im Einzelhub erforscht. Die Transformation der Erkenntnisse auf die industrielle Serienfertigung erfolgt durch Dauerhubversuche. Exemplarisch wird die Eignung der Werkstoffe Tiefziehstahl (DC04), Edelstahl (1.4301), Aluminiumwerkstoff (AA 6014) und Kupferlegierungen (CuSn6, CuETP und CuZn37) für das Präge-Scherschneiden untersucht. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen erfolgt die Finite-Elemente-Simulation, um neben der besseren Interpretation der Ergebnisse, einen effizienten Kosten- und Zeitplan einzuhalten.

Die durchgeführten, experimentellen Versuchsreihen zeigen die Realisierbarkeit des Präge-Scherschneidens. Neben dem Gratbildungsmechanismus beim Normalschneiden treten allerdings beim Präge-Scherschneiden in Kombination mit falsch gewählten Konfigurationen der Parameter die

drei zusätzlichen Gratbildungsmechanismen „Vorbeischneiden“, „Abreißen“ und „Umklappen“ auf (Tabelle 9-1).

Tabelle 9-1: Zusammenfassung der Gratbildungsmechanismen beim Normalschneiden (schwarz) und Präge-Scherschneiden (grün) anhand der Schnittflächenausprägungen

Schneidverfahren	Normalschneiden	Präge-Scherschneiden		
Gratmechanismus	Anformung an den Schneidmatrizenradius	„Vorbeischneiden“	„Abreißen“	„Umklappen“
Schnittflächenausprägungen				

Der Gratbildungsmechanismus Vorbeischneiden ist charakterisiert durch eine stumpfe Wulstbildung an der Blechunterseite. Der Grund dieses Mechanismus liegt in einer zu negativen Positionierung der Kerbe wodurch ein Vorbeischneiden an der eingepprägten Kerbe erfolgt. Dieser Prozess entspricht nicht mehr vollständig dem Präge-Scherschneiden, sondern das Normalschneiden überwiegt. Eine positivere Positionierung der Kerbe verhindert diesen Mechanismus. Allerdings führt eine zu positive Positionierung der Kerbe zu einem weiteren Gratbildungsmechanismus, dem Abreißen. Dieser ist charakterisiert durch die gesamte Abbildung der Kerbgeometrie im Blech, sowie einem schmalen Steg an der Schnittfläche. Der Trennungsmechanismus tritt nicht wie beim Normalschneiden aufgrund von Scherspannungen ein, sondern aufgrund von Zugspannungen in der schmalen Steg Ausbildung. Ausgeprägte Gratbildung ist die Folge. Durch die Positionierung der Kerbe außerhalb des positiven Bereiches wird dieser Mechanismus verhindert.

Bei zu geringer Eindringungstiefe der Kerbe ins Blech tritt der Gratbildungsmechanismus Umklappen auf. Während des Schneidvorganges dringt hierbei das Material in den Kerbbereich ein, und die Kerbe ist in der Schnittflächenausprägung nur noch ansatzweise sichtbar. Indikator für diesen Mechanismus ist der auftretende Doppelgrat an der Schnittflächenausprägung. Durch die nötige Mindesteindringtiefe der Kerbe und dem maximalen Kerbwinkel von 60° (offener Schnitt) bzw. 70° (geschlossener Schnitt) wird dieser Mechanismus verhindert.

Simulation und experimentelle Versuche ergeben, dass durch geeignete Wahl der Parameterkonfigurationen diese in Tabelle 9-1 dargestellten Gratbildungsmechanismen eliminiert werden. Für eine gratfreie Schnittfläche sind diese notwendigen Begrenzungen der Kerbposition (beispielhaft gezeigt an der Kerbtiefe 0,6 mm und 0,4 mm) bzw. der Mindesteindringtiefe zwingend einzuhalten (Tabelle 9-2).

Tabelle 9-2: Notwendige Begrenzungen für Gratfreiheit im Präge-Scherschneidens

Werkstoff	Gratfreier Bereich im offenen Schnitt bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm bzw. 0,6 mm [mm]	Gratfreier Bereich im geschl. Schnitt bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm bzw. 0,6 mm [mm]	Nachzulesen in
DC04	-0,14 bis 0 bzw. -0,17 bis 0	-0,19 bis +0,03 bzw. -0,23 bis +0,03	Kap. 8.1 (S. 67-84)
AA 6014	-0,21 bis 0 bzw. -0,27 bis 0	-0,24 bis +0,03 bzw. -0,29 bis +0,03	
1.4301	-0,12 bis 0 bzw. -0,14 bis 0	-0,18 bis +0,03 bzw. -0,19 bis +0,03	
CuSn6	-0,10 bis 0 bzw. -0,12 bis 0	-0,13 bis +0,03 bzw. -0,14 bis +0,03	
Werkstoff	Mindestdringtiefe im offenen Schnitt [%]	Mindestdringtiefe im geschl. Schnitt [%]	Nachzulesen in
DC04	40	38	Kap. 8.3 (S. 88-23)
AA 6014	35	32	
1.4301	43	40	
CuSn6	47	45	

