

Ermittlung und Auswirkung der Durchbruchkraft beim Scherschneiden

Franz Ferdinand Neumayer

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:

Prof. Dr. Markus Zimmermann

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
2. Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Die Dissertation wurde am 29.01.2020 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.06.2020 angenommen.

Vorwort

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, danke ich für die Freiheit bei der Bearbeitung des Themas und für das damit verbundene Vertrauen.

Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, Ordinarius des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen an der Leibniz Universität Hannover für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr. Markus Zimmermann, Ordinarius des Lehrstuhls für Lehrstuhl für Produktentwicklung, Konstruktionssystematik und Leichtbau an der Technischen Universität München für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die experimentellen Tätigkeiten, auf denen die Ergebnisse dieser Arbeit aufbauen, wurden am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München durchgeführt. Ich bedanke mich daher bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls in meiner aktiven Zeit für die große Unterstützung in vielerlei Form. Meinen Bürokollegen David Jocham und Thomas Greß gilt besondere Erwähnung für die freundschaftliche Atmosphäre im Büro. Unterstützung erhielt ich auch durch die Bearbeiter der im Anhang aufgeführten studentischen Arbeiten und durch viele wissenschaftliche Hilfskräfte, für die ich mich ebenso bedanke.

Während des langen Zeitraums einer Dissertation gibt es nicht minder Ernüchterungen und schwierige Phasen, die neben den fachlichen auch zu Erkenntnissen über sich selbst und die Welt führen. Ich bedanke mich daher für den vielfältigen Zuspruch, den ich von Familie, Freunden und Mitmenschen in dieser Zeit erfahren durfte.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir meinen bisherigen Werdegang durch ihre geschätzte Unterstützung ermöglicht haben.

Ulm, im Oktober 2020

Ferdinand Neumayer

Kurzbeschreibung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Bestimmung der Durchbruchkraft beim Scherschneiden und mit den durch diese Kraft maßgeblich bestimmten Prozessphänomenen (Schwingungen und Verschleiß).

Der Scherschneidprozess erzeugt beim mechanischen Trennen von metallischen Werkstoffen eine charakteristische Kraft-Zeit-Kurve an den Schneidaktivelementen. Die Durchbruchkraft ist dabei die Kraft, die im Augenblick des Durchbrechens des Werkstoffs an den Aktivelementen anliegt. Die Durchbruchkraft ist demnach danach jene Kraft, mit der die am Scherschneidprozess beteiligten Bauteile elastisch vorgespannt sind und die im Augenblick des Durchbrechens messbar ist.

Für die Messung des Durchbruchzeitpunkts und damit der Durchbruchkraft existiert für das Scherschneiden nach aktuellem Stand der Technik kein Verfahren. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Durchbruchzeitpunkt durch Messung der Entlastungswelle, die den Lochstempel nach Durchbruch durchläuft, ermittelt. Die jeweilige Kraft, welche im Durchbruchzeitpunkt am Lochstempel gemessen werden kann, ist die Durchbruchkraft. Das Messverfahren funktioniert durch einen Signalabgleich zwischen zwei am Stempel angebrachten Ebenen von Dehnmessstreifen und liefert bei der entsprechenden Messauflösung und Abtastrate sehr präzise Ergebnisse.

Die Schwingungen und Bewegungen im Schneidsystem während des Schnittschlags werden durch die Durchbruchkraft angeregt. Theoretische oder simulative Untersuchungen des Schwingungsverhaltens von Schneidsystemen zur akustischen Optimierung oder zur Verschleißminimierung müssen daher die Durchbruchkraft als Eingangsgröße nutzen.

Bei Kenntnis der Durchbruchkraft kann die Bewegung eines zylindrischen Lochstempels mit zylindrischem Stempelkopf nur durch Veränderung des vertikalen Kopfspieles zwischen Stempelhalterplatte und Druckplatte verringert werden. Nach Durchbruch des Blechs führt der Stempel in der Flugphase eine Eigenschwingung um seinen freien Massenschwerpunkt aus und bewegt sich gleichzeitig durch die frei werdende elastische Energie im Kopfspiel nach oben und nach unten. Dabei kann die Gesamtbewegung des Stempels durch Reibung der Lochung an der Mantelfläche Verschleiß verursachen. Simulative Untersuchungen ergeben bei den untersuchten Prozessen eine Abnahme des Gesamtreibwegs des Stempels um bis zu 16 % an der Schneidkante bei leichter Erhöhung des Kopfspieles in den Größenordnungsbereich von 10 µm im Gegensatz zur festen Einspannung aufgrund dissipativer Effekte durch Stoß und Reibung. In experimentellen Untersuchungen führte dieses minimale Kopfspiel zu einer Verkürzung der Riefenlänge um ca. 50 % im Vergleich mit der Festeinspannung, was einer Verdoppelung der möglichen Nachsetzoperationen gleichkommt.

Executive Summary

The present work deals with the determination of the break-through force during shear cutting and with the process phenomena (vibration and wear) determined by this force.

The shear cutting process produces a characteristic force-time curve on the cutting active elements in the mechanical separation of metallic materials. The break-through force is the force that rests on the active elements at the moment of breaking the material. The break-through force is then the force with which the components involved in the shear cutting process are elastically biased and which is measurable at the moment of breaking.

According to the current state of the art, no methods for the measurement of the break-through time and thus the break-through force exists. Within the scope of this thesis, the break-through time is determined by measuring the relief wave passing through the punch after break-through. The respective force, which can be measured at break-through time on the punch is the break-through force. The measurement process works by aligning the signal between two levels of strain gauges attached to the stamp and gives very accurate results at the appropriate measurement resolution and sampling rate.

The vibrations and movements in the cutting system during cutting are stimulated by the break-through force. Theoretical or simulated examinations of the oscillation obsolescence of cutting systems for acoustic optimization or minimization of wear must therefore use the break-through force as an input variable.

With knowledge of break-through force the movement of a cylindrical punch with a cylindrical punch head can be reduced only by changing the vertical head clearance between the punch holding plate and pressure plate. After the break-through of the sheet, the stamp executes a self oscillation around its free center of mass in the flight phase and at the same time moves upwards and downwards as a result of the released elastic energy in head play. In this case, the total movement of the punch caused by friction of the perforation on the lateral surface wear. Simulated investigations show a decrease at about 16 % in the total travel distance of the punch at the cutting edge with slightly increased head play in the order of magnitude of 10 μm in contrast to the fixed clamping caused by dissipative effects through impact and friction. In experimental investigations, this minimal head clearance led to a shortening of the groove length by approx. 50 % compared to fixed clamping, which equates to a doubling of the possible repositioning operations.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen.....	VI
Verzeichnis der Abkürzungen.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Scherschneiden	3
2.1.1 Einordnung des Scherschneidens	3
2.1.2 Prinzip des Scherschneidens	4
2.1.3 Ablauf des Lochens	6
2.1.4 Schneidkraft beim Lochen	9
2.1.5 Schnittflächen beim Lochen	12
2.1.6 Verschleiß beim Lochen	12
2.1.7 Parameter des Scherschneidens	14
2.2 Kraftmessung beim Scherschneiden.....	14
2.2.1 Piezoelektrische Kraftmessung	14
2.2.2 Resistive Kraftmessung	15
2.2.3 Praxis der Kraftmessung.....	18
2.3 Schwingungen und Wellen.....	19
2.3.1 Schwingungen.....	19
2.3.2 Wellen	25
2.3.3 Messtechnik für Schwingungen und Wellen	26
2.4 Grundlagen zu Bruchkräften	27
2.4.1 Ermittlung von Bruchkräften	27
2.4.2 Auswirkungen von Brüchen	29
2.5 Fazit	31
3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	32
3.1 Zielsetzung	32
3.2 Struktur	32
4 Ermittlung der Durchbruchkraft beim Lochen	35
5 Versuchsanlagen und Einrichtungen	41
5.1 Mechanische Schnellläuferpresse	41
5.2 Schneidwerkzeuge	41
5.3 Schneidstempel	44
5.4 Digitalmikroskop.....	45
5.5 3D-Koordinatenmessmaschine.....	45

5.6	Universalprüfmaschine	46
5.7	Profilmessgerät	46
6	Werkstoffe.....	47
6.1	Blechwerkstoffe	47
6.2	Werkzeugwerkstoffe.....	50
7	Messtechnik.....	52
7.1	Bestandteile und Aufbau	52
7.2	Kalibrierung	55
8	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	59
8.1	Versuchsplanung	59
8.2	Schnittflächenentstehung und -morphologie	61
8.3	Kraftmessungen am Schneidstempel	74
8.3.1	Einfluss des Blechwerkstoff	74
8.3.2	Einfluss der Messposition	76
8.3.3	Einfluss der Schneidparameter	77
8.4	Ermittlung der Prozesskräfte	78
8.4.1	Maximale Schneidkraft	78
8.4.2	Durchbruchkraft	79
8.4.3	Ergebnisse der Prozesskraftmessungen	83
8.5	Ermittlung der Schneidstempelbewegung.....	85
8.5.1	Eigenfrequenzen der Schneidstempel	86
8.5.2	Experimentell ermittelte Stempelbewegung	86
8.5.3	Simulativ ermittelte Stempelbewegung	102
8.6	Diskussion	107
8.7	Einfluss von Durchbruchkraft und Stempelbewegung auf den Mantelflächen- verschleiß	109
8.8	Zielerreichung	112
9	Zusammenfassung.....	113
A	Abbildungsverzeichnis	116
B	Tabellenverzeichnis.....	120
C	Literaturverzeichnis	121
D	Normenverzeichnis	126

Verzeichnis der Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Querschnittsfläche
A _{RZ}	m ²	Fläche der beeinflussten Randzone
A ₈₀	-	Bruchdehnung (Fläche)
A _g	%	Gleichmaßdehnung
a		der den Schneidkraftverlauf berücksichtigende Faktor
c ₀ , c ₁ , c ₂ , ...		Konstante(n)
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
D	-	Lehr'sches Dämpfungsmaß
d	-	Dämpfungskonstante
d ₁₁	C/N	piezoelektrischer Koeffizient
dR		elektrisches Widerstandsdifferential
dρ		spezifisches elektrisches Widerstandsdifferential
dx		Wegdifferential
E	N/mm ²	E-Modul
E _{pot}	Nm	potentielle Energie
e		Eulersche Zahl
Δ, δ	-	Differenz
ε	-	mechanische Dehnung
f	1/s	Frequenz
f _n	1/s	n-te (Eigen-)frequenz
F	N	Kraft
F _S	N	Schneidkraft
F _{DB}	N	Durchbruchkraft
F(x)	N	Funktion der wahren Schneidkraft
Φ	-	Phasenverschiebung
k	-	k-Faktor
k _F	N/m	Federsteifigkeit
k _s	N/mm ²	Schubfließspannung
L	m	Stempellänge
l	m	Länge
l _{Mess}	m	Messabstand
l _s	m	Schnittlinienlänge
Λ	-	logarithmisches Dekrement
λ	m	Wellenlänge
m	kg	Masse
n		Zählkonstante

ν		Querdehnungszahl
Q	C	elektrische Ladung
R_0	Ω	elektrischer Nennwiderstand
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm^2	0,2%-Dehngrenze
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ	Ωm	spezifischer Widerstand
s	mm	Blechdicke
σ	N/mm^2	mechanische Spannung
T	s	Periodendauer
t	s	Zeit
t_{DB}	s	Durchbruchzeitpunkt
t_{min}	s	minimale zeitliche Messauflösung
u	m	Verschiebung
U_A	V	Brückenausgangsspannung
U_B	V	Brückeneingangsspannung
$W_{s,real}$	Nm	reale Schneidarbeit
$W_{s,approx}$	Nm	approximierte Schneidarbeit
ω_n		n-te (Eigen-)Kreisfrequenz
x_0, x_1, x_2, \dots		Variable
x	m	Weg
\hat{x}		Amplitude

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Al	Aluminium (chemisches Element)
B	Bor (chemisches Element)
C	Kohlenstoff (chemisches Element)
Cr	Chrom (chemisches Element)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
GfT	Gesellschaft für Tribologie e.V.
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
ISO	International Standardisation Organisation
Mn	Mangan (chemisches Element)
Mo	Molybdän (chemisches Element)
MS	Megasamples (Abtastrate)
Nb	Niob (chemisches Element)
Ni	Nickel (chemisches Element)
Nr.	Nummer
P	Phosphor (chemisches Element)
PKS	Piezokraftmesssensor
R	Radius
S	Schwefel (chemisches Element)
Si	Silizium (chemisches Element)
Ti	Titan (chemisches Element)
<i>utg</i>	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
V	Vanadium (chemisches Element)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

1 Einleitung

Die Produktionstechnik ist eine der bedeutendsten Fachrichtungen des Maschinenbaus. Gerade im Zeitalter der (kundenindividuellen) Massenproduktion gewinnt der technologische Fortschritt in der Herstellung von Produkten eine vermehrte Bedeutung. Neben neuartigen Technologien wie dem 3-D-Druck oder der Kohlefasertechnologie kommen auch konventionellen Herstellungstechniken wie der Blechbearbeitung weiterhin eine große Bedeutung zu.

In der blechverarbeitenden Industrie ist Scherschneiden ein sehr häufig angewandtes Fertigungsverfahren. Fast jedes Blechprodukt wird mindestens einmal durch Scherschneiden bearbeitet (H. Hoffmann et al., 2012, S. 679)¹. Dabei geht das Anwendungsspektrum vom Großbeschnitt frisch gewalzter Stahlcoils mit einer Dicke von bis zu 3 mm und einer Breite von bis zu 650 mm mittels laufender Schere (Redecker, 2009, S. 5) bis hin zur Fertigung von Elektronikbauteilen aus metallischen Werkstoffen mit Blechdicken in Höhe von 20 µm und Lochungen mit Abmessungen im Mikrometerbereich (Hildering et al., 2015, S. 3). Im Zuge der Digitalisierung erlebt die Stanztechnologie durch die ökonomische Massenfertigung von Steckverbindern einen starken Aufschwung. Die gesamte Umformtechnik erwartet eine globale jährliche Wachstumsrate von 4,2 % von 2019 bis 2025 (Grand View Research, 2019). Die Einsatzdauer der Werkzeuge und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird in der Mehrzahl durch Verschleiß der Aktivelemente bestimmt (Schmelzer, 2007, S. 238). Dabei wirkt vor allem die Ausfallzeit einer Produktionseinheit und weniger der tatsächliche Materialverschleiß minimierend auf die Wirtschaftlichkeit ein.

Verschleißreduzierende Maßnahmen in der Stanztechnik werden in verschiedensten Prozessschritten eingesetzt. So werden Kaltarbeitsstähle und Schnellarbeitsstähle oder Hartmetalle mit höherem Verschleißwiderstand verwendet (Siegert, 2015, S. 252). Eine weitere wichtige Optimierung ist die Oberflächenbehandlung der Aktivelemente mit verschleißreduzierenden Beschichtungen (Doege und Behrens, 2010, S. 418). Maschinenseitige Maßnahmen sind zum Beispiel die Reduktion der Schwingungen und damit der Reibwege durch Schwingungsdämpfer (Behrens, Krimm und Hasselbusch, 2017).

Auf Grund der hohen Stückzahlen in der Stanztechnik erzeugen kleine Fortschritte in der Verschleißbeständigkeit hohe Einsparungen. Durch kombinierte Skaleneffekte in der Wertschöpfungskette potenzieren sich diese Einsparungen oft nochmals. Günstigere Herstellungskosten können die Nachfrage nach bestimmten Produkten steigern, was in Verbindung mit höheren Gewinnmargen zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führt. In engen Märkten in denen die Nachfrage wegen begrenzter Kapazitäten nicht befriedigt werden kann wird durch Hebung der Gesamtanlageneffektivität und damit einer Steigerung der Ausbringung die Wettbewerbsfähigkeit erhöht.

¹Die Zitierung folgt der Konvention, dass Quellenbelege, die sich auf einen Satz oder ein Element des Satzes beziehen hinter dem jeweiligen Punkt oder direkt hinter dem jeweiligen Satzelement stehen und Quellenangaben, die sich auf mehr als einen Satz beziehen nicht in einen Satz eingebunden sind.

Um Ansätze zur Reduzierung von Verschleiß zu generieren ist eine umfassende Analyse des Schneidprozesses von Notwendigkeit. Verschleiß ist im Rahmen des Schneidprozesses maßgeblich durch Relativbewegungen zwischen den Verschleißpartnern verursacht. Die Bewegung von Körpern erfordert eine Kraft, die auf den Körper einwirkt. Deswegen ist vor allem die Erfassung und Analyse der Kräfte, die während des Scherschneidprozesses auftreten prioritär. Hier setzt diese Arbeit mit der Erfassung der Kraft, die die Schwingungen und Bewegungen der am Schneidprozess beteiligten Bauteile anregt. Diese Kraft, im Folgenden Durchbruchkraft genannt, ist beim Scherschneiden bisher noch nicht ermittelt worden und wird in dieser Arbeit erstmals ermittelt.

Diese Arbeit untersucht eine grundlegend innovative Idee zur Minimierung des Mantelflächenverschleißes beim Lochschneiden mittels Schneidstempeln durch Reduzierung der Reibwege während des Schnittschlags. Die Durchbruchkraft kann dann genutzt werden, um das Schwingungsverhalten des Schneidstempels zu untersuchen und die Schwingwege des Schneidstempels durch konstruktive Maßnahmen zu optimieren. Ebenfalls sind durch die messtechnische Erfassung dieser Kraft wesentlich verbesserte Simulationen der dynamischen Zustände des gesamten Schneidsystems während des Schnittschlags zu erwarten.

2 Stand der Technik

Die Themenfelder der Arbeit untergliedern sich in den produktionstechnischen Prozess des Scherschneidens, der Kraftmessung, insbesondere der Messung der Durchbruchkraft beim Scherschneiden und mechanische Schwingungen und mechanische Wellen, die beim Scherschneidprozess auftreten. Die Grundlagen aus dem Stand der Technik dazu werden im Folgenden referiert.

2.1 Scherschneiden

2.1.1 Einordnung des Scherschneidens

Abbildung 2.1 zeigt die Einordnung des Scherschneidens in das Normengefüge der DIN 8580.

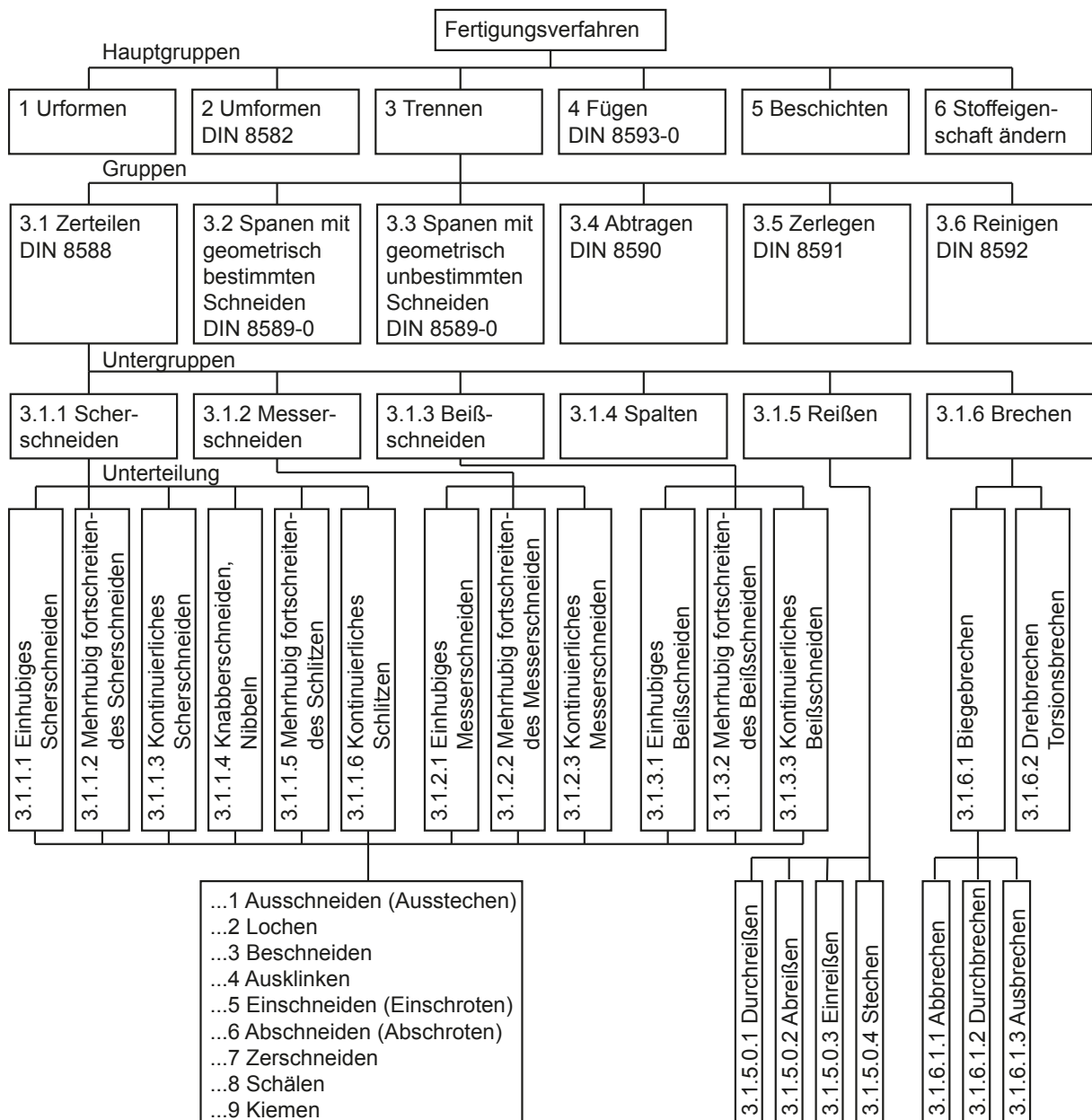


Abbildung 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8588 und DIN 8588

Nach DIN 8580 wird Scherschneiden in die Hauptgruppe 3 „Trennen“ und in die Gruppe 3.1 Zerteilen, genormt in DIN 8588 eingeteilt. Untergruppe 3.1.1 behandelt neben Messerschneiden, Beißschneiden etc. das Scherschneiden. Eine weitere Unterteilung des Scherschneidens findet in einhubiges, mehrhubiges, kontinuierliches etc., Scherschneiden statt. Hier setzt wiederum eine erneute Unterteilung an in Ausschneiden, Lochen etc.

2.1.2 Prinzip des Scherschneidens

Das Scherschneiden nach Ordnungsnummer 3.1.1 der DIN 8588 bezeichnet dabei das „Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen“. Die Benennungen am Werkzeug erhalten die Stammsilbe „Schneid“ und Benennungen bezogen auf das Werkstück die Stammsilbe „Schnitt“ (DIN 8588, S. 23). Der „Abstand zwischen den Schneiden senkrecht zur Schneidebene gemessen“ wird als Schneidspalt bezeichnet (DIN 8588, S. 26), dieser wird üblicherweise in Prozent der Blechdicke angegeben. So rangieren die Schneidspalt-Empfehlungen aus der Literatur nach der Aufstellung von *Matuzsewski* für das Lochen von St37 (S235) mit der Blechdicke 2 mm um die 5 % (Matuszewski, 1980, S. 94). Bei höheren Festigkeiten wird tendenziell ein größerer Schneidspalt vorgeschlagen (VDI-Richtlinie 3368, S. 2). Beim Normalschneiden beträgt der Schneidspalt daher zwischen 5 % und 15 % (H. Hoffmann et al., 2012, S. 681). In DIN 8588 werden die Verfahren in der untersten Gliederungsebene nach dem „verfolgten Zweck bzw. nach der angestrebten Werkstückform“ (DIN 8588, S. 21) unterteilt. Bedeutende Varianten sind dabei das Ausschneiden, Lochen und Abschneiden. Ausschneiden ist „einhubiges Schneiden längs einer in sich geschlossenen Schnittlinie zur Herstellung einer Außenform am Werkstück“ (DIN 8588, S. 11). Lochen ist „einhubiges Schneiden längs einer in sich geschlossenen Schnittlinie zur Herstellung einer Innenform am Werkstück“ (DIN 8588, S. 11). Abschneiden ist „vollständiges Trennen eines Halbfertigteiles oder Fertigteil vom Rohteil oder Halbfertigteil längs einer offenen, d. h. einer in sich nicht geschlossenen, Schnittlinie“ (DIN 8588, S. 13). Abbildung 2.2 zeigt diese Zusammenhänge schematisch.

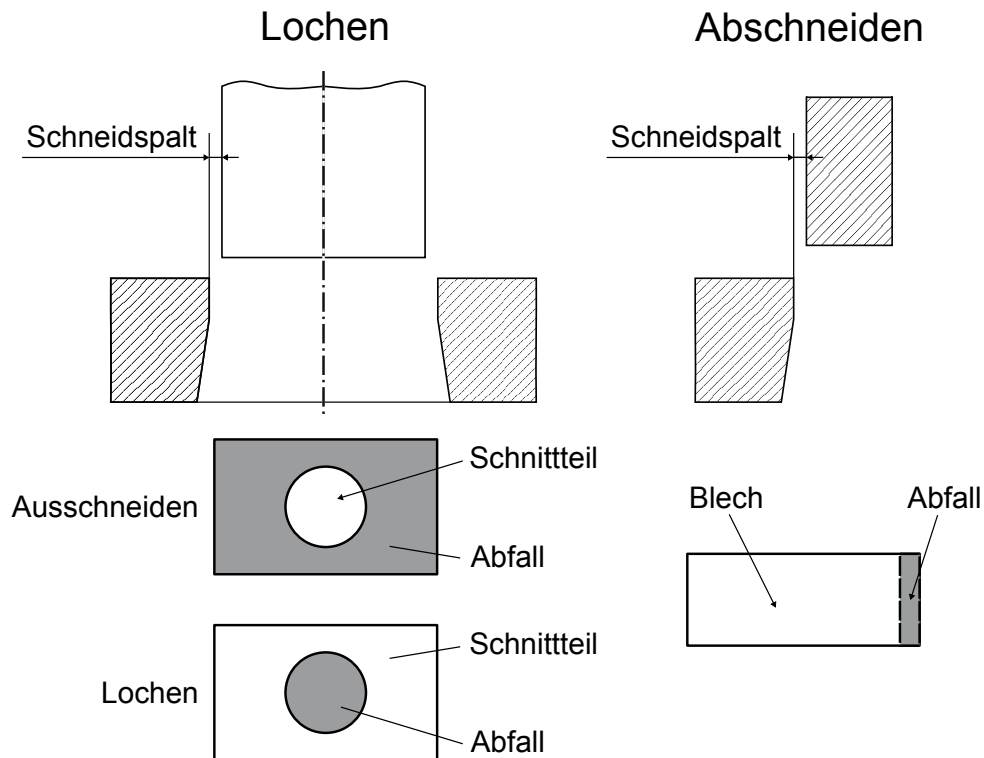


Abbildung 2.2: schematische Darstellung von Lochen, Abschneiden und Ausschneiden nach DIN 8588

Ferner gibt es Unterscheidungen, die sich auf die Kinematik des Schneidvorgangs beziehen. Es wird unterschieden in drückend, ziehend, vollkantig und kreuzend schneiden. Drückend schneiden ist „Schneiden, bei dem die Bewegung zwischen Schneidwerkzeug und Werkstück in der Schneidebene senkrecht zur Schneide verläuft“. Ziehend schneiden ist „Schneiden, bei dem die Bewegung zwischen Schneidwerkzeug und Werkstück in der Schneidebene schräg zur Schneide verläuft“. Vollkantig schneiden ist „Schneiden, wobei die Schneide von Beginn an in der vollen Länge der Schnittlinie wirkt“. Kreuzend schneiden ist „Schneiden zwischen zwei in der Schneidebene sich kreuzenden Schneiden, wobei eine Schneide entlang der Schnittlinie allmählich in das Werkstück eindringt“ (DIN 8588, S. 15). Die Kinematiken und die möglichen Kombinationen sind in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

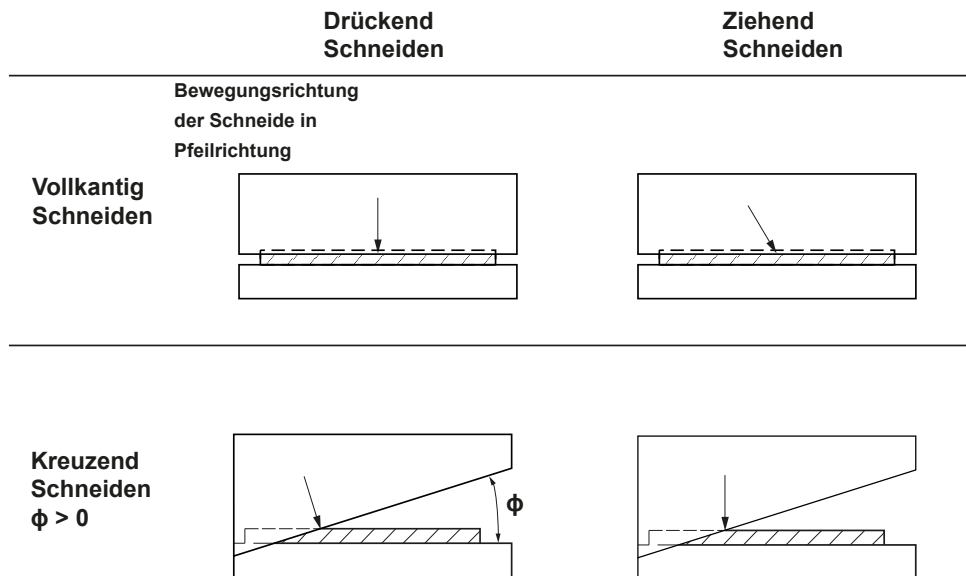


Abbildung 2.3: schematische Darstellung der Kombinationen von vollkantig, kreuzend, drückend und ziehend schneiden nach DIN 8588

2.1.3 Ablauf des Lochens

Zur Umsetzung des Prinzips des Scherschneidens ist ein Schneidwerkzeug notwendig. „[Anm. d. Verf: Schneid]werkzeuge werden in Pressen eingebaut und sind bestimmt für die Fertigung von Stanzteilen durch Verfahren des Zerteilens“ (DIN 9869-2, S. 1).

Eine exemplarische, schematische Skizze eines vereinfachten Schneidwerkzeugs für das im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich behandelte drückend, vollkantige, einhubige Lochen zeigt Abbildung 2.4.

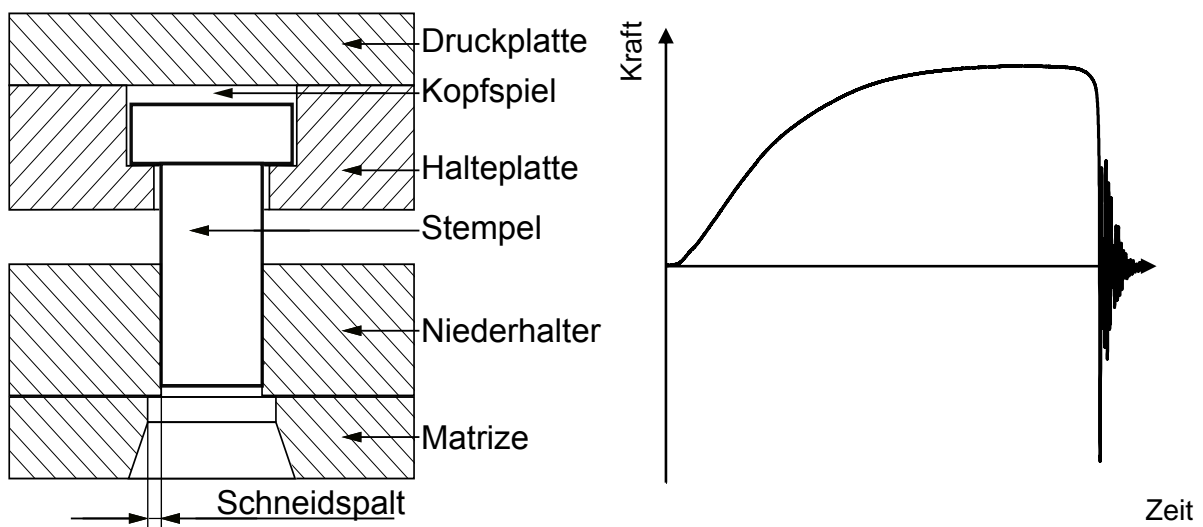


Abbildung 2.4: schematische Darstellung eines Werkzeugs zum Lochen (links), Typischer Schneidkraft-Zeit Verlauf beim Scherschneiden (rechts)

Das skizzierte Schneidwerkzeug ist ein einhubiges Einfachlochwerkzeug mit Niederhalter. Der Schneidstempel ist ein kreisrunder Schneidstempel mit zylindrischem Kopf in der Art nach DIN ISO 8020, in der Kopfform vergleichbar in der Ausführung eines Schneidstempels mit Bund nach VDI 3374. Zur Aufnahme von Schneidstempeln werden Stempelhalteplatten verwendet. Druckplatten werden eingesetzt, um den axialen Schneiddruck des Schneidstempels auf die Oberfläche der angrenzenden Werkzeugplatte zu übertragen (VDI 3374, S. 2 f.). Wenn die Tiefe der Einsenkung der Stempelhalteplatte größer ist als die Kopfhöhe des Schneidstempels entsteht ein Kopfspiel, welches ein axiales Spiel des Stempels ermöglicht. Dieses bewirkt einerseits, dass ein Stempel mit Führung am Schaft nicht statisch überbestimmt gelagert ist und verhindert damit ungünstige Zwangsbedingungen und ist für die dynamische Belastbarkeit des Stempelkopfes vorteilhaft (Mair, 2016, S. 90). Das Kopfspiel soll beispielsweise laut DIN 9844 $20\ \mu\text{m}$ und nach VDI 3374 zwischen $30\ \mu\text{m}$ und $60\ \mu\text{m}$ betragen. Für Hochpräzisionsschneiden wird der Stempel durch eine Führung am zylindrischen Teil geführt. Die Führung bewirkt, dass der Stempel im Rahmen des lateralen Führungsspiels zur Matrize zentriert wird, um einen gleichmäßigen Schneidspalt über den Umfang zu gewährleisten. Die Führungsfunktion wird in diesem Beispiel durch den Niederhalter übernommen. Bei einem gehärteten Stempel kann eine gehärtete Führungsbuchse in den Niederhalter eingesetzt werden. Die Matrizenplatte kann mit einer auswechselbaren Schneidbuchse versehen werden. Der durch das Werkzeug durchgeführte Schneidvorgang lässt sich in fünf Phasen einteilen. In Abbildung 2.4 (rechts) sind diese fünf Phasen an Hand der Schneidkraft-Zeit-Kurve beim vollkantig, drückenden Lochens eines metallischen Werkstoffs dargestellt.