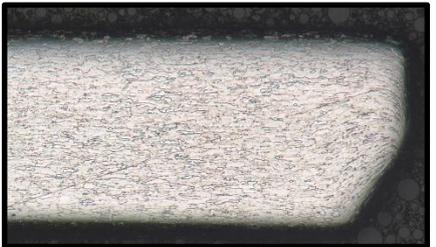
Die in der Tabelle 9-2 dargestellten unterschiedlichen Werte der Begrenzung für Gratfreiheit bei den vier untersuchten Blechwerkstoffen zeigen eine starke Abhängigkeit von der Duktilität der verwendeten Blechwerkstoffe auf. Je größer die Bruchdehnung, desto geringer der gratfreie Bereich bei der Positionierung der Kerbe bzw. desto tiefer die nötige Mindestdringtiefe. Die unterschiedlichen Werte zwischen offenem und geschlossenem Schnitt beim Präge-Scherschneiden (siehe Tabelle 9-2) erklären sich mit dem Rissbeginn und -fortschritt. Beim Präge-Scherschneiden beginnt der Riss ausschließlich an der Blechunterseite. Das sichtbare Abknicken im offenen Schnitt bedingt eine Überlagerung von Druckspannungen an der Blechunterseite. Ein verzögerter Rissbeginn ist hierbei die Folge. Somit ist der gratfreie Bereich im offenen Schnitt des Präge-Scherschneidens für alle untersuchten Blechwerkstoffe kleiner bzw. die nötige Mindestdringtiefe der Kerbe größer als im geschlossen Schnitt.

Dieser Unterschied zwischen offenem und geschlossenem Schnitt zeigt sich auch in der Untersuchung zum Kerbwinkel. Während der offene Schnitt aufgrund des verzögerten Rissbeginns schon bei einem Kerbwinkel von 70° Gratausbildung aufzeigt, ist dies beim geschlossenen Schnitt erst bei 80° sichtbar.

Die Versuchsergebnisse über das Einprägen der Kerbe sowie Scherschneiden in zwei getrennten Prozessschritten können nicht auf das einstufige Verfahren transformiert werden. Ein Ausbrechen der Kerbe verhindert dies. Hingegen ist eine lineare Abhängigkeit der erforschten Kerb- und Schneidparameter beim zweistufigen Verfahren auf unterschiedliche Blechdicken (0,6 mm bis 1,0 mm) nachgewiesen.

Die Experimente der Mengenuntersuchung mit 100000 Hieben bestätigen die gewonnen Erkenntnisse der Einzelhubuntersuchungen für den offenen und geschlossenen Schnitt. Gratfreiheit ist bei allen 100000 Hieben mit dem neuen Verfahren problemlos erreichbar. Ein Verschleiß an den Kerbaktivelementen ist nicht festzustellen. Im Vergleich zum Normalschneiden zeigt sich beim Präge-Scherschneiden ein deutlich geringerer Verschleiß am Stempel, aufgrund der geringeren, effektiv zu trennenden Blechdicke beim neuen Verfahren. Die frühe Rissinizierung und der frühe Werkstoffbruch beim Präge-Scherschneiden bedingen den fehlenden Kontakt zwischen Blechwerkstoff und Schneidmatrizenradius. Ein Verschleiß an der Matrize findet daher nicht statt, und komplett gratfreie Schnittflächen beim offenen und geschlossenen Schnitt des Präge-Scherschneidens sind die Folge (Tabelle 9-3).

Tabelle 9-3: Metallografische Schliffe bei richtiger Einstellung der Kerb- und Schneidparameter im Präge-Scherschneiden

Präge-Scherschneiden	offen	geschlossen
Metallografische Schliffe der Schnittflächenausprägungen		

Wie aus Tabelle 9-3 ersichtlich, ist die bedeutend geringere Kanteneinzugshöhe beim Präge-Scherschneiden ein weiterer Vorteil des neuen Verfahrens.

Die vorliegende Forschungsarbeit stellt grundlegende Erkenntnisse zum Präge-Scherschneiden erstmals fest. Weiterführende Forschungsaktivitäten könnten sich mit der Realisierung des einstufigen Verfahrens und Blechdicken größer als 1 mm befassen. Zusätzlich ist die Umsetzung des Präge-Scherschneidens für höchstfeste Blechwerkstoffe (Zugfestigkeit $> 800 \text{ N/mm}^2$) und unterschiedliche Schneidgeometrien im offenen und geschlossenen Schnitt für die industrielle Anwendung von großem Interesse.

A. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Unterteilung der Schneidverfahren (DIN 9870, 1974)	4
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Schneidvorganges (DIN 9869, 2003).....	4
Abbildung 2-3: Phasen des Scherschneidens	6
Abbildung 2-4: Schneidkraft-Stempelweg-Diagramm beim Scherschneiden (Hoffmann, 2012, S. 687–689).....	6
Abbildung 2-5: Metallografische Schliffe der beginnenden Plastifizierung des Blechstreifens im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)	7
Abbildung 2-6: Metallografische Schliffe der dritten Phase des Scherschneidens im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)	8
Abbildung 2-7: Metallografische Schliffe kurz vor der makroskopischen Rissinitiierung im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts)	9
Abbildung 2-8: Metallografische Schliffe nach der Materialtrennung im geschlossenen (links) und offenen Schnitt (rechts).....	10
Abbildung 2-9: Schneidkraftkomponenten beim Scherschneiden (Romanowski, 1959)	12
Abbildung 2-10: Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906.....	13
Abbildung 2-11: Wirkung unterschiedlicher Schneidspalte.....	16
Abbildung 2-12: Blechlagewinkel.....	17
Abbildung 2-13: Verschleißmechanismen (Fleischer, 1980).....	18
Abbildung 2-14: Verschleißkenngrößen am Obermesser	20
Abbildung 2-15: Prinzipskizze des Gleitschleifens.....	23
Abbildung 2-16: Prinzipaufbau des zwei- und dreistufigen Konterschneidens	25
Abbildung 2-17: neues Verfahren zum gratlosen Schneiden	27
Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf des Lösungsweges zur ganzheitlichen Betrachtung des Präge-Scherschneidens	30
Abbildung 4-1: BSTA 510-125 (Bruderer AG, 2015)	33
Abbildung 4-2: Aufbau zur Vermessung der Schnittflächen	36
Abbildung 5-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff DC04	39

Abbildung 5-2:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff 1.4301.....	40
Abbildung 5-3:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm vom Werkstoff AA 6014.....	41
Abbildung 5-4:	Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Werkstoffe CuSn6, Cu-ETP (verschiedene Konfigurationen) und CuZn37	42
Abbildung 5-5:	Gefüge der Werkzeugwerkstoffe im Rasterelektronenmikroskop; links: 1.2379, rechts: St52.....	44
Abbildung 6-1:	Gesamtaufbau des Versuchswerkzeuges	47
Abbildung 6-2:	Grundebene des Werkzeuges	48
Abbildung 6-3:	Niederhalterebene des Werkzeuges	49
Abbildung 6-4:	Stempelebene des Werkzeuges	50
Abbildung 6-5:	Blechstreifen	52
Abbildung 6-6:	Werkzeugdetail (maßstabsgetreu) zur Feineinstellung.....	53
Abbildung 7-1:	Verrundete Aktivelemente (offener Schnitt)	55
Abbildung 7-2:	Detailzeichnung Kerbgeometrie	57
Abbildung 7-3:	negative (a) und positive (b) Positionierung der Kerbe	58
Abbildung 7-4:	Versuchsplan.....	59
Abbildung 7-5:	Prägestufe (links) und Scherschneidestufe (rechts) mit Vernetzung und Detailansicht	63
Abbildung 7-6:	Dehnratenabhängigkeit nach Cowper-Symonds (Werkstoff DC04)	65
Abbildung 8-1:	Metallografischer Schliff der Kerbeinprägung mit Vergrößerung des Bereiches um den Kerbgrund	70
Abbildung 8-2:	Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm (DC04, offener Schnitt).....	71
Abbildung 8-3:	Metallografische Schliffe der plastischen Verformung bei positiver (rechts) und negativer (rechts) Kerbpositionierung	72
Abbildung 8-4:	Metallografische Schliffe kurz vor Rissbeginn bei positiver (rechts) und negativer (links) Kerbpositionierung	73
Abbildung 8-5:	Vergleich der Triaxialität bei unterschiedlichen Parametereinstellungen ...	74

Abbildung 8-6: Metallografischer Schliffe des Rissbeginns beim Präge-Scherschneiden (roter Pfeil).....	75
Abbildung 8-7: Metallografische Schliffe der Schnittflächenausprägung bei negativer (links) und positiver (rechts) Kerbpositionierung	76
Abbildung 8-8: Vergleich unterschiedlicher Schnittflächen	76
Abbildung 8-9: Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,4 mm (DC04, offener Schnitt).....	78
Abbildung 8-10: Begrenzung des gratfreien Bereiches im offenen Schnitt.....	80
Abbildung 8-11: Einfluss der Positionierung bei einer Kerbtiefe von 0,6 mm (DC04, geschlossener Schnitt).....	81
Abbildung 8-12: Metallografische Schliffe zu Beginn der plastischen Deformation bei den Kerbpositionen -0,1 mm (links), +0,03 mm (mitte) und +0,1 mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden.....	82
Abbildung 8-13: Metallografische Schliffe kurz vor Rissbeginn bei den Kerbpositionen -0,1 mm (links), +0,03 mm (mitte) und +0,1 mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden	83
Abbildung 8-14: Metallografische Schliffe des Rissbeginns bei den Kerbpositionen -0,1 mm (links), +0,03 mm (mitte), +0,1 mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden	83
Abbildung 8-15: Metallografische Schliffe des Rissbeginn (links), des -wachstums (mitte links und mitte rechts) und kurz vor der Werkstofftrennung (rechts) bei der Kerbposition +0,1 mm im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneiden	84
Abbildung 8-16: Metallografische Schliffe der Schnittflächenausprägungen bei den Kerbpositionen -0,1 mm (links), +0,03 mm (mitte) und +0,1 mm (rechts) im geschlossenen Schnitt beim Präge-Scherschneidens	84
Abbildung 8-17: Begrenzung des gratfreien Bereiches im geschlossenen Schnitt	85
Abbildung 8-18: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (DC04).....	88
Abbildung 8-19: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (CuSn6)	89
Abbildung 8-20: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (1.4301)	89
Abbildung 8-21: Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung (AA 6014).....	90