Phase I: Aufsetzen des Stempels/Aufbringen der Niederhalterkraft

Mit Beginn der ersten Phase setzt der Stempel beim vollkantig drückenden Lochens mit der gesamten Schnittlinienlänge auf das Blech auf (H. Hoffmann et al., 2012, S. 682). Bei vorhandenem Niederhalter setzt dieser vorher auf das Blech auf und klemmt das Blech mit der Niederhalterkraft, die ca. 30 % der erwarteten Schneidkraft betragen sollte (Siegert, 2015, S. 228; Loibl, 2003, S. 49).

Phase II: elastische Verformung

In der zweiten Phase beginnt der Stempel in das Blech einzutauchen. Es erfolgt eine elastische Verformung sowohl des Stempels, der Matrize als auch des Blechs. Da der Kraftfluss zwischen Stempel und Matrize von Werkzeug und Presse geschlossen werden muss, verformen sich auch diese elastisch. In Abbildung 2.5 ist diese elastische Verformung anhand des Kurbelwegs über den Kurbelwinkel einer mechanischen Presse zu erkennen. Bei sachgemäßer Auslegung bleiben alle Komponenten bis auf das Blech im elastischen Verformungsbereich bis zum Ende des Schneidvorgangs und gehen wieder in ihren geometrischen Ausgangszustand zurück. Durch den Schneidspalt entsteht ein Biegemoment im Blech, was zu einer Abhebung des Blechs in der Mitte des Stempels führt (Fritz, 2018, S. 228). Daher drückt der Stempel nur auf eine schmale Ringzone im weiteren Schneidverlauf. Der Niederhalter verhindert ein Aufbiegen des Blechs

außerhalb der Schnittlinie (Schmelzer, 2007, S. 146). Unter dieser Ringzone bildet sich ein Spannungsfeld aus welchem als Scherzone bezeichnet wird (Klocke, 2017, S. 489).

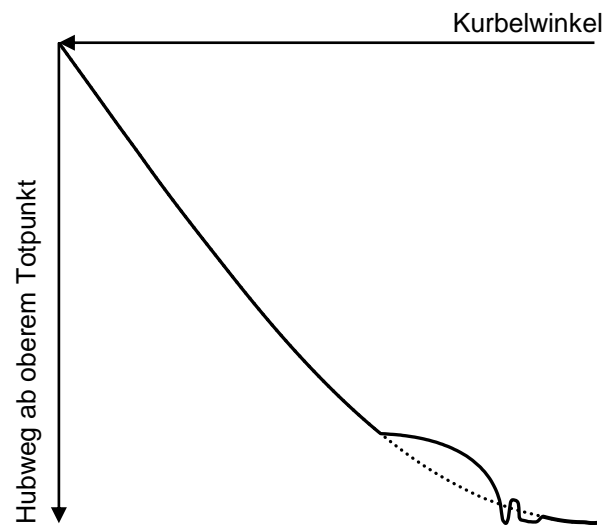


Abbildung 2.5: *realer Kurbelweg einer mechanischen Presse während des Schneidvorgangs (nach Behrens, Krimm und Hasselbusch, 2017, S. 2)*

Phase III: Elastisch-Plastische Verformung

Bei weiterem Vordringen des Stempels in das Blech wird das Blech immer weiter elastisch verformt und die Spannungen in der Scherzone erreichen immer größere Werte. Wenn die Spannungen die Schubfließgrenze erreichen, beginnt der Werkstoff zu fließen. Der Kanteneinzug und der Glattschnitt bilden sich aus und die Schneidkraft erreicht ihr Maximum. Die Durchbiegung des Blechs innerhalb der Schnittlinie bleibt erhalten, da der elastische Anteil auch während des Plastifizierens nicht verringert wird. (Siegert, 2015, S. 228) Er wird durch die Kaltverfestigung vielmehr sogar vergrößert.

Phase IV: Rissinitiierung und Bruch

Das Formänderungsvermögen des Werkstoffs besteht bis zur Schubbruchgrenze. Wenn diese erreicht ist, wird der Riss durch die Schneidkanten von Stempel und Matrize initiiert. Wegen der Überlagerung der Spannungen von Durchbiegung und Werkstoffstreckung an der Unterseite beginnen die Risse beim Lochen meistens an der Matrize. Beim Abschneiden dagegen wird der Riss meistens am Obermesser initiiert. Bei weiterem Vordringen des Stempels entsteht auch an der anderen Schneidkante ein Riss. Bei für den Prozess passend eingestelltem Schneidspalt laufen diese beiden Risse aufeinander zu. Bei zu großem oder zu kleinem Schneidspalt kommt das Risswachstum bei weiterem Vordringen des Stempels zum Erliegen. (Fritz, 2018, S. 229) Dies bewirkt die Ausbildung eines erneuten Glattschnittanteils, auch Sekundärglattschnitt genannt (H. Hoffmann et al., 2012, S. 682). Wenn bei entsprechend eingestelltem Schneidspalt beide Risse sich treffen kommt es zum Bruch. Dieser Bruch entlastet das gesamte System aus Stempel, Werkzeug und Presse schlagartig (Richards und Stimpson, 1985, S. 43 f.). Dadurch können „große dynamische Verlagerungen“ (Schuler GmbH, 1996, S. 291 f.) im Werkzeug

entstehen. Diese Verlagerungen bewirken durch Spiele zwischen Elementen der Presse und des Werkzeugs je nach Blechwerkstoff akustische Emissionen der Presse (VDI 3752, S. 5 f.). Nach der ersten Entlastung schließt sich ein Ausschwingvorgang an, währenddessen die elastische Energie dissipiert wird. Diese Schwingungen werden als Schnittschlag bezeichnet. Die durch den Schnittschlag vergrößerte Stempelbewegung führt insbesondere bei hoch- und höchstfesten Stahlblechwerkstoffen zu erhöhtem Werkzeugverschleiß (Kasparbauer, 1999, S. 11; Grote und Feldhusen, 2018, S. T56 f.).

Phase V: Rückhub

Nach Erreichen des unteren Totpunkts der Presse kommt es zu einer Umkehr der Bewegungsrichtung und der Stempel wird wieder aus dem geschnittenen Loch gezogen. Die elastischen Spannungen im Blech wurden bei Bruch frei und das Blech klemmt den Stempel nach dem Ausschwingvorgang ein. Je nach Blechmaterial und Schneidparametern tritt hierbei eine Rückzugskraft auf (Matuszewski, 1980, S. 224 f.).

2.1.4 Schneidkraft beim Lochen

Die Schneidkraft entsteht durch das Eindringen des Stempels in das Blech durch die daraus resultierenden Spannungen im Blech. Schon *Bach* (Bach, 1924) untersuchte die im Blech entstehenden Spannungen beim Lochen. Eine modellhafte Betrachtung der Kräfte in der Scherzone wurde von *Romanowski* (Romanowski, 1959, S. 32) vorgenommen. Diese ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

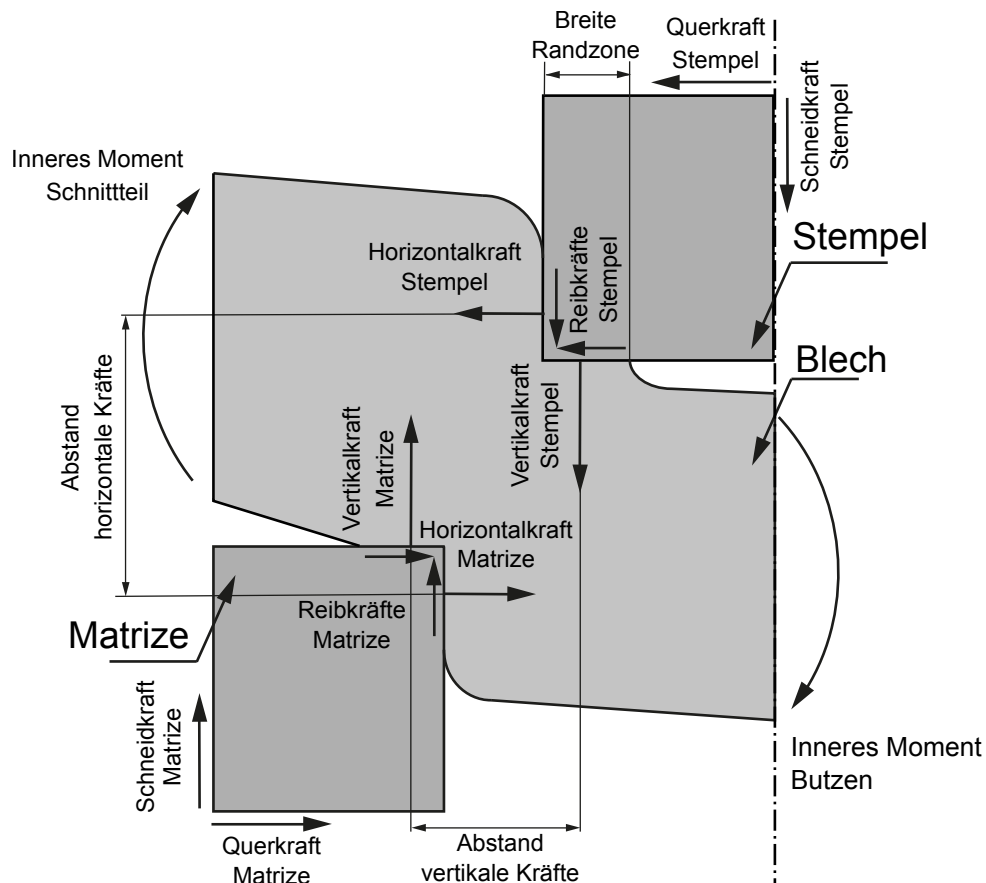


Abbildung 2.6: Kräfte und Momente beim Lochen (nach Romanowski, 1959, S. 32)

Die beim Eindringen des Stempels entstehende Schneidkraft am Stempel kann in eine horizontale Komponente und eine vertikale Komponente zerlegt werden. An der Matrize kann die entstehende Schneidkraft ebenfalls in eine horizontale und vertikale Komponente zerlegt werden. Auf Grund der durch das Fließen des Blechwerkstoffs entstehenden Relativbewegung zwischen Blech und Stempel entstehen die entsprechenden Reibkräfte zu den Normalkräften an Stempel und Matrize. Diese Reibkräfte tragen maßgeblich zum Stempelverschleiß bei. Durch den Schneidspalt besteht ein Abstand zwischen den Vertikalkräften. Ebenfalls besteht ein Abstand zwischen den Horizontalkräften. Diese Abstände induzieren ein Biegemoment in das Blech, so dass sich das Blech unter dem Stempel aufzuwölben beginnt. Die Aufwölbung außerhalb der Schnittlinie wird normalerweise durch einen Niederhalter unterdrückt. Durch diese Aufwölbung ist der Stempel während des Schneidvorgangs nur auf einer schmalen Ringzone mit dem Blech in Kontakt. Sowohl für die Auslegung und Dimensionierung von Werkzeugen, wie auch für die Auswahl von Schneidpressen ist es notwendig die maximalen Schneidkräfte in Abhängigkeit von Blechmaterial und Schnittlinienlänge quantitativ ermitteln zu können. Zu diesem Zweck wird oft das einfache mechanische Modell, in dem der Werkstoff bei einer abgeschätzten Schubfließgrenze über die volle Schubfläche während des Schneidvorgangs fließt und damit eine konstante Schneidkraft induziert wird verwendet. Die Schnittlinienlänge multipliziert mit der Blechdicke ergibt dabei die Schubfläche. Die Multiplikation der Schubfläche mit der Schubfließspannung ergibt die

Schneidkraft (Lange, 1990, S. 117). Diese Zusammenhänge sind in *Gleichung 2.1* mathematisch dargestellt

$$F_S = k_s \cdot l_s \cdot s \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

wobei:

F_S	=	Schneidkraft
k_s	=	Schubfließspannung
l_s	=	Schnittlinienlänge
s	=	Blechdicke

Die Schubfließspannung, auch Schneidwiderstand genannt, wird dabei oft aus der Zugfestigkeit abgeschätzt mit *Formel 2.1*.

$$k_s = 0,8 \cdot R_m \quad (\text{Formel 2.1})$$

wobei:

k_s	=	Schubfließspannung
R_m	=	Zugfestigkeit

Neben diesem Standardansatz existiert eine Vielzahl von anderen Ansätzen zur Berechnung der Schneidkraft. Siehe dazu *Matuszewski* (Matuszewski, 1980, S. 10 f.) oder *Martins und Atkins* (Martins und Atkins, 2013). Die wirklich auftretenden Schneidkräfte sind während des Schneidvorgangs nicht konstant.

Das Integral über die wahren Schneidkräfte und den Weg ergibt die Schneidarbeit nach *Gleichung 2.2*. Die Schneidarbeit ist ebenso für die Auslegung des Energiespeichers von Pressen notwendig.

$$W_{s,real} = \int F(x)dx \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

wobei:

$W_{s,real}$	=	reale Schneidarbeit
$F(x)$	=	Funktion der wahren Schneidkraft
dx	=	Wegdifferential

Die Schneidarbeit kann wiederum durch Multiplikation von berechneter Schneidkraft und Blechdicke mit *Gleichung 2.3* abgeschätzt werden. Durch einen Faktor wird der Schneidkraftverlauf, Werkstofffestigkeit, Blechdicke und Schneidspalt berücksichtigt. Er liegt in etwa zwischen 0,4 und 0,7. (Lange, 1990, S. 123 f. H. Hoffmann et al., 2012, S. 689)

$$W_{s,approx} = a \cdot F_s \cdot s \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

wobei:

$W_{s,approx}$	=	reale Schneidarbeit
a	=	der den Schneidkraftverlauf berücksichtigende Faktor
$F(s)$	=	Funktion der wahren Schneidkraft
s	=	Blechdicke

2.1.5 Schnittflächen beim Lochen

An den durch Scherschneiden bearbeiteten Bauteilen entstehen charakteristische Schnittflächen. Für das Scherschneiden sind diese in der VDI 2906 normiert. Abbildung 2.7 zeigt die für die Arbeit relevanten Kenngrößen daraus.

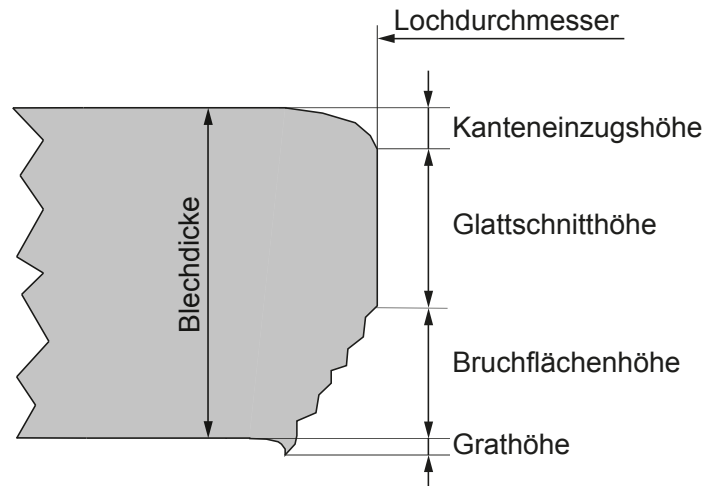


Abbildung 2.7: Wichtige Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906

Die Schnittflächenkenngrößen werden üblicherweise in Prozent der Blechdicke angegeben. Die Kenngrößen weisen einen Zusammenhang mit den einzelnen Phasen des Scherschneidvorgangs auf. So entstehen Kanteneinzug, Glattschnitt und Grat während der plastischen Phase. Der Bruch entsteht während der Bruchphase. Durch die Wahl von bestimmten Schneidparametern können auch entartete Schnittflächen entstehen, die sich in Ihrem Erscheinungsbild nicht durch die VDI 2906 klassifizieren lassen. So kann die Bruchausbreitung nach einem ersten Bruchbeginn wieder zum Erliegen kommen und mit dem Vordringen des Stempels eine erneute plastische Phase einsetzen wonach es erneut zu einem zweiten endgültigen Trennbruch kommt. Dieser Glattschnitt wird als Sekundärglattschnitt (Nothhaft, 2014, S. 11) oder das Phänomen auch als Zipfelbildung (Lange, 1990, S. 114) bezeichnet.

2.1.6 Verschleiß beim Lochen

Tribologische Vorgänge während des Schneidprozesses führen zu Verschleißerscheinungen an den Schneidaktivelementen. „Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ (GfT Arbeitsblatt 7, 2002, S. 5). Dabei wirken verschiedene Verschleißmechanismen, die den Verschleiß verursachen. Diese sind Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktion (GfT Arbeitsblatt 7, 2002, S. 5). Die grundlegenden Phänomene der vier Verschleißmechanismen sind in Abbildung 2.8 (links) skizziert. Oberflächenzerrüttung entsteht durch zyklischen Kontakt von Körpern mit einer Mindestkraftamplitude (Czichos und Habig, 2015, S. 134). Die Spannungen,

die dabei unter der Kontaktfläche entstehen führen zu einer Werkstoffermüdung. Die Ermüdung äußert sich zum Beispiel durch Risse beim Abwälzen und Gleiten zweier Körper aus Metall oder durch Kavitationserosion durch Flüssigkeitsströmungen (Sommer et al., 2018, S. 24). Abrasion entsteht durch Mikropflügen, Mikrozerspanen oder durch Mikrobrechen (Czichos und Habig, 2015, S. 137 f.). Dabei dringt ein härterer Körper in den anderen auf Mikroebene ein und verursacht so Materialabtrag (Sommer et al., 2018, S. 21). Adhäsion ist die Entstehung von Kaltverschweißungen durch hohe Pressungen und chemische Affinität der Kontaktpartner zueinander. Bei Relativbewegung der Kontaktpartner wird die Verschweißung an der schwächsten Stelle, die meist das Grundmaterial eines Kontaktpartners ist, zerstört (Czichos und Habig, 2015, S. 140). Tribochemische Reaktion entsteht durch tribologische Beanspruchung und gleichzeitiger chemischer Reaktionen zwischen zwei Körpern. Die chemischen Reaktionsprodukte besitzen oftmals andere Eigenschaften als die Werkstoffe der beiden Körper und verändern damit das tribologische System, was eine Verschleißerhöhung aber auch eine Verschleißminderung verursachen kann (Czichos und Habig, 2015, S. 142 f.). Abhängig vom Verschleißort wird beim Scherschneiden zwischen Stirnflächenverschleiß, Mantelflächenverschleiß, Schneidkantenverschleiß und Kolkverschleiß unterschieden (Lange, 1990, S. 136). Verschleißkenngrößen sind dabei die Mantelflächenverschleißlänge, die Stirnflächenverschleißlänge und der 45° -Verschleiß (Toussaint, 2000, S. 13). Diese sind in Abbildung 2.8 (rechts) anhand des Querschnitts des Verschleißgebietes eines Lochstempels dargestellt. Diese Kenngrößen können an taktil gemessenen Querschnitten oder Querschliften gewonnen werden. Die Mantelflächenverschleißlänge bei einem Lochstempel ist dabei die Länge zwischen der ursprünglichen Stirnfläche und dem Punkt an dem die Stempelgeometrie an der Mantelfläche zu ersten Mal von der ursprünglichen Geometrie abweicht. Analog ist die Stirnflächenverschleißlänge definiert. Der 45° -Verschleiß ist die Verschleißlänge, die auf einer 45° -Winkelhalbierenden des ursprünglichen rechtwinkligen Stempelquerschnitts zwischen der ursprünglichen Schneidkante und der Schneidkante des verschlissenen Stempels entsteht.

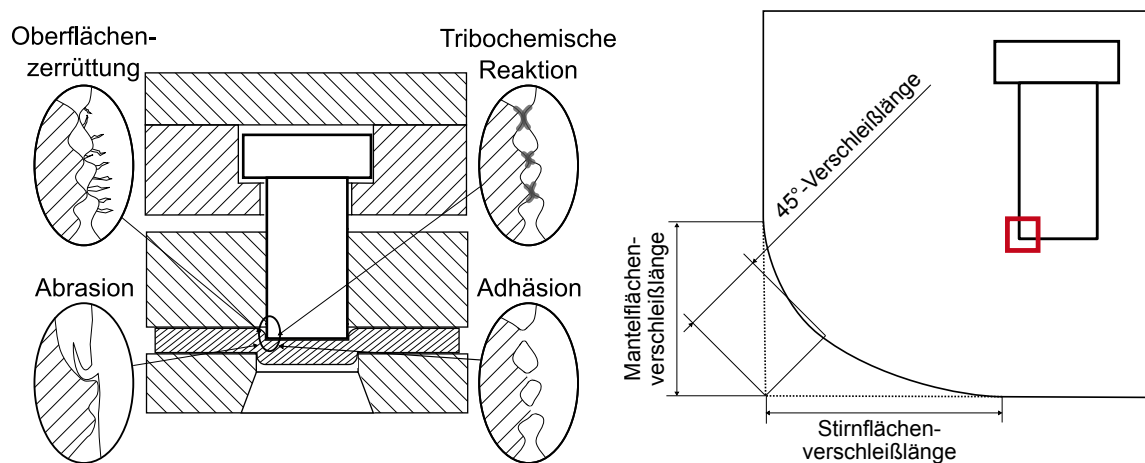


Abbildung 2.8: Verschleißmechanismen (links) und Verschleißkenngrößen (rechts) beim Scherschneiden

Verschleißmindernd wirkt zunächst eine hohe Härte des Verschleißkörpers. Eine zu geringe Zähigkeit begünstigt allerdings das Ausbrechen von Teilen des Verschleißkörpers (Dahl et al., 1993, S. 605 ff.). Zur Verschleißminimierung werden Aktivelemente daher häufig mit Hartstoffschichten beschichtet (Lange, 1990, S. 137). Aber auch Aufkohlen und Nitrieren können eingesetzt werden, um harte Randschichten zu schaffen (Czichos und Habig, 2015, S. 179). Adhäsiver Verschleiß kann insbesondere beim Feinschneiden vor allem durch Schmierung minimiert werden (Kolbe und Hellwig, 2018, S. 297).

2.1.7 Parameter des Scherschneidens

Die Einflüsse auf den Scherschneidprozess und deren Auswirkungen sind stark von den Schneidparametern und den sonstigen Bedingungen beim Schneidprozess abhängig. Die wichtigsten Parameter und Randbedingungen sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Dabei wurde die Zusammenstellung von *Hoogen* (Hoogen, 1999, S. 16) als Grundlage verwendet und leicht abgeändert.

Tabelle 2.1: Wichtige Parameter beim Scherschneiden

Werkzeugmaschine	Werkzeug	Blechwerkstoff	Schneidprozess
Statisches Verhalten	Schneidspalt	Blechdicke	Schmierung
Dynamisches Verhalten	Schnittlinie	Oberfläche	Schneidgeschwindigkeit
	Schneidkanten	Eigenschaften	Temperatur
	Werkzeugwerkstoff		Schneidatmosphäre
	Verschleißverhalten		
	Dynamisches Verhalten		

2.2 Kraftmessung beim Scherschneiden

Die Messung von Kräften erfolgt über die von ihr ausgeübten Wirkungen (Bonfig, 1995, S. 103). Üblicherweise sind dies elastische Verformungen von festen Körpern. Diese elastische Verformung kann über viele Effekte (induktiv, kapazitiv, optisch, faseroptisch, Schwingsaiten) messtechnisch erfasst werden (Bonfig, 1995, S. 103 ff.). Im Folgenden werden die aktuell meistgenutzten Verfahren, die piezoelektrische Kraftmessung und die Kraftmessung mittels DMS und der Einsatz dieser Techniken zur Kraftmessung beim Scherschneiden behandelt. Ebenfalls wird kurz auf den Stand der Technik zur Messung von Bruchkräften eingegangen.

2.2.1 Piezoelektrische Kraftmessung

Kraftmessung in piezoelektrischen Sensoren funktioniert mit dem piezoelektrischen Effekt in bestimmten Kristallen (z.B. Quarz, Turmalin oder Natriumkaliumtartrat oder Bariumtitanat (Bonfig, 1995, S. 117). Das Kristallgitter dieser Materialien besteht aus Atomen mit unterschiedlichem

elektrischen Ladungszustand. Bei der durch eine von außen einwirkenden Kraft verursachten Verschiebung im Kristallgitter entsteht ein elektrisches Dipolmoment, wie in Abbildung 2.9 (links) gezeigt. Dieses Dipolmoment verursacht elektrische Ladungen an den Angriffsflächen der Kraft. Die entstehenden Ladungen können nach *Gleichung 2.4* berechnet werden (Bill, 2003, S. 9).

$$Q = n \cdot F \cdot d_{11} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

wobei:

- Q = elektrische Ladung
- n = Zählkonstante $\in \mathbb{N}$ für die Lagen der Kristalle
- F = Kraft
- d_{11} = piezoelektrischer Koeffizient

Dabei ist die Ladung des piezoelektrischen Koeffizienten von der Kraft und der Anzahl der piezoelektrischen Kristalle abhängig. Eine Vergrößerung der Kristalle bewirkt keine Erhöhung der Ladungsausbeute. Mehrere in Lagen angeordnete Quarzlagen dagegen erhöhen die Ladungsausbeute. Durch Isolierung der Kraftangriffsflächen gegen den Kristall und den Anschluss einer Ladungsleitung entsteht ein piezoelektrischer Kraftsensor. Piezoelektrische Sensoren besitzen eine sehr niedrige Ansprechschwelle. Das Ladungssignal eines piezoelektrischen Sensors muss für die Signalverarbeitung in eine elektrische Spannung umgewandelt werden. Dafür stehen Ladungsverstärker oder Impedanzwandler mit Kuppler zur Verfügung. Impedanzwandler sind dabei häufig in den Sensor integriert. Der grundlegende Signalfluss ist in Abbildung 2.9 (rechts) dargestellt. Durch Leckströme und Kondensatorentladung unterliegt die Ausgangsspannung einem Drift. Daher eignet sich ein piezoelektrischer Kraftsensor nicht für statische Kraftmessungen (Bill, 2003, S. 56 ff.).

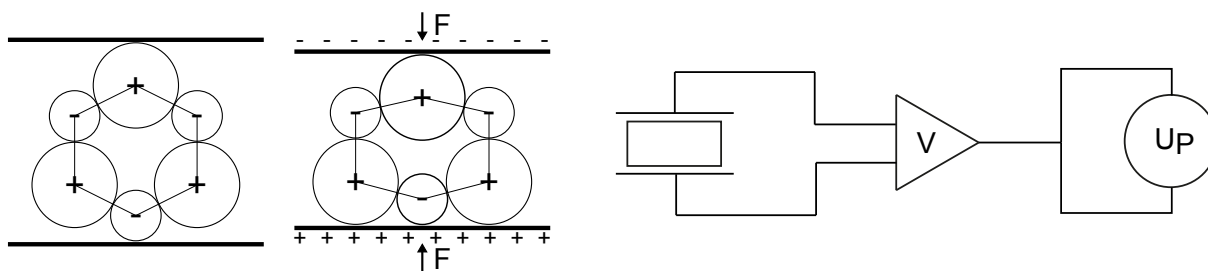


Abbildung 2.9: Piezoelektrischer Effekt (links) und Signalfluss einer piezoelektrischen Messkette mit Ladungsverstärker (rechts)

2.2.2 Resistive Kraftmessung

Kraftmessung mittels Dehnmessstreifen (DMS) funktioniert mittelbar über ein Verformungselement, auf welches der oder die DMS appliziert werden. Der übliche Aufbau eines Folien-DMS und die Applikation auf das Verformungselement wird in Abbildung 2.10 skizziert.

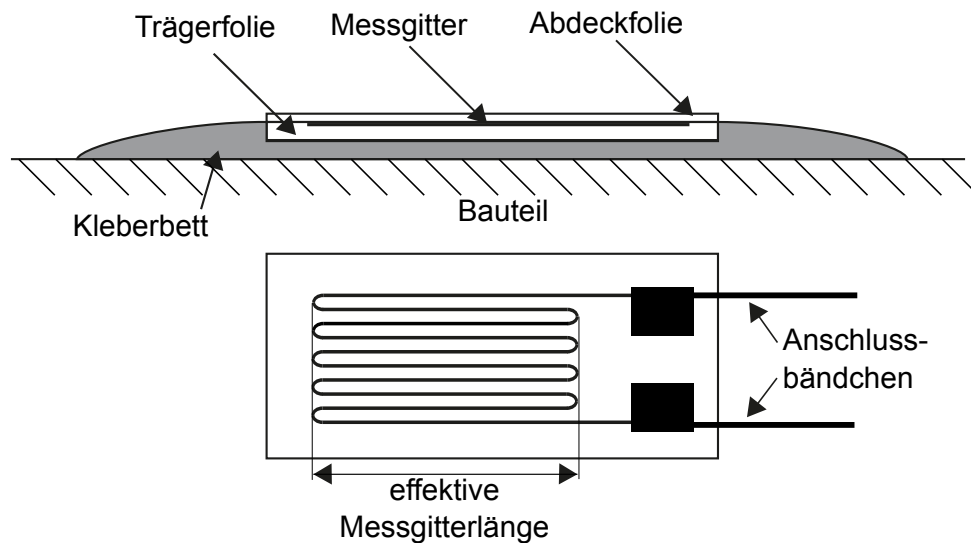


Abbildung 2.10: Applikation und Aufbau eines Folien-DMS (nach Keil, 2017, S. 15)

Das mäanderförmige Messgitter aus einem metallischen Werkstoff wie Konstantan, Karma oder Modco wird zwischen zwei Folien verschweißt und mit Anschlüssen versehen. Der so entstandene DMS wird dann mittels eines Klebstoffs (Cyanacrylat oder Epoxidharz) auf das Verformungselement appliziert, um eine unmittelbare Verbindung, die die Dehnungen des Verformungselements ohne Abweichung auf das Gitter des DMS überträgt herzustellen. Bei Verformung des Verformungselements wird die Dehnung über die Klebverbindung an das Messgitter weitergegeben. Dieses ändert durch die Verformung seine Länge und seinen Querschnitt. Ebenfalls verändert das Messgitter seinen spezifischen Widerstand durch Gefügeveränderungen. Gleichung 2.5 beschreibt die Zusammenhänge mathematisch.

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

wobei:

- dR = elektrisches Widerstandsdifferential
- R_0 = elektrischer Nennwiderstand
- ε = mechanische Dehnung
- ν = Querdehnungszahl
- $d\rho$ = spezifisches Widerstandsdifferential
- ρ = spezifischer Widerstand

Nach Umschreiben des Differentials in eine Differenz und Zusammenfassung der konstanten Terme folgt die bekannte Gleichung 2.6, die den Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Dehnung des DMS beschreibt.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

wobei:

ΔR = elektrische Widerstandsänderung

R_0 = elektrischer Nennwiderstand

k = k-Faktor

ε = mechanische Dehnung

Die Verformungen und damit Widerstandsänderungen eines DMS sind bei üblichen elastischen Verformungen von Bauteilen aus Metall relativ gering. Um die Änderungen des Widerstands besser messtechnisch erfassen zu können, wird üblicherweise eine Wheatstone'sche Brückenschaltung verwendet. Abbildung 2.11 zeigt den Schaltplan einer solchen Schaltung in Vollbrückenausführung.