Abbildung 8-22: Mindesteindringtiefe der Kerbe in Abhängigkeit der Bruchdehnung.....	93
Abbildung 8-23: Ausgangsform (a) und angepasste Form des Untermessers (b).....	95
Abbildung 8-24: Simulation des Scherschneidvorganges mit Einförmung in den Hinterschnitt97	
Abbildung 8-25: Untermessergeometrie mit (a) und ohne (b) Hinterschnitt	97
Abbildung 8-26: verwendete Schneidleisten mit Ausbrüchen	99
Abbildung 8-27: simulierte Querkraft in Abhängigkeit der Kerbtiefe	100
Abbildung 8-28: Detailansicht der untersuchten Kerbkonturlinien	101
Abbildung 8-29: Metallografische Schliffe des Schneidvorganges beim 100°-Kerbwinkel ..	102
Abbildung 8-30: Vergleich der Schnittflächenausprägungen bei den Cu-ETP-Werkstoffklassen H040 und R360	106
Abbildung 8-31: Kerbspitzengeometrie bei fortschreitender Hubzahl	108
Abbildung 8-32: Stempelverschleiß (qualitativ)	110
Abbildung 8-33: 45°-Verschleißlänge (stempelseitig) bei fortschreitender Hubzahl	110
Abbildung 8-34: Matrizenverschleiß (qualitativ)	112
Abbildung 8-35: 45°-Verschleißlänge (matrizenseitig) bei fortschreitender Hubzahl.....	112
Abbildung 8-36: Schnittflächenausprägung im Dauerhub (Blechwerkstoff DC04)	115
Abbildung 8-37: Schnittflächenausprägung im Dauerhub (Blechwerkstoff CuZn37).....	118

B. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Beurteilung ausgewählter Verfahren zur Produktion gratfreier Schnittflächen	26
Tabelle 4-1:	Technische Daten der Schnellläuferpresse BSTA 510-125 (Bruderer AG, 2015)	34
Tabelle 4-2:	Technische Daten des BSV 75T	34
Tabelle 5-1:	Werkstoffzusammensetzung DC04	38
Tabelle 5-2:	Werkstoffzusammensetzung 1.4301	39
Tabelle 5-3:	Werkstoffzusammensetzung AA 6014	40
Tabelle 5-4:	Werkstoffzusammensetzung CuSn6, Cu-ETP und CuZn37	42
Tabelle 5-5:	Mechanische Eigenschaften der zu untersuchenden Kupferlegierungen.....	43
Tabelle 5-6:	Chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe	44
Tabelle 7-1:	Vergleich der realen und simulierten Schnittflächenausprägungen.....	67
Tabelle 8-1:	Simulierte Schnittflächen in Abhängigkeit der Positionierung der Kerbe...	77
Tabelle 8-2:	Werte ausgewählter Schnittflächenkenngrößen bei unterschiedlichen Kerbtiefen	79
Tabelle 8-3:	Teilfaktorieller Versuchsplan $L_9(3^4)$	86
Tabelle 8-4:	Schnittflächenausprägungen (experimentell) in Abhängigkeit des Parameters Kerbtiefe	91
Tabelle 8-5:	Schneidprozess beim Präge-Scherschneiden für unterschiedliche Kerbtiefen	92
Tabelle 8-6:	Simulationsergebnisse der ersten Simulationsreihe.....	96
Tabelle 8-7:	Simulationsergebnisse der zweiten Simulationsreihe.....	98
Tabelle 8-8:	Schnittflächenausprägungen (experimentell) beim einstigen Präge- Scherschneiden	98
Tabelle 8-9:	Einfluss des Kerbwinkels auf die reale Schnittflächenausprägung	101
Tabelle 8-10:	Übersicht der skalierten Parameter in Abhängigkeit der Blechdicke	104
Tabelle 8-11:	Ausgewertete Schnittflächenkenngrößen (offener Schnitt) bei unterschiedlichen Blechdicken.....	104

Tabelle 8-12:	Simulationsvergleich Normalschneiden und Präge-Scherschneiden.....	113
Tabelle 9-1:	Zusammenfassung der Gratbildungsmechanismen beim Normalschneiden (schwarz) und Präge-Scherschneiden (grün) anhand der Schnittflächenausprägungen	121
Tabelle 9-2:	Notwendige Begrenzungen für Gratfreiheit im Präge-Scherschneidens ...	122
Tabelle 9-3:	Metallografische Schliffe bei richtiger Einstellung der Kerb- und Schneidparameter im Präge-Scherschneiden.....	123