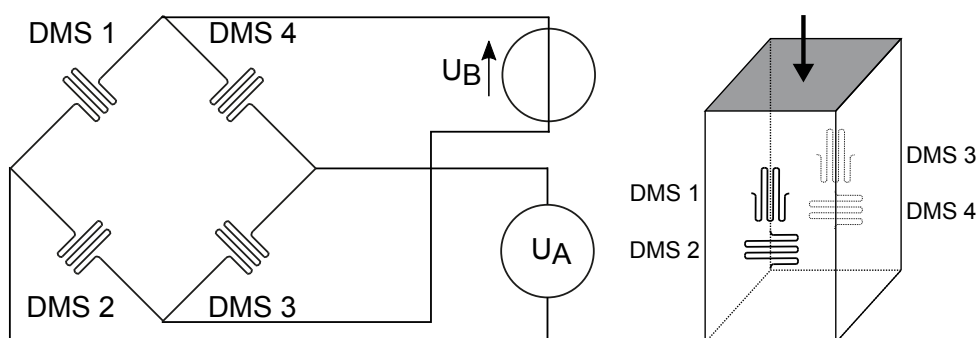


Abbildung 2.11: Schaltplan für eine Vollbrücke (links) und Applikation bei einachsiger Zug/Druck (rechts)

Diese Schaltung ermöglicht es die Widerstandsänderung der beteiligten Widerstände als Änderung einer Spannung messbar zu machen. Die eigentliche Brücke entsteht durch eine Reihenschaltung von vier Dehnmesstreifen. Es können auch lediglich ein DMS (Viertelbrücke) oder zwei DMS (Halbbrücke) verwendet werden. Die anderen DMS sind dann durch Widerstände mit konstantem Widerstand zu ersetzen. Durch Anlegen einer Gleichspannung an bestimmte Punkte der Verschaltung kann wiederum eine Ausgangsspannung an anderen Punkten der Schaltung ermittelt werden. Die Zusammenhänge der Änderungen der vier Widerstände und das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsspannung ist in Gleichung 2.7 beschrieben.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

wobei:

U_A = Brückenausgangsspannung

U_B = Brückeneingangsspannung

ΔR_x = elektrische Widerstandsänderung an Widerstand x

R_x = elektrischer Nennwiderstand von Widerstand x

Da die Dehnungsänderung von metallischen Körpern im elastischen Bereich proportional zur auf sie einwirkenden Kraft sind, kann mittels des Hooke'schen Gesetzes durch auf dem Körper aufbrachten DMS die Kraft ermittelt werden. Dazu werden die DMS zweckmäßigerweise so auf den Körper aufgebracht, dass die Regeln des Hooke'schen Gesetzes mit den Gesetzmäßigkei-

ten aus der Verschaltung zusammenpassen. So sollten auf einen mit Zug oder Druck belasteten metallischen Stab zwei DMS in Belastungsrichtung und zwei DMS quer zur Belastungsrichtung angebracht werden, um einfache formelmäßige Zusammenhänge zu erreichen. Mit dieser Anordnung ergibt sich für eine Vollbrücke *Gleichung 2.8*. *Gleichung 2.9* ergibt sich für die Schaltungsart Zwei/Viertel-Brücke in der zwei DMS in Belastungsrichtung messen.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{2}(1 + \nu)\varepsilon_1 \quad (\text{Gleichung 2.8})$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{2}\varepsilon_1 \quad (\text{Gleichung 2.9})$$

wobei:

- U_A = Brückenausgangsspannung
- U_B = Brückeneingangsspannung
- k = k-Faktor
- ν = Querdehnungszahl
- ε_1 = mechanische Dehnung in Belastungsrichtung

Vorteile der Vollbrücke gegenüber einer Halb- oder 2/4-Brücke sind vor allem die höhere Empfindlichkeit die bessere Temperaturkompensation und ein im Vergleich zu einer Viertelbrücke gevierteltes Rausch-Signal-Verhältnis. Die Umrechnung der Dehnung auf eine Spannung, bzw. Kraft erfolgt durch das Hooke'sche Gesetz. Die Genauigkeit dieser Rechnung ist abhängig von der genauen Kenntnis der Materialparameter (E-Modul und Querkontraktionszahl) des Messobjekts. Eine andere Möglichkeit besteht in der Kalibrierung des bei Belastung des Messobjekts erzeugten Spannungssignals gegen eine geeichte Kalibriereinrichtung. So kann das Messobjekt zum Beispiel in einer Universalprüfmaschine zur Zug-/Druckprüfung mit einer definierten Kraft belastet werden und das Signal der DMS Messkette auf diese Kraft kalibriert werden.

2.2.3 Praxis der Kraftmessung

Eine vergleichsweise ungenaue Verfahrensweise für die Messung von Schneidkräften ist zum Beispiel das Messen des Hydraulikdrucks der hydraulischen Presse während des Schneidvorgangs (Bach, 1924). Messungen von Prozesskräften in der Umform- bzw. Stanztechnik werden nach aktuellem Stand der Technik vor allem mittels piezoelektrischen Sensoren, so in (Kasparbauer, 1999; Fritsch, 2002; Hörmann, 2008; Hirsch, 2012; Nothhaft, 2014) und mittels Applikation von Dehnmessstreifen, so in (Hirsch et al., 2011; Mair, 2016) (beide Verfahren in Breitling et al., 1997) auf Bauteile oder Verformungselemente (so Kollment et al., 2018) im jeweiligen Kraftfluss durchgeführt. Beide Verfahren hat *Behrens* (Behrens, Krimm, Reithmeier et al., 2010) für die Kraftmessung in Stufenpressen gegenübergestellt. Für den untersuchten Anwendungsfall erwies sich die DMS-Technik als kostengünstiger.

Kraftmessungen mittels DMS haben auch Vorteile im Bereich der dauerhaft statischen Messungen, da eine Piezosensorik die Ladungen langsam abbaut. Ein Temperatureinfluss kann im DMS kompensiert werden, im Piezosensor nicht. Ebenso ist die Verkabelung weniger störanfällig, da keine Ladungen sondern Spannungen gemessen werden und DMS zeigen ein besseres Linearitätsverhalten. Bei sehr hohen konstanten Temperaturen allerdings sind Piezosensoren wiederum von Vorteil. Ebenso was die Überlastfähigkeit, die Lebensdauer, die Empfindlichkeit und den Messbereich betrifft.

Piezosensoren gelten bei Messungen von dynamischen Kräften als vorteilhaft gegenüber DMS-basierter Technik, da Piezosensoren eine sehr hohe Steifigkeit aufweisen und somit eine schnellere Ansprechzeit und auf Grund der hohen Eigenfrequenz wenig durch äußere Schwingungen beeinflusst werden. Bei der Schwingungsmessung sollten Aufnehmer mehr als die vierfache Eigenfrequenz des Messobjekts aufweisen (Keil, 2017, S. 82). Einschränkungen gibt es aber, wenn das dynamische Dehnungsverhalten in einer gegenüber dem Piezosensor kleinen Struktur gemessen werden soll, da der Piezosensor ein großes strukturfremdes Element ist, welches auf das Dehnungsverhalten der Struktur an der gemessen werden soll starken Einfluss hat. Ein DMS hat im Vergleich zu einer größeren Metallstruktur quasi keine Masse und misst direkt die Verformungen der Struktur am Messpunkt. Folien-DMS eignen sich zur Messung von sehr hohen Frequenzen, die selbst bei Schockbeanspruchung nur schwer erreicht werden (K. Hoffmann, 2015, S. 81). Bei der Applikation allerdings wirkt das Verformungselement eigenfrequenzbestimmend und damit nachteilig bei der Messung von äußeren höherfrequenten Schwingungen im Vergleich zum Piezosensor. Damit ist ein Piezosensor bei der Messung von quasistatischen Maximalkräften mit kurzer Zeitkonstante, wie dem Messen eines LKW-Gewichts beim Überfahren einer Messplatte oder der Maximalkraft beim Scherschneiden vorzuziehen. Bei der Messung von Schwingungen oder dem Verformungsverhalten einer bestimmten kleinen technischen Struktur sind DMS allerdings wesentlich genauer.

Die Nutzung von gemessenen Kräften liegt vornehmlich in der Auslegung von Prozessen und Werkzeugen, aber auch innovative Anwendungen, wie vorausschauende Wartung mittels künstlicher Intelligenz (vgl. Kollmann und Schmidt, 2016 und Wadi und Balendra, 1999) können ein Anwendungsfeld sein.

2.3 Schwingungen und Wellen

2.3.1 Schwingungen

Nach DIN 1311-1 ist eine Schwingung „eine zeitliche Änderung einer Zustandsgröße eines Systems, bei der im allgemeinen diese Zustandsgröße abwechselnd zu- und abnimmt.“ Schwingungen können nach ihrem zeitlichen Verlauf oder ihrem Entstehungsmechanismus eingeteilt werden. Diese Einteilungen zeigt Abbildung 2.12.

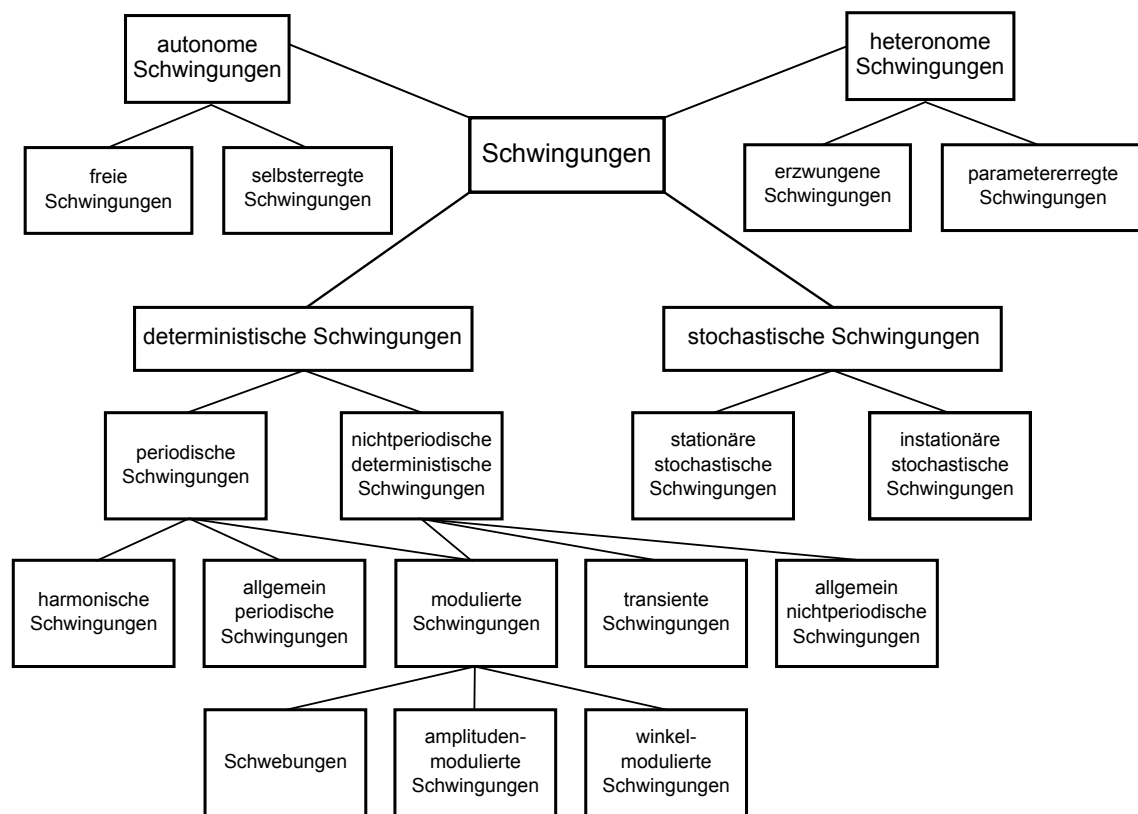


Abbildung 2.12: Einteilung von Schwingungen nach DIN 1311-1

Ein grundlegendes Modell zur Betrachtung mechanischer Schwingungen mit einem Freiheitsgrad ist der so genannte Einmassenschwinger (Möser, 2010, S. 3). Oft können durch eine Reduktion eines realen kontinuierlichen Schwingungssystems auf einen Einmassenschwinger Kenngrößen, Verhalten und Phänomene zur Analyse des realen Schwingungsproblems studiert werden (Magnus et al., 2016, S. 215). So zum Beispiel in Weck et. al. zur Optimierung des dynamischen Verhaltens einer Schnellläuferpresse (M. Weck et al., 2002, S. 193). Das mechanische Modell des Einmassenschwingers besteht aus einer schwingenden Punktmasse, die über eine Feder und einen Dämpfer an einen unbeweglichen Punkt angekoppelt ist. Der Einmassenschwinger besitzt einen Freiheitsgrad. Er kann frei schwingen oder eine Erregung erfahren. In Abbildung 2.13 ist ein Einmassenschwinger skizziert.

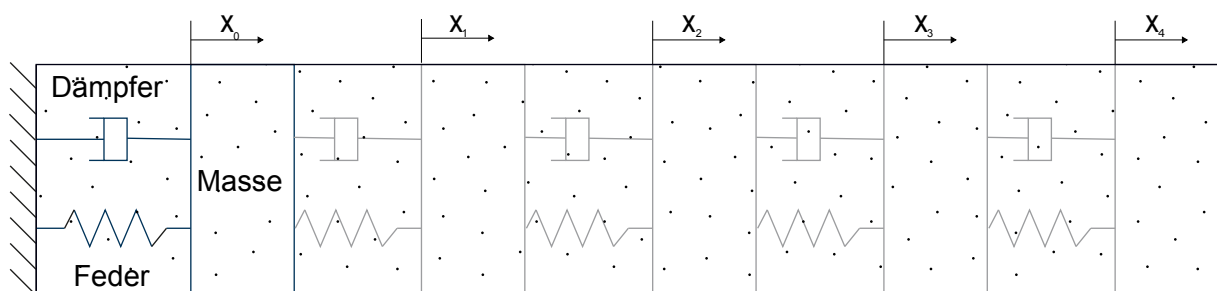


Abbildung 2.13: Skizze eines Einmassenschwingers, Mehrmassenschwingers und Kontinuumschwingers (gepunktet)

Das Kräftegleichgewicht am frei schwingenden gedämpften Einmassenschwinger führt zur folgenden Differential-Gleichung 2.10 (Grote und Feldhusen, 2018, S. B39).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + d \frac{dx}{dt} + k_F x = 0 \quad (\text{Gleichung 2.10})$$

wobei:

m	=	Masse
$\frac{d^2x}{dt^2}$	=	zweite Ableitung des Wegs nach der Zeit
d	=	Dämpfungs-konstante
$\frac{dx}{dt}$	=	erste Ableitung des Wegs nach der Zeit
k_F	=	Federsteifigkeit
x	=	Weg

Dabei fließt die Masse des Körpers durch das zweite Newton'sche Axiom ein, die Dämpfung ist eine lineare geschwindigkeitsabhängige Dämpfung mit der Dämpfungskonstante d und die Federkraft wird durch das lineare Federgesetz mit der Federkonstante k_F formuliert. Die Federkonstante für einen Stab in longitudinaler Richtung lässt sich mit Gleichung 2.11 berechnen (Jäger et al., 2016, S. 33).

$$k_{F,Stab} = \frac{EA}{L} \quad (\text{Gleichung 2.11})$$

wobei:

$k_{F,Stab}$	=	Federsteifigkeit des Stabs
E	=	E-Modul
A	=	Querschnittsfläche
L	=	Stempellänge

Mit Gleichung 2.12 lässt sich die in einem Stab potentiell gespeicherte Energie berechnen.

$$E_{pot,Stab} = \frac{1}{2} k_{F,Stab} \Delta l^2 \quad (\text{Gleichung 2.12})$$

wobei:

$E_{pot,Stab}$	=	potentielle Energie des Stabs
$k_{F,Stab}$	=	Federsteifigkeit des Stabs
Δl	=	Längendifferenz des Stabs

Aus Federkonstante und Masse lässt sich mit Gleichung 2.13 die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz des Einmassenschwingers berechnen. Ein Einmassenschwinger besitzt nur eine Eigenkreisfrequenz. Ein Mehrmassenschwinger besitzt für jede Masse eine Eigenfrequenz. Ein Kontinuumsschwinger besitzt theoretisch unendlich viele Eigenfrequenzen.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_F}{m}} \quad (\text{Gleichung 2.13})$$

wobei:

- ω_0 = erste Eigenkreisfrequenz
- k_F = Federsteifigkeit
- m = Masse

Die Dämpfung ist im Einmassenschwingers mittels des aus *Gleichung 2.14* ersichtlichen Zusammenhangs geschwindigkeitsabhängig modelliert. Technisch existieren allerdings wesentlich mehr Dämpfungsarten mit entsprechenden Dämpfungsgesetzen wie Werkstoffdämpfung, Systemdämpfung, Lagerdämpfung, Umgebungsdämpfung (Jäger et al., 2016, S. 87). Näheres zur Werkstoffdämpfung ist in der VDI 3830 genormt.

Ein Maß für die Dämpfung ist das Lehr'sche Dämpfungsmaß, welches für den Einmassenschwinger mit *Gleichung 2.14* berechnet werden kann und als eine der wichtigsten Kenngrößen zur Dämpfung verwendet wird (Dresig und Holzweißig, 2016, S. 47). Eine andere Bezeichnung lautet Dämpfungsgrad (DIN 1311-2, S. 7).

$$D = \frac{d}{2\sqrt{k_F m}} \quad (\text{Gleichung 2.14})$$

wobei:

- D = Lehr'sches Dämpfungsmaß
- d = Dämpfungskonstante
- k_F = Federsteifigkeit
- m = Masse

Die Lösung für den transienten Ausschwingvorgang eines Einmassenschwingers ohne Phasenverschiebung kann in Form von *Gleichung 2.15* formuliert werden (Dobrinski et al., 2010, S. 390).

$$x(t) = \hat{x} e^{-D\omega_0 t} \sin\left(\omega_0 \sqrt{1 - D^2} \cdot t + \Phi\right) \quad (\text{Gleichung 2.15})$$

wobei:

- $x(t)$ = Amplitude in Abhängigkeit der Zeit
- \hat{x} = initiale Amplitude
- D = Lehr'sches Dämpfungsmaß
- ω_0 = erste Eigenkreisfrequenz
- t = Zeit
- Φ = Phasenverschiebung

Eine Schwingung lässt sich damit als Signalverlauf über die Zeit wie in Abbildung 2.14 darstellen.

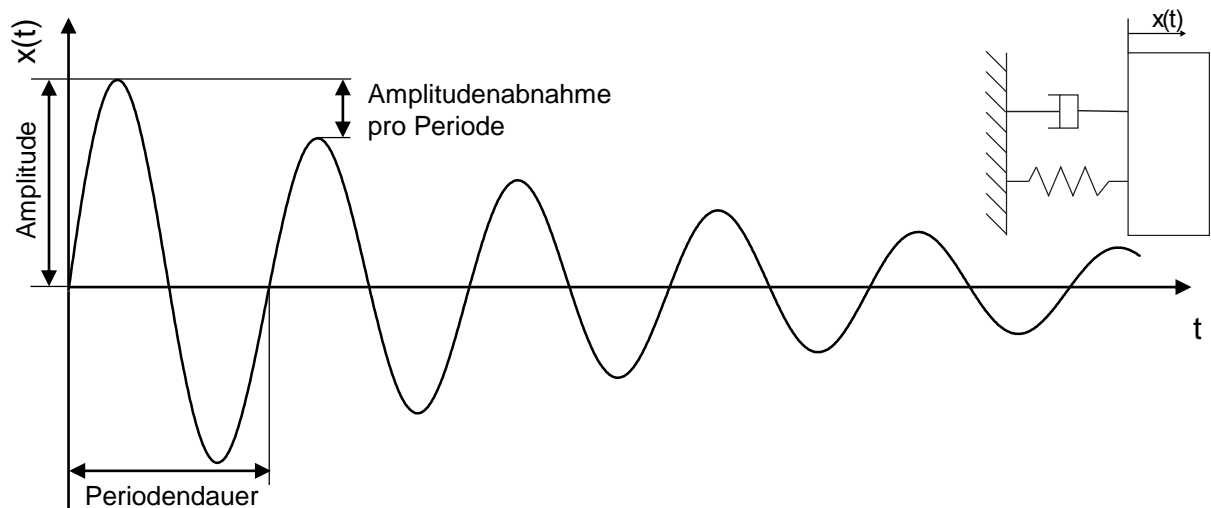


Abbildung 2.14: Signalverlauf einer freien, transienten Schwingung

Aus dem Signal lassen sich wiederum Kennwerte der Schwingung ableiten. Die Frequenz der Schwingung (Gleichung 2.16) ist der Kehrwert der Periodendauer.

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Gleichung 2.16})$$

wobei:

f = Frequenz
 T = Periodendauer

Die Frequenz wird oft als Kreisfrequenz wie in Gleichung 2.17 angegeben mit der die Frequenz auf einen Kreisumlauf normiert wird.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{Gleichung 2.17})$$

wobei:

ω = Kreisfrequenz
 T = Periodendauer

Die Amplitude der gedämpften Schwingung nimmt auf Grund der Dämpfung ab. Mittels der Abnahme der Amplitude innerhalb einer Periodendauer lässt sich das logarithmische Dekrement (Gleichung 2.18) und daraus das Lehr'sche Dämpfungsmaß (Gleichung 2.19) berechnen (Magnus et al., 2016, S. 65).

$$\Lambda = \ln \frac{x(t)}{x(t+nT)} \quad (\text{Gleichung 2.18})$$

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad (\text{Gleichung 2.19})$$

wobei:

- Λ = logarithmisches Dekrement
- $x(t)$ = Amplitude zur Zeit t
- $x(t+nT)$ = Amplitude zu einer Zeit nach n ($\in \mathbb{N}_0$) Perioden
- D = Lehr'sches Dämpfungsmaß

Eine periodische, harmonische Schwingung lässt sich nach Fourier in eine Summe von Sinus- und Cosinusschwingungen zerlegen. Eine Möglichkeit diese Zerlegung mathematisch darzustellen ist in *Gleichung 2.20* dargestellt (Jäger et al., 2016, S. 13).

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (c_1 \cos n\omega t) + (c_2 \sin n\omega t) \quad (\text{Gleichung 2.20})$$

wobei:

- $x(t)$ = Amplitude zur Zeit t
- $c_0, c_1, c_2,$ = Konstanten
- n = Zähkonstante $\in \mathbb{N}_0$
- ω = Kreisfrequenz
- t = Zeit

In Abbildung 2.15 ist dargestellt, wie sich eine periodische Schwingung als Summe von konstantem Teil und Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen grafisch darstellen lässt.

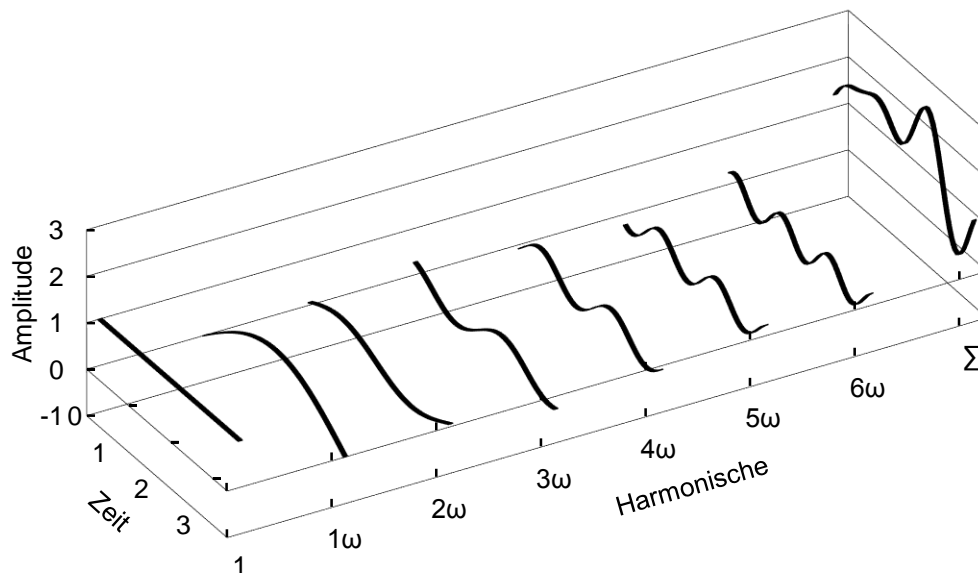


Abbildung 2.15: Zerlegung einer periodischen Schwingung in Harmonische nach DIN 1311-1, S. 9

Ebenso lassen sich nicht-periodische Schwingungen darstellen, indem nur ein Ausschnitt der Schwingung analysiert wird und damit eine Periodizität angenommen wird.

2.3.2 Wellen

Durch Zusammenschaltung mehrerer Einmassenschwinger entsteht ein gekoppeltes Schwingungssystem (siehe Abbildung 2.13), in dem sich die einzelnen Schwinger gegenseitig anregen. Reale Schwingungssysteme sind immer gekoppelte Schwingungssysteme und werden als Kontinuum betrachtet. So besteht zum Beispiel ein Festkörperkristall aus ca. 10^{23} Einzelschwingern (Atomen) pro cm^3 (Demtröder, 2018, S.353). Die räumliche Ausbreitung der gegenseitigen Anregung von vielen verbundenen Einzelschwingern resultiert in einer mechanischen Welle mit der Energie aber keine Masse transportiert wird. Die mathematische Formulierung dieser Welle kann allgemein als partielle Differentialgleichung erfolgen, in der Verschiebungen zeit- und ortsabhängig sind. Für die Longitudinalschwingungen in einem Stab lässt sich die Wellengleichung mit *Gleichung 2.21* angeben.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{Gleichung 2.21})$$

wobei:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \text{partielle Ableitung der Verschiebung nach der Zeit} \\ c &= \text{Schallgeschwindigkeit} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \text{partielle Ableitung der Verschiebung nach dem Ort} \end{aligned}$$

Dabei ist die longitudinale Schallgeschwindigkeit c , wenn sich die Welle in einem Stab bewegt durch Dichte und E-Modul nach *Gleichung 2.22* festgelegt (Demtröder, 2018, S. 360).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Gleichung 2.22})$$

wobei:

$$\begin{aligned} E &= \text{E-Modul} \\ \rho &= \text{Dichte} \end{aligned}$$

Die Geschwindigkeit der Welle kann ebenfalls durch das Produkt von Wellenlänge und Frequenz mit *Gleichung 2.23* errechnet werden.

$$c = \lambda \cdot f \quad (\text{Gleichung 2.23})$$

wobei:

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{Wellenlänge} \\ f &= \text{Frequenz} \end{aligned}$$

Die longitudinalen Eigenfrequenzen eines Stabes lassen sich mit der Resonanzbedingung aus der Länge des Stabes und der Schallgeschwindigkeit des Werkstoffs unter Berücksichtigung der Einspannung des Stabes an seinen Enden errechnen. Die Resonanzbedingung verlangt, dass Eigenschwingungen dann entstehen, wenn eine „fortschreitende Welle nach Reflexion (...) mit gleicher Größe und Phase an ihren Ausgangspunkt zurückkehrt, also wenn diese fortschreitende Welle einen in sich geschlossenen Wellenzug bilden kann“ (Möser, 2010, S.

62). Die Reflektionen von Longitudinalwellen in Stäben finden an freien Enden ideal, also nur mit Umkehrung des Vorzeichens und an eingespannten Enden mit einem Phasensprung von einer halben Wellenlänge statt. Es können also nur Wellen mit Frequenzen die in Stäben mit bestimmten Einspannbedingungen derart „hineinpassen“, dass sie immer wieder passend reflektiert werden und somit eine Eigenschwingung auslösen.

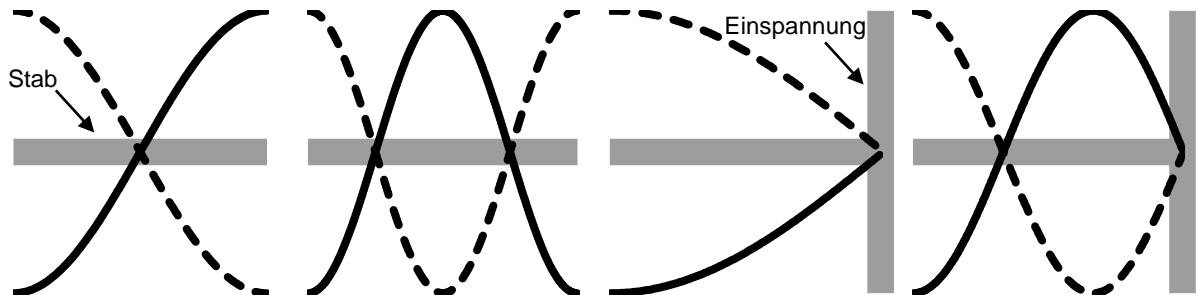


Abbildung 2.16: Wellenreflektionen im Stab und Resonanzbedingung

Daher lassen sich mit *Gleichung 2.24* die Eigenfrequenzen der Harmonischen eines an beiden Enden freien Stabes und mit *Gleichung 2.25* die Eigenfrequenz eines mit einer Seite eingespannten Stabes errechnen (Möser, 2010, S. 58 ff.).

$$f_n = \frac{n}{2l}c \quad (\text{Gleichung 2.24})$$

$$f_n = \frac{(2n-1)}{4l}c \quad (\text{Gleichung 2.25})$$

wobei:

- f_n = n-te Eigenfrequenz
- n = Zählkonstante $\in \mathbb{N}_0$
- l = Länge
- c = Schallgeschwindigkeit

Die Eigenfrequenzen eines Stabes ändern sich mit der Einspannsituation des Stabes.

2.3.3 Messtechnik für Schwingungen und Wellen

Eine Schwingung eines Systempunktes ist die lokale Ausprägung einer Welle. Messtechnische Methoden zur Messung von Schwingungen können daher analog zur Messung von Wellen benutzt werden, wenn mehrere Messorte an einer Struktur einbezogen werden. Durch zeitliche Korrelation der erfassten Schwingungen an den einzelnen Messpunkten können Aussagen über die mechanischen Wellen in der Struktur getroffen werden. Schwingungen können durch die Messung von Strecke, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Strukturpunktes aufgenommen werden. Eine abgewandelte Messung der Strecke ist die Messung der Dehnung. Beim Scherschneiden werden hauptsächlich Beschleunigungen und Dehnungen zur Erfassung von

Schwingungen gemessen. Beschleunigungen können mittels Beschleunigungssensoren erfasst werden. Dehnungen an Strukturen werden wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt üblicherweise mittels DMS aufgenommen. Daher können DMS auch zur Messung von Schwingungen und Wellen eingesetzt werden. DMS eignen sich auch wegen ihrer geringen Masse und wegen ihrer damit verbundenen geringen Rückwirkung auf das schwingende Messobjekt ebenso wie durch ihre feste Verbindung zum Messobjekt besonders zur Messung von dynamischen Vorgängen (Knapp et al., 1998, S. 96). Besondere Bedeutung hat dabei das Dauerfestigkeitsverhalten und die maximale Grenzfrequenz von DMS.

Nach Untersuchungen von *Hoffmann* liegt bei den typischen Folien-DMS bei einer statischen Mitteldehnung von $10 \mu\text{m}/\text{m}$ und einer überlagerten Wechseldehnung von $0,5 \text{ mm}/\text{m}$ bis zu einer Lastspielzahl von ca. 10^6 Dauerfestigkeit vor. Danach kommt es zu Brüchen im DMS-Gitter, die das Messergebnis verfälschen, aber nur langsam zum Totalausfall des DMS führen. (K. Hoffmann, 2015, S. 83)

Die unterste maximale Grenzfrequenz von Folien-DMS liegt bei ca. 50 kHz (Keil, 2017, S. 75). Auch stoßartige Belastungen können durch DMS sehr gut erfasst werden. Dabei muss beachtet werden, dass das Messgitter wesentlich kürzer ist als die Wellenlänge der Stoßwelle. Dies ist bei üblichen technischen Stößen nahezu immer der Fall. (Keil, 2017, S. 80 ff.)