C. Literatur

- ATKINS, T., 2009. *The Science and Engineering of Cutting*. Elsevier Reference Monographs. ISBN: 978-0-08-094245-2
- BECKER, H. und J. CAMMANN, 1981. *Untersuchung des Schneidgrates als Standzeitkriterium bei drahterodierten und profilgeschliffenen Schneidwerkzeugen*. Darmstadt.
- BECKER, N., 1994. *Weiterentwicklung von Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven im Bereich hoher Umformgrade*. Berlin [u.a.]: Springer. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart. 122. ISBN 978-3-540-58442-1.
- BEHRENS, B.-A. und E. SCHAEFER, 2004. *Nachweis der Praxistauglichkeit einer Online-Schneidspaltregelung zur Schnittgratminimierung. Ergebnisse eines Vorhabens der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. AiF aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit ; [Bewilligungszeitraum: 01.01.2002 bis 30.06.2004]*. Hannover: EFB, . Europäische Forschungsges. für Blechverarbeitung. EFB-Forschungsbericht. 231.
- BEIER, H.-M., 2001. *Gratentstehung – ein umformtechnischer Ansatz*. wt-online. Berlin.
- BELYTSCHKO, T., W.K. LIU, B. MORAN und K.I. ELKHODARY. *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Second edition. ISBN 978-1-118-63270-3.
- BERGMANN, W., 2013. *Werkstofftechnik*. 7., neu bearb. Aufl. München [u.a.]: Hanser. Hanser-Studien-Bücher. ISBN 3446435360.
- BIRKERT, A. und S. HAAGE, 2013. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg. ISBN 978-3-642-34669-9.
- BIRZER, F., 1996. *Feinschneiden und Umformen. Wirtschaftliche Fertigung von Präzisionsteilen aus Blech*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie. Die Bibliothek der Technik. Bd. 134. ISBN 9783478931540.
- BLOECK, M., 2001. *Aluminium Car Body Sheet: Alloys and Surface Pretreatments as System Solution*. Zürich.
- BORCHERT, P., 1976. *Einflüsse der Werkzeuggeometrie und der Maschine beim Schneiden von kaltgewalztem Elektroblech*. [Hannover].
- BRUDERER AG, Hg., 2015. *Unser Know-how für Ihre präzise und flexible Produktion*. Frasnacht. 2015.
- BUCHMANN, K., 1961. *Beitrag zur Verschleißbeurteilung beim Schneiden von Stahlfeinblechen*. [Hannover].
- BUCKLEY, D.H., 1982. *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- BÜHLER, H. Eigenspannungen durch Kaltverarbeitung und Maßnahmen zu ihrer Verminderung. In: *Werkstatt und Betrieb*, S. 84-89.
- BURWELL, J.T. und C.D. STRONG, 1957. *Metallic Wear*: Proc. R. Soc. 212.
- CALMELS, S., 2015. *Predicting mechanical behavior of reinforced plastic and composite parts*. Würzburg. 10. Europäische LS-DYNA Konferenz.