2.4 Grundlagen zu Bruchkräften

Schon *Reuleaux* definierte 1861 die Bruchkraft als „Kraft zum Zerreißen, Zerdrücken, Abscheeren (Anm.d.Verf.: sic), Abwinden, Abbrechen etc.“ (Reuleaux, 1861, S. 2). Vor allem auf Grund katastrophaler Schadensfälle, wie die Explosionen von Dampfkesseln im 19. Jahrhundert, die Serie an durch Bruch untergegangenen Liberty Frachtern in den 40er Jahren sowie die Absturzserie der Flugzeuge vom Typ Comet in der 50er Jahren wurde die Forschung an Ursachen für Bruchphänomene vorangetrieben (Richard und Sander, 2012, S.24; Edel, 2015, S. 15 ff.). Dennoch kommt es auch in neuerer Zeit zu Unfällen durch Bruchschäden wie dem ICE Unglück von Eschede (Richard und Sander, 2012, S. 33). Die grundsätzlichen physikalischen Vorgänge rund um den Bruch werden von der Bruchmechanik behandelt.

2.4.1 Ermittlung von Bruchkräften

In der Fertigungstechnik wird der Bruch hauptsächlich beim Zerteilen nach DIN 8588 gesteuert genutzt, um Bauteile herzustellen. Ebenfalls ein fertigungstechnisches Anwendungsfeld von Bruchphänomenen ist das in DIN 8588 normierte Brechen (DIN 8588, S. 19). Zum Beispiel bei der Herstellung von Pleuelstangen wird das Brechen des Pleuelauges (Cracken) genutzt, um eine passgenaue Fügung von Pleuelstange und Deckel bei der Montage auf die Kurbelwelle zu gewährleisten. Die Rundheitsabweichung nach dem Cracken genannten Brechen des Pleuels liegt bei maximal $15 \mu\text{m}$ (van Basshuysen und Schäfer, 2017, S. 128). Für die bruchmechanische Auslegung sowie für die Auslegung von Fertigungsverfahren zum Zerteilen oder zur

Aufnahme von sonstigen Kennwerten ist es oft notwendig Werkstoffe bzw. Bauteile und deren Brucheigenschaften im Rahmen von Prüfverfahren zu untersuchen. So wird in der Norm für den Zugversuch DIN EN ISO 6892-1 der Bruch definiert als „Zustand, wenn die Probe vollständig geteilt ist“ (DIN EN ISO 6892-1, S. 12). Zur Ermittlung des Bruchzeitpunkts und der Bruchkraft in einem Kraft-Zeit-Diagramm eines Zugversuchs werden zwei Bruchkriterien genannt. Das erste Bruchkriterium gilt, wenn der Betrag der Kraftdifferenz des Messpunktes nach dem Bruch und des Messpunktes beim Bruch über fünfmal so groß ist wie die Kraftdifferenz des Messpunktes vor dem Bruch und des Messpunktes beim Bruch. Das zweite Bruchkriterium gilt, wenn die gemessene Kraft auf einen Wert unter zwei Prozent der Maximalkraft abgefallen ist. Dabei müssen streng nach Norm beide Kriterien gleichzeitig erfüllt sein oder nur eines davon. Dies verdeutlicht Abbildung 2.17. Die Messfrequenz und die Filterung des Signals können dabei Einfluss auf den Bruchzeitpunkt haben.

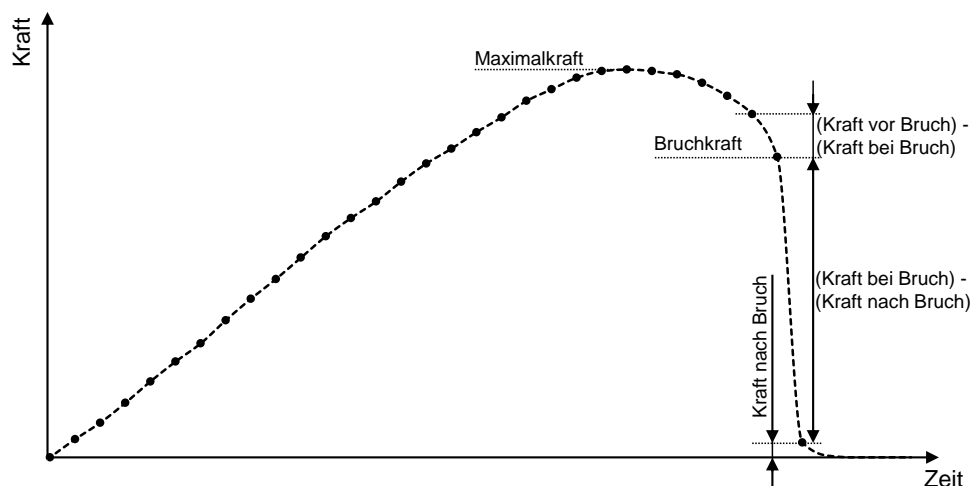


Abbildung 2.17: Bruchkriterien nach DIN EN ISO 6892-1

Ein anderer Ansatz der in der DIN EN ISO 6892-1 vorgeschlagen wird, ist die „Aufzeichnung der elektrischen Spannung oder des elektrischen Stroms, den man durch die Probe fließen lässt. Bei diesem Verfahren sind die Messwerte vor dem plötzlichen Abfall des Stromes als Probenbruch definiert.“ (DIN EN ISO 6892-1, S. 46) Einen ähnlichen Ansatz verfolgten Charoensuk et. al. mit der Aufzeichnung der Spannung durch eine Zugprobe zur Bestimmung der Initiierung der Beschädigung. Bei Beginn des Bruchs nimmt der Querschnitt durch Mikroporen schlagartig ab und die Spannung steigt rapide. Dies zeigt sich in der zweiten Ableitung der Spannung. Damit kann der Bruchzeitpunkt bestimmt werden. (Charoensuk et al., 2017, S. 222) In zahlreichen anderen Normen wird die Erfassung oder die Auswertung einer Bruchkraft von Werkstoffen oder Gütern definiert. In DIN EN ISO 1924-2 wird die Bestimmung der Bruchkraft von Papier und Pappe bei Zugbeanspruchung parallel zur Oberfläche und in DIN ISO 15754 senkrecht zur Oberfläche genormt. Die Bruchkraft wird in diesen Normen der Maximalkraft gleichgesetzt (DIN EN ISO 1924-2, S. 9 f. DIN ISO 15754, S. 9). Ebenfalls wird die Bruchkraft so in DIN ISO 6265 und DIN ISO 7797 bei der Messung der Bruchkraft von Alpinski (DIN ISO 6265,

S. 8) bzw. von Langlaufski (DIN ISO 7797, S. 4) beim Durchbiegen definiert. In DIN EN 14410 wird die Bruchkraft als „Fähigkeit, bei Belastung unter beschriebenen Bedingungen, einem Bruch zu widerstehen“ (DIN EN 14410, S. 5) definiert, ohne exakte Anweisungen zur Auswertung zu geben. In der DIN EN ISO 3379 wird ein Verfahren zur Messung von Narbendehnfähigkeiten und Bruchkräften von Leder normiert. Dabei wird der Weg und die Kraft eines runden Stempels, der eine trommelartig eingespannte Lederprobe mittig belastet und mit $0,2 \text{ mm/s}$ in das Leder eindringt gemessen. Durch einen Beobachter wird der Zeitpunkt des ersten Risses, Narbenplatzens oder Berstens des Leders festgehalten. Die bei diesem Zeitpunkt gemessene Kraft ist die Bruchkraft. (DIN EN ISO 3379, S. 7) Die FAT-Richtlinie 211 „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“ (Böhme et al., 2007) beschreibt ein Verfahren wie Werkstoffkennwerte und Fließkurven bei sehr hohen Dehnraten aufgenommen werden können. Die Kraftmessung bei hohen Dehnraten wird durch die Überlagerung von Schwingungen wegen der schlagartigen Krafteinleitung erschwert. Die Reduktion von Störschwingungen gelingt am besten durch eine Messung mittels DMS auf den elastischen Bereichen der Probe. (Böhme et al., 2007, S. 22) Für die Auswertung der gemessenen Signale in Hinsicht auf Bruchkraft und Bruchzeitpunkt wird allerdings wieder auf die Normen des quasistatischen Zugversuchs rekurriert (Böhme et al., 2007, S. 27). Oftmals wird bei Werkstoffen auch die Schlagenergie zum Brechen einer Probe angegeben. Der dazu verwendete Kerbschlagbiegeversuch nach *Charpy* ist in DIN EN ISO 148-1 genormt. Eine Bruchkraft lässt sich daraus nicht ableiten. *Neugebauer und Fischer* (Neugebauer und Fischer, 2000) untersuchten die Möglichkeiten durch Kraft- und Schallemissionsmessungen Ausbrüche an Schneidkanten von Werkzeugen zu erkennen. Dabei wurden im Umkreis der Schneidkanten mehrere Schallemissionssensoren verbaut. Durch Vergleich und Verrechnung der auf den beim Schneidprozess und Durchbruch entstehenden Körperschall reagierenden Messsignale dieser Sensoren konnten auffällige Bereiche an den Schneidkanten ermittelt und lokalisiert werden. *Haupt* (Haupt, 2003) entwickelte mittels der so genannten Schallemissionsanalyse ein Verfahren zur Risserkennung in Umformprozessen. Körper erzeugen bei plastischer Verformung, Rissausbreitung, Erosion, Korrosion, Stößen, Leckagen transiente, elastische Wellen (DIN EN 1330-9, S. 4). Diese Wellen werden mit piezoelektrischen Wandlern erfasst und die charakteristischen Messgrößen (Amplitude, Frequenzspektrum, etc.) analysiert, um Rückschlüsse auf die Ursache der Signale zu folgern (Schoßig, 2011, S. 22). Mittels dieses Verfahrens konnten bei Umformprozessen zur Herstellung von Kfz-Hinterachsträgern Risse mit einer Mindestlänge von 20 mm im Produktionsprozess detektiert werden (Haupt, 2003, S. 104).

2.4.2 Auswirkungen von Brüchen

Brüche führen zu vollständigen oder teilweisen Schäden in einem Bauteil. Im Rahmen eines Bruchvorgangs führen dynamische Vorgänge nahezu immer zu Schwingungen im Bauteil und in den jeweiligen Bearbeitungsmaschinen. Insbesondere beim Scherschneiden werden diese Schwingungen als Schnittschlag bezeichnet (siehe Kapitel 2.1.3 auf Seite 6). Der Schnittschlag hat hauptsächlich zwei negative Auswirkungen. Erhöhung des Werkzeugverschleißes und akusti-

sche Emissionen. Daher wurden vielfach Anstrengungen unternommen den Schnittschlag oder dessen Auswirkungen zu quantifizieren und zu reduzieren.

Nach *Hoffmann* vergrößert sich die Stempelleintauchtiefe durch dynamische Effekte durch die Schneidimpulse (H. Hoffmann, 1973, S. 73). Schneidimpuls wird in diesem Kontext als ein anderer Begriff für Durchbruchkraft genutzt. Somit wurde das Phänomen der Existenz der Durchbruchkraft schon früh erkannt.

Koss legt in seiner Formel für den ausgesendeten Lärm einer Schneidpresse die "load at fracture", also die Durchbruchkraft als Parameter zu Grunde (Koss, 1981, S. 595). Allerdings wird keine Methode angegeben die Durchbruchkraft zu messen. In folgenden Berechnungen in der Veröffentlichung wird diese "load at fracture" der maximalen Schneidkraft gleichgesetzt.

Hildebrand nennt fünf prinzipielle Methoden zur Verminderung von akustischen Emissionen beim Schneiden: Veränderung des Beanspruchungsverlaufs, elastisches Zwischenmaterial in Trennfugen, schwingungsdämpfende Maßnahmen, Reibungselemente und maschinendynamische Änderungen, wie Massen- oder Eigenfrequenzänderungen an der Presse (Hildebrand, 1970, S. 19). Eine Möglichkeit den Schnittschlag zu reduzieren ist die Anpassung der Schneidparameter (Richards und Stimpson, 1985, S. 60 ff.). So tritt beim Feinschneiden kein Schnittschlag auf (Kasparbauer, 1999, S. 8). Beim Normalschneiden kann der Schnittschlag durch Verringerung oder starke Vergrößerung des Schneidspalts reduziert oder verhindert werden (Hörmann, 2008, S. 93 ff.). Dies kann allerdings wiederum zu veränderten Teilequalitäten und erhöhten Schneidstempelbelastungen führen. Durch kleine Veränderung des Schneidwinkels beim Abschneiden erreichen *Bahrami et al.* wesentliche akustische Verbesserungen beim Abschneiden (Bahrami et al., 1998, S. 57). Durch Einhausungen lassen sich ebenfalls akustische Abstrahlungen hervorgerufen durch Brüche unterbinden (Lai et al., 1999).

Daher wird der Schnittschlag oftmals maschinenseitig durch so genannte Schnittschlagdämpfer gemindert. Eine Ausführung ist durch ein elektronisch geregeltes hydraulisches Dämpfersystem, welches im Prinzip das Oberwerkzeug gegen das Unterwerkzeug abstützt und somit eine schlagartige Entlastung des Werkzeugs und der Presse verhindert, gegeben (Schürr, 1981, S. 72; Murakawa et al., 2001). Andere Dämpfer arbeiten in ähnlicher Weise, aber mit dem Reibungsprinzip (M. Weck et al., 2002, S. 185 ff.) oder mit dem Blech als Dämpfer durch abgestimmte zusätzliche Prägeoperationen in den Stanzabfall (Behrens, Krimm und Hilscher, 2014). Existente sind auch Systeme mit der Dämpfung durch magnetisch-rheologische Dämpfer Ghiotti et al., 2010. Aktive Dämpfersysteme dämpfen die Maschinenschwingung durch piezoelektrische Aktoren (Behrens, Krimm und Hasselbusch, 2017).

Eine andere Möglichkeit akustische Auswirkungen zu minimieren ist die Veränderung der Stempelgeschwindigkeit. So haben *Otsu et al.* (M. Otsu et al., 2003) durch diese Maßnahme Verbesserungen erreicht.

Die Effekte von Bruchphänomenen beim Scherschneiden auf Prozess und System sind Gegenstand intensiver Forschung und noch nicht abschließend erfasst.

2.5 Fazit

Im Rahmen des Stands der Technik wurden die Grundlagen des Scherschneidens, der Kraftmessung beim Scherschneiden und die Grundlagen zu Schwingungen und Wellen sowie zur Messung von Bruchkräften dargelegt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen ist eine Forschungslücke im Bereich der Bruchkräfte beim Scherschneiden feststellbar. Die Höhe der Durchbruchkraft beim Scherschneiden ist bisher nicht bekannt. Es existiert laut Stand der Technik kein Messverfahren zur Bestimmung der Durchbruchkraft beim Scherschneiden. Bruchkräfte werden entweder durch messtechnisch einfach zu erfassende Maximalkräfte abgeschätzt oder durch Schätzverfahren aus Messdaten gewonnen. Die Problematiken, die mit der Verwendung der Maximalkraft bei dynamischen Fragestellungen anstatt der Durchbruchkraft entstehen werden oftmals nicht thematisiert. Die Maximalkraft bestimmt die maximale statische Belastung des Schneidsystems. Die Durchbruchkraft dagegen initiiert den Schnittschlag und bestimmt somit die dynamischen Lasten auf das System. Wenn dieser Unterschied in wissenschaftlichen oder industriellen Untersuchungen und Optimierungen des Schneidprozesses nicht beachtet wird, entstehen wissenschaftlich Fehlannahmen oder fehlerhafte Dimensionierungen von dynamisch belasteten Bauteilen. Da bisher kein Messverfahren existiert, gibt es auch keine systematischen Untersuchungen zu den bestimmenden Faktoren der Durchbruchkraft beim Scherschneiden. Ebenso fehlt es an der Untersuchung der Einflüsse der Durchbruchkraft auf den Scherschneidprozess im Sinne von Verschleißerscheinungen, die durch das dynamische Verhalten des Schneidsystems bestimmt werden. Daraus leitet sich das im nächsten Kapitel erläuterte Ziel dieser Arbeit ab.

3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

3.1 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die messtechnische Erfassung der Durchbruchkraft beim Lochen von metallischen Werkstoffen mittels Scherschneiden sowie die Ermittlung des durch die Durchbruchkraft bestimmten Verhaltens des Schneidsystems. Für eine bessere Strukturierung teilt sich das Ziel der Arbeit daher in drei Teilziele auf.

Erstes Ziel ist die Bestimmung der Durchbruchkraft. Diese ist wie im Stand der Technik erläutert noch niemals erfasst worden. Der Schnittschlag setzt ein, wenn das Blech durchbricht. Unmittelbar vor Durchbruch des Blechs liegt noch eine Kraft am Stempel an. Diese Kraft bestimmt die zur Zeit des Durchbruchs gespeicherte Spannenergie in den direkt am Schneidprozess beteiligten Komponenten. Diese Kraft wird als Durchbruchkraft bezeichnet. Unmittelbar nach Durchbruch übt das Blech nur noch einen geringen Widerstand auf den Stempel aus, und die Komponenten des Schneidprozesses schwingen aus. Während dieses Ausschwingens kann die besagte Reibung zu einer Schädigung des Lochstempels führen. Bekannte Verfahren dämpfen diese Schwingung durch verschiedenste Methoden (siehe Kapitel 2.4.2) ab, um so negative Effekte dieser Schwingung zu minimieren. Dazu ist eine Methode zu entwickeln, mit der diese Kraft messtechnisch präzise erfasst werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll zunächst die Durchbruchkraft beim Lochen mit zylindrischen Stempeln gemessen werden.