- CARL ZEISS MIKROSKOPIE GMBH, Hg., 2006. *AxioCam MRc 5 – A World of Digital Possibilities*. Jena. 2006.
- CARLESS, S., 2005. *The relative impact performances of press formed, hydroformed and roll formed structures and the application of patchpiece and tailor welded blank techniques for optimum mass efficiency*. Technical steel research - Steel products and applications for automobiles, packing and home appliances. Luxembourg
- CZICHOS, H. und K.-H. HABIG, 2003. *Tribologie-Handbuch. Reibung und Verschleiss ; mit 115 Tabellen*. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg. Werkstofftechnik. ISBN 3528163542.
- DEUTGES, D., 2005. *Automatisierte Werkzeugverschleissmessung und -klassifizierung durch 2D-Auflicht-Sichtprüfung*. Aachen: Shaker. Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. 2005,4. ISBN 3-8322-3766-6.
- DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE, Hg., 2008. *1.4301. Datenblatt*. Witten. 2008.
- DERKX, J., 2008. *High Precision Form Crush Profiling of Diamond Grinding Wheels*, Dissertation. ISBN: 978-90-9023412-0. University of Twente
- DIES, R., 1954. *Untersuchung über die Kraft-, Temperatur-, Reibungs- und Verschleißverhältnisse beim Lochen von Blechen mit runden Stempeln*. [Darmstadt.].
- DIES, R., 1955. *Temperaturmessung beim Lochen von Blechen*. *Werkstatt und Betrieb*. Heft 10.
- DIN 10263-5, 2014. *Walzdraht, Stäbe und Draht aus kaltstauch- und Kaltfließpressstählen - Teil 5: Technische Lieferbedingungen für nichtrostende Stähle*. Berlin.
- DIN 6507, 2006. *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell*. Berlin.
- DIN 755-2, 2015. *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Mechanische Eigenschaften*. Berlin.
- DIN 8580, 2003. *Fertigungsverfahren Begriffe und Einteilung*. Berlin.
- DIN 8588, 2003. *Fertigungsverfahren Zerteilen, Einordnung, Unterteilen, Begriffe*. Berlin.
- DIN 8589, 2003. *Gleitspanen*. Berlin.
- DIN 9830, 2011. *Schnittgrathöhen an Stanzteilen*. Berlin.
- DIN 9869, 2003. *Begriffe für Werkzeuge der Stanztechnik*. Berlin.
- DIN 9870, 1974. *Fertigungsverfahren und Werkzeuge zum Zerteilen*. Berlin.
- DKI - CUETP, 2015. *Werkstoffdatenblatt CuETP*.
- DKI - CUSN6, 2015. *Werkstoffdatenblatt CuSn6*.
- DKI - CUZN37, 2015. *Werkstoffdatenblatt CuZn37*.
- DOEGE, E. und B.-A. BEHRENS, 2010. *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-04248-5.
- DOEGE, E., 1990. *Einfluss des Schneidvorganges und innerer Materialspannungen auf die Maßhaltigkeit beim Scherschneiden von Elektroblechen*.
- DOLMETSCH, H., D. HOLZNAGEL, R. IHWE, E. KELLER und W. KLEIN, 2013. *Der Werkzeugbau. Metalltechnik Fachbildung*. 16. Aufl., 1. Dr. Haan, Rhein: Europa-Lehrmittel. ISBN 978-3-8085-1199-2.
- DÖRRENBURG EDELSTAHL GMBH, Hg., 2014. *Dörrenberg Edelstahl 1.2379*. Engelskirchen. 2014.

- DUBBEL, H., J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE, 2007. *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-49714-1.
- EFFELSBURG, J., 2012. *On Parameter Identification for the GISSMO Damage Model*. Ulm.
- EICHHORN, P. und J. MERK, 2015. *Das Prinzip Wirtschaftlichkeit. Basiswissen der Betriebswirtschaftslehre*. 4., vollst. überarb. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN 3658078294.
- Entgraten, Fräsen: Mobile und stationäre Maschinen*. Assfalg GmbH, 2015. Schwäbisch Gmünd.
- FLEISCHER, G., 1980. *Verschleiß und Zuverlässigkeit*: VEB Verlag.
- FRANSE, J. 1991. *Aspects of precision grinding: part roughness, form accuracy and a basic study of the brittle to ductile removal transition*. Dissertation. Universität Eindhoven
- FRANZMANN, M. und A. KALKBRENNER, 2008. *Die Verarbeitungseigenschaften isotroper Elektrobänder*. 17. Auflage: Stahlberatung.
- FRITZ, A.H., 2001. *Fertigungstechnik*. 5., neubearb. Aufl. Berlin: Springer. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-41238-0.
- FUGGER, B., 1984. *Untersuchung der Verschleissvorgänge beim Scherschneiden von Feinblechen*. Düsseldorf [Germany]: Verein Deutscher Ingenieure. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften. Reihe 2, Betriebstechnik. no. 81. ISBN 3181481025.
- GAHR, 1985. *Tribologie: Reibung - Verschleiß - Schmierung*: Naturwissenschaften.
- GEBHARDT, C., 2011. *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik*. München: Hanser. ISBN 978-3-446-42517-0.
- GOTTSTEIN, G., 2007. *Physikalische Grundlagen der Materialkunde. Mit 28 Tabellen*. 3. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN 354071104X.
- GRIMM, W., 2014. *Fineblanking Technologie*. München. Praktikum Umformtechnik.
- HALLQUIST, J.O., 2006. *LS-DYNA Manual*. Livermore, Californien.
- HAMBLI, R. und A. POTIRON, 2000. *Finite element modeling of sheet-metal blanking operations with experimental verification*.
- HEIDEMEYER, J., 1975. *Einfluss der plastischen Verformung von Metallen bei Mischreibung auf die Geschwindigkeit ihrer chemischen Reaktionen*. Springer.
- HEITMÜLLER, F., 2015. *Einsatzverhalten von Schleifbändern mit hochharten Schleifmitteln*: Fraunhofer Verlag.
- HERRMANN, M., 1991. *Beitrag zur Berechnung von Vorgängen der Blechumformung mit der Methode der finiten Elemente*. Berlin: Springer. Prozesssimulation in der Umformtechnik. Bd. 1. ISBN 978-3-540-53812-7.
- HINZ, H.E., 1980. *Gleitschleifen. [Grundlagen, Maschinen, Chips, Compound, Analysen, Abwasser, Kostenrechnungen]*. Grafenau/Württ.: Expert-Verlag. Kontakt & Studium. 65 : Fertigungstechnik. ISBN 9783885086840.
- HOFFMANN, H., 2012. *Handbuch Umformen*. München: Hanser. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. ISBN 3446427783.
- HOOGEN, M., 1999. *Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeinblechen*. München: Hieronymus. Utg-Forschungsberichte. Bd. 6. ISBN 3-89791-045-4.

- HOOPUTRA, H., ET AL., 2004. *A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions*. *International Journal of Crashworthiness*. 9. Auflage.
- HÖRMANN, F., 2008. *Einfluss der Prozessparameter auf einstufige Scherschneidverfahren zum Ausschneiden mit endkonturnaher Form*. Als Typoskr. gedr. München: Hieronymus. Utg-Forschungsberichte. Bd. 46. ISBN 978-3-89791-388-2.
- HULL, B., M. CHURKOVICH, C. OUGHTRED und D. TURNER, 2011. *Understanding librarians. Communication is the issue*. Oxford: Chandos. Chandos information professional series. ISBN 978-0-85709-114-7.
- IKRAMOV, U. und MACHKAMOV, 1987. *Berechnung und Bewertung des abrasiven Verschleisses*: VEB Verlag Technik. ISBN 3-341-00268-5.
- JASPER, S., *Metal Cutting Mechanics and Material Behaviour*. Dissertation. 1999. ISBN: 90-386-0950-7, University of Eindhoven
- KALS, H. *Dynamic stability in Cutting*. Dissertation. 1972. University of Eindhoven
- KELLER, F., 1951. *Messungen zum Einfluss des Schneidspalts auf Kraftbedarf und Schnitтарbeit beim Lochen von Stahlblech*. *Werkstatt und Betrieb*. München.
- KEYENCE DEUTSCHLAND GMBH, Hg., 2012. *Produktkatalog Keyence VHX 2000*. Neu-Ilsenburg. 2012.
- KIAUKA, W. und V. ANGONA, 2015. *Optische Emissionsspektroskopie*. Wuppertal: Castell. 11.
- KIENZLE, O., 1963. *Verfahren zur Erzielung glatter Schnittflächen beim vollkantigen Schneiden von Blech*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. ISBN 978-3-663-05150-3.
- KIENZLE, W., 1957. *Verschleißmerkmale beim Scherschneiden von Stahl-Feinblechen zwischen Stempel und Schneidplatte*. [Hannover].
- KIENZLER, R., 1993. *Konzepte der Bruchmechanik. Integrale Bruchkriterien*. Braunschweig: Vieweg. Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften Fundamentals and advances in the engineering sciences. ISBN 3-528-06387-4.
- KLEIN, B., 2014. *Versuchsplanung - DoE. Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. 4. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. Studium. ISBN 978-3-486-77842-7.
- LANGE, K., 1990a. *Lehrbuch der Umformtechnik. Band 3: Blechumformung*. ISBN 3662220903.
- LANGE, K., 1990b. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. 2. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 978-3540500391.
- LANGE, K., 1993. *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*. Zweite, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 3642580475.
- LAO, B., 2013. *Druckgegossene Metallhybridstrukturen für den Leichtbau – Prozess, Werkstoffe und Gefüge der Metallhybriden*. Aachen. 12.
- LIEBING, H., 1979. *Erzeugung gratfreier Schnittflächen durch Aufteilen des Schneidvorgangs (Konterschneiden)*. Stuttgart.
- Lieferprogramm Kaltarbeitsstähle*, 2007. Meerbusch.
- LIEWALD, M., 2010. *Schnittgratfreies Scherschneiden mittels Konterschneiden*: Meisenbach Verlag. 1.

- MAHR GMBH, Hg., 2007. *MARSURF XC 2/XC 20, PC-basierte stationäre Konturmessplät-ze*. Göttingen. 2007.
- MARTI, A., 2013. *Werkzeug und Verfahren zum Herstellen von Stanzteilen*. EP 2842653 A1.
- MASEN, M. 2004. *Abrasive tool wear in metal forming processes*. Dissertation. ISBN: 90-365-2061-4
- MÜCKLICH, S., 2008. *Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen*. Chemnitz.
- NEUMANN, C.-P., 1979. *Die Schneidbarkeit von Elektroblech und ihre Prüfung unter besonderer Berücksichtigung von Blechwerkstoff und Schneidspalt*. [Hannover].
- NEUMANN, H., 1954. *Grundlagen der Walzwerkstechnik und Kalibrierung*. Leipzig: Fachbuchverlag.
- NOTHAFT, K., 2014. *Scherschneiden höchstfester Blechwerkstoff im offenen Schnitt*. [München].
- OEHLER, G. Schräg auftreffende Schneidstempel. In: *wt - Z. ind. Fertig.*, S. 342-343.
- OSTERMANN, F., 2007. *Anwendungstechnologie Aluminium (VDI-Buch) (German Edition)*. Dordrecht: Springer. VDI-Buch. ISBN 354069451X.
- OSTERRATH, H., 2000. *Bandschleifen 2000. Der Stand der Anwendung des Bandschleifens zu Beginn des 21. Jahrhunderts*. Renningen-Malmsheim: Expert. Reihe Technik. ISBN 9783816917304.
- PEROVIĆ, B., 2009. *Spanende Werkzeugmaschinen. Ausführungsformen und Vergleichstabellen*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-89951-8.
- PRÜLLER, H., 2015. *Praxiswissen Gleitschleifen. Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-09488-1.
- ROLL, K., Hg., 2007. *Simulation der Blechumformung - neue Anforderungen und Tendenzen*.
- ROMANOWSKI, W.P., 1959. *Handbuch der Stanzereitechnik*: VEB Vlg. Tech.
- SALZGITTER FLACHSTAHL GMBH, Hg., 2014. *DC04 - Weiche Stähle zum Umformen*. Datenblatt Salzgitter Flachstahl GmbH. Salzgitter. 2014.
- SCHMIDT, R.-A., 2006. *Umformen und Feinschneiden*. [S.l.]: Carl Hanser Fachbuchverlag. ISBN 3446409645.
- SCHROELKAMP, C., 1984. *Einfluss tribochemischer Reaktion auf das Verschleißverhalten von Eisenwerkstoffen bei technisch trockener Wälzreibung*.
- SEIDENBERG, H., 1965. *Presseneinwirkungen auf Werkzeugverschleiß und Grathöhe beim Schneiden von Feinblechen im geschlossenen Schnitt*. Dissertation. [Hannover].
- SIEBERTZ, K., 2010. *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DOE)*. Heidelberg: Springer. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-05492-1.
- SIEGERT, K., 2015. *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-02488-0.
- SOMMER, K. und R. HEINZ, 2014. *Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 2., korr. u. erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN 978-3-8348-2463-9.
- SPITTA, D., Hg., 2010. *Die Herausforderungen der Globalisierung. Konzepte und Grundlagen einer solidarischen Wirtschaft*. Stuttgart: Mayer. ISBN 3867830215.

- STAHL, J., 2015. *Aufbau, Durchführung und Validierung einer thermomechanisch gekoppelten Scherschneidsimulation unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von Materialmodell und Bruchkriterium*. Masterarbeit.
- STM STAHL, Hg., 2013. *Datenblatt ST52*. Gräfelfing. 2013.
- THILOW, A., 2008. *Entgrattechnik. Entwicklungsstand und Problemlösungen*. 3., verb. Aufl. Renningen: Expert-Verl. Kontakt & Studium. Bd. 392. ISBN 3816928315.
- THYSSENKRUPP STEEL EUROPE, Hg., 2014. *Tiefziehstähle DD, DC und DX*. Datenblatt ThyssenKrupp Steel Europe. Duisburg. 2014.
- TIMMERBEIL, F.W., 1957. *Untersuchung des Schneidvorganges bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt*.
- Tribologie - Definition, Begriffe, Prüfung*, 2002.
- VDI 2906, 1994. *Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall*. Berlin.
- VDI 3368, 1982. *Schneidspalt, Schneidstempel und Schneidplattenmaße für Schneidwerkzeuge der Stanztechnik*. Düsseldorf.
- VERKERK, J. 1976. *Wheelwear control in grinding: Models for the control of wheelwear, grinding force and surface roughness by the choice of dressing and grinding conditions*. Dissertation. University of Twente
- VOLK, W. und DEMMEL, P. *Verfahren und vorrichtung zum zerteilen eines Werkstückes*. 2013. Patentanmeldung. Veröffentlichungsnummer: WO2013167232 A1. Anmeldenummer: PCT/EP2013/001146. Technische Universität München
- WEINERT, K., 1994. *Spanende Fertigung*. Essen: Vulkan-Verl. ISBN 9783802729133.
- WENZEL GMBH, Hg., 2012. *Betriebsanleitung LH 65 / LH 87 / LH 108*. Wiesenthal. 2012.
- WESTKÄMPER, E. und H.-J. WARNECKE, 2004. *Einführung in die Fertigungstechnik. Mit 10 Tabellen*. 6., neubearb. und erg. Aufl. Stuttgart: Teubner. Lehrbuch : Maschinenbau. ISBN 978-3-519-56323-5.
- WISSILINK, H., *Analysis of guillotining and slitting*, Dissertation. 2000. University of Twente
- WÖHE, G. und U. DÖRING, 2013. *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 25., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Vahlen. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. ISBN 3800646870.
- WORLDWIDE ANALYTICAL SYSTEMS AG, Hg., 2009. *Foundry - Master, Handbuch*. Udem. 2009.
- WRIGGERS, P., 2001. *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Berlin [etc.]: Springer. ISBN 3-540-67747-X.
- YAMASAKI, S. und T. OZAKI. *Shearing of Inclined Sheet Metals – Effect of Inclination Angle*. In: *JSME International Journal*, S. 533-539.
- ZIENKIEWICZ, O.C. und R.L. TAYLOR, 2000. *The finite element method*. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. ISBN 0750650494.
- ZWICK GMBH & CO. KG, Hg., 1988. *Betriebsanleitung Zwick DUPS*. Stuttgart. 1988.