Zweites Teilziel bildet die Untersuchung der Bewegung des zylindrischen Schneidstempels und die Abhängigkeiten der Bewegung von konstruktiven Randbedingungen, wie Stempellänge oder Kopfspiel während des Schnittschlags. Dieses Verhalten wird maßgeblich durch die Durchbruchkraft bestimmt. Die Grundlagen dieser Phänomene sind im Stand der Technik dargelegt. Die Ergebnisse sollen experimentell und simulativ erzielt werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit dann zu untersuchende industrielle Anwendungsfall ist die Reduzierung des Mantelflächenverschleißes von Schneidstempeln beim Schnittschlag als drittes Teilziel. Die Hebung der Standzeiten von Lochstempeln ist wie schon erläutert eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Scherschneidens als Massenfertigungsverfahren. Ein Phänomen, welches zu einer Schädigung des Schneidstempels führt, ist dabei die Reibung der Mantelfläche des Schneidstempels am Glattschnitt des Lochs während des Schnittschlags (M. Weck et al., 2002, S. 186). Durch konstruktive Anpassungen des Schneidstempels und seines Einbaus in Stanzwerkzeugen sollen die Bewegungen des Stempels während des Ausschwingens reduziert und damit der Verschleiß gesenkt werden. Diese Untersuchungen können gleichfalls bei entsprechenden Ergebnissen als Validierung des Messkonzepts zur Bestimmung der Durchbruchkraft fungieren.

3.2 Struktur

In Abbildung 3.1 ist die Struktur der Arbeit zur Erreichung der Ziele grafisch dargestellt.

Kapitel 4 Ermittlung der Durchbruchkraft				
Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der Durchbruchkraft				
Messung der Entlastungswelle	Auswertung der Messungen	Anforderungen an den Messaufbau und die Messkette		
Kapitel 5 + 6 Versuchsanlagen und Werkstoffe				
Experimentelle und messtechnische Laborausstattung		Blech- und Werkzeugwerkstoffe		
Kapitel 7 Messtechnik				
Messtechnik zur Bestimmung von			Kalibrierung + Verifikation der Messketten	
Durchbruchkraft	Stempelbewegung			
mittels DMS-Vollbrückenschaltung	mittels DMS-2/4-Brückenschaltung			
Kapitel 8 Versuchsergebnisse und Diskussion				
Schnittflächen kenngrößen	Bestimmung der Prozesskräfte		Erfassung der Stempelbewegung	
	Maximalkraft	Durchbruchkraft	experimentell	simulativ
	Dauerhubversuche zur Verschleißbestimmung inklusive Validierung			
	Diskussion der gewonnen Ergebnisse			
Resultate				
Messverfahren zur präzisen Bestimmung der Durchbruchkraft beim Lochen				
Ermittlung der Durchbruchkraft beim Lochen mit dem entwickelten Messverfahren in Experimenten mit ausgewählten Parametern				
Ermittlung der Stempelbewegung nach Durchbruch beim Lochen mit ausgewählten Parametern				
Minimierung des Mantelflächenverschleißes während des Schnittschlags beim Lochen durch Anpassung des Kopfspiels und daraus resultierende Minimierung der Stempelbewegung				

Abbildung 3.1: Struktur der Arbeit

Die grundlegende Motivation der Arbeit speist sich aus dem Mangel an Erkenntnis in der Literatur über die Kraft, die den Schnittschlag beim Scherschneiden verursacht. Diese Kraft, die Durchbruchkraft, ist notwendig für viele Untersuchungen von Phänomenen beim Scherschneiden, wie Schwingungsverschleiß oder akustischen Optimierungen des Schneidsystems.

Ausgehend vom Stand der Technik wird die Zielsetzung der Arbeit formuliert. Die Ziele teilen sich in drei Teilziele auf. Die Durchbruchkraft ist zu ermitteln. Die Stempelbewegungen sind zu analysieren und deren Einfluss auf den Mantelflächenverschleiß ist festzustellen.

In Kapitel 4 wird das entwickelte Verfahren zur Ermittlung der Durchbruchkraft eingehend beschrieben. Dabei wird auf das grundlegende physikalische Prinzip der Methode die Entlastungswelle zu messen, um die Durchbruchkraft und den -zeitpunkt zu erfassen.

Kapitel 5 und 6 beschreiben die Versuchsanlagen und die Werkstoffe, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung fanden.

In Kapitel 7 wird die Messtechnik zur Ermittlung der Messergebnisse in dieser Arbeit umfassend beschrieben. Eingegangen wird in diesem Kapitel auch auf die Kalibrierung und Verifikation der verwendeten Messtechnik.

In Kapitel 8 werden die drei Versuchsblöcke, korrespondierend zu den drei Teilzielen der Arbeit, behandelt. Es werden die Versuchsplanung vorgestellt und die erzielten Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Die Resultate der Arbeit sind vor allem die Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Durchbruchkraft beim Lochen, die konkrete Anwendung des Messverfahrens an untersuchten Experimentalbauten und die Durchführung einer Anwendung in der durch Analyse des Stempelbewegungsverhaltens nach dem Schnittschlag der Mantelflächenverschleiß an zylindrischen Lochstempeln minimiert werden kann.

4 Ermittlung der Durchbruchkraft beim Lochen

Die im Stand der Technik vorgestellten Verfahren zur Ermittlung von Bruchkräften liefern keine genauen Werte der Bruchkraft, sondern liefern nur Werte auf Grund von semi-empirisch aufgestellten Abschätzregeln oder nutzen oftmals die Maximalkraft während eines Belastungsversuchs als Bruchkraft. Ein spezifisches messtechnisches Standardverfahren zur präzisen Bestimmung von Bruchkräften ist in der Literatur nicht auffindbar. Daher musste im Rahmen dieser Arbeit ein neues Verfahren zur messtechnischen Ermittlung von Bruchkräften entwickelt werden. Die Entwicklung wurde mit dem Ziel Durchbruchkräfte beim Lochen zu ermitteln durchgeführt, kann aber analog auf ähnliche Fälle in denen Bruchkräfte auftreten angewandt werden.

Für ein besseres Verständnis des entwickelten Messverfahrens ist es notwendig, das mechanische Verhalten der am Lochen beteiligten Komponenten getrennt voneinander zu betrachten. Alle Komponenten, die für den Schneidprozess notwendig sind, werden im Folgenden als Schneidsystem bezeichnet. Das Schneidsystem besteht aus Presse, Werkzeug, Schneidstempel und Blech. Die Komponenten des Schneidsystems weisen während des Schneidprozesses ein unterschiedliches mechanisches Verhalten auf.

Dieses mechanische Verhalten der einzelnen Komponenten während der Phasen des Scherschneidens kann an Hand des Kraftsignals eines im Werkzeug über dem Stempel verbauten Piezokraftmessensors, wie in Abbildung 2.4 oben ersichtlich, erläutert werden. Im Stand der Technik wurde nur allgemein auf den Scherschneidprozess eingegangen. Den mechanischen Zustand der hier im Fokus stehenden Systemkomponenten zeigt Abbildung 4.1.

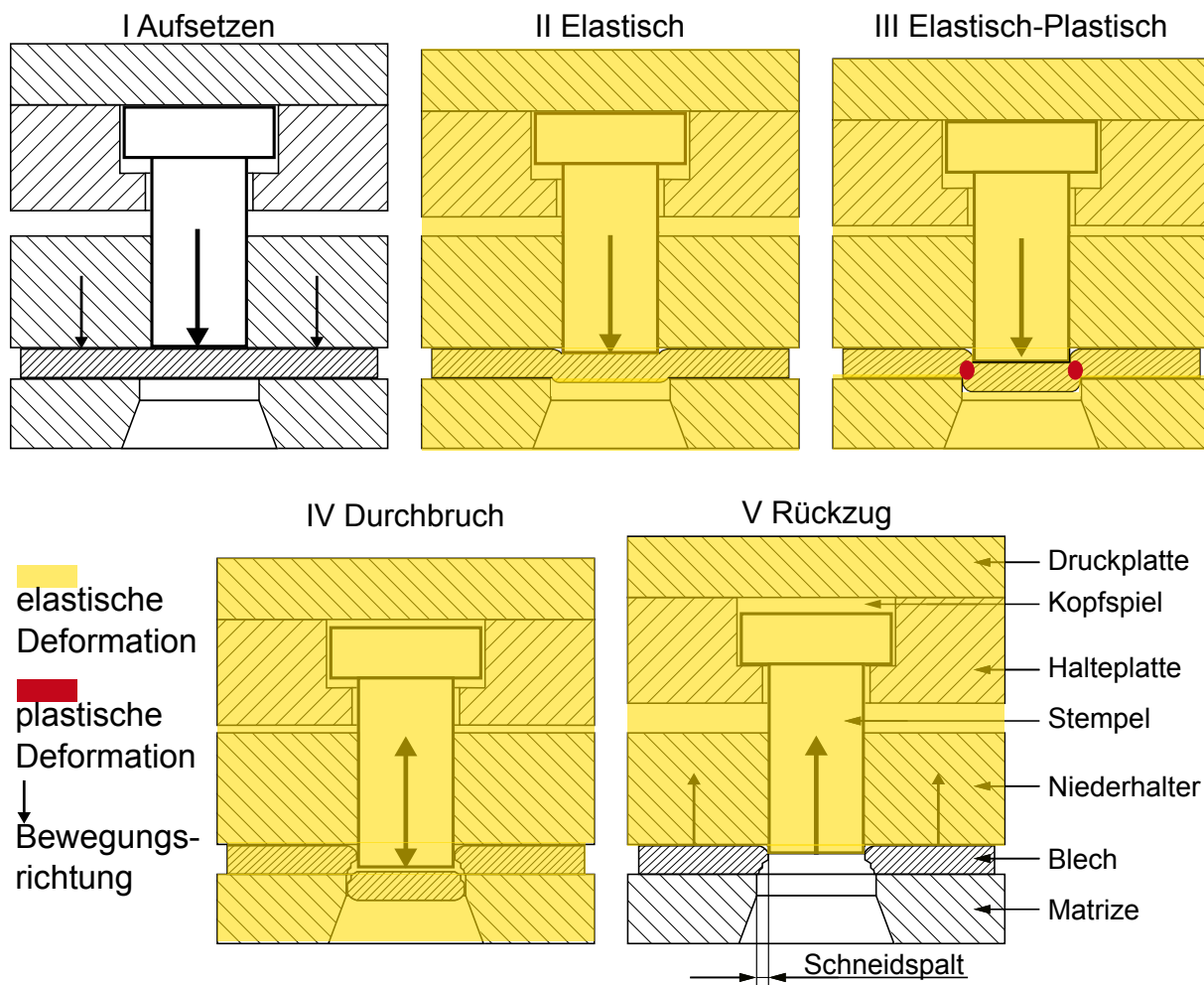


Abbildung 4.1: Phasen und mechanische Zustände des Schneidsystems

Das Aufsetzen des Stempels auf das Blech alleine bewirkt bei einer Konstruktion mit Kopfspiel bei keiner der Komponenten eine signifikante Belastung. Erst wenn die Presse das Werkzeugoberteil weiter nach unten bewegt und der Kopf des Stempels durch die Druckplatte nach unten gedrückt wird, entsteht eine Kraft, die eine elastische Verformung des gesamten Schneidsystems bewirkt. Diese Kraft ist als linearer Anstieg der Kraftkurve erkennbar. Nach Überschreiten der Fließgrenze des Blechwerkstoffs wird das Blech plastisch verformt. Sonstige Komponenten des Schneidsystems bleiben während des gesamten Schneidprozesses im elastischen Verformungsbereich. Der Übergang von der elastischen zur plastischen Verformung ist im Schneidkraftverlauf, wie auch zum Beispiel im Zugversuch, nicht genau zu bestimmen. Das Schneidkraftmaximum ist dann erreicht, wenn die Erhöhung des Schneidwiderstands durch die Kaltverfestigung des Blechs nicht mehr ausreicht die Verminderung des Schneidwiderstands durch die Querschnittsabnahme des Blechs auszugleichen. Das Abfallen der Schneidkraft nach dem Erreichen des Maximums bedeutet also nicht, dass das Blech sofort bricht, sondern ist auf den eben beschriebenen Effekt zurückzuführen.

Der Durchbruch ist in einem Schneidkraft-Zeit-Verlauf an einer Messstelle nicht an einer Änderung des Signalverhaltens erkennbar. Er findet auf der Kurve an einem Punkt zwischen

Schneidkraftmaximum und Nulldurchgang der Schneidkraftkurve statt. Nach Durchbruch wird die im Schneidsystem gespeicherte Verformungsenergie frei. Ausgehend von der Bruchstelle entlastet sich das Schneidsystem und Entlastungswellen breiten sich im Schneidsystem aus. Bei ausreichend hoher Bruchgeschwindigkeit kann der Bruch modellhaft als negativer Dirac-Impuls betrachtet werden, der alle möglichen Entlastungswellen im Schneidsystem anregt. Die Entlastungswellen mit der Wellenlänge, welche die Resonanzbedingung erfüllen, bringen das Schneidsystem mit den entsprechenden Eigenfrequenzen zum Schwingen.

Der Durchbruch ist der Übergang von der quasistatischen Belastung in die dynamische Belastung des Schneidsystems. Lose Teile oder Komponenten des Schneidsystems führen neben der Eigenschwingung auch eine Bewegung im Raum aus. So stößt sich ein mit Kopfspiel eingebauter Schneidstempel von der Druckplatte ab und der Kopf wird zwischen Druck- und Halteplatte hin und her bewegt. Nach Ende des Ausschlagens des Schneidsystems kann es durch den Rückzug des Stempels erneut zu einer elastischen Verformung des Schneidsystems kommen, wenn Reibungskräfte zwischen Stanzgitter und Schneidstempel wirken. Allerdings kann bei hohen Reibungskräften zwischen Blech und Stempel kein starker Schnittschlag entstehen und bei niedrigen Reibungskräften keine hohe Rückzugskraft, da für einen ausgeprägten Schnittschlag das freie Schwingen des Systems notwendig ist, was durch eine zu hohe Reibungskraft zwischen Stanzgitter und Schneidstempel verhindert wird. Für eine hohe Rückzugskraft wiederum ist eine hohe Reibungskraft zwischen Stanzgitter und Blech notwendig.

Der Zeitpunkt des Durchbruchs markiert also den Übergang vom quasistatischen Kraftangriff auf das Schneidsystem in den dynamischen Bereich. Der dynamische Bereich beginnt, wenn sich das Schneidsystem entlastet und Entlastungswellen beginnen durch das Schneidsystem zu laufen. Wie im Stand der Technik erläutert, können solche Wellen in einem Stab mathematisch gut beschrieben werden.

Der Schaft eines Schneidstempels zum Lochen kann in der ersten Entlastungsphase als Stab betrachtet werden, da der Kopf für die Ausbildung der Entlastungswelle zu Beginn keine Relevanz hat. Die Entlastung des Stempels führt zu einer Entlastung in longitudinaler und radialer Richtung. Diese Entlastung breitet sich mit der entsprechenden Schallgeschwindigkeit als Entlastungswelle im Schneidstempel aus. Der Durchbruchzeitpunkt kann also durch die Bestimmung des Entlastungsbeginns bestimmt werden. Die Entlastung führt zu einer Entlastungswelle. Die Messung dieser Entlastungswelle ermöglicht die Ermittlung des Entlastungsbeginns und somit die Ermittlung des Durchbruchzeitpunkts und der zu diesem Zeitpunkt anliegenden Kraft, der Durchbruchkraft. Die Möglichkeiten der Messung von mechanischen Wellen wurden im Stand der Technik erläutert. Mittels zwei in einem durch die Schallgeschwindigkeit und der verfügbaren Messtechnik vorgegeben Mindestabstand zweier Messstellen an einem Stab kann eine Entlastungswelle gemessen werden (K. Hoffmann, 2015, S. 88 ff.). Dies wird in folgender Abbildung 4.2 deutlich. Die Strichdichte verdeutlicht eine Stauchung oder eine Dehnung an der Messstelle.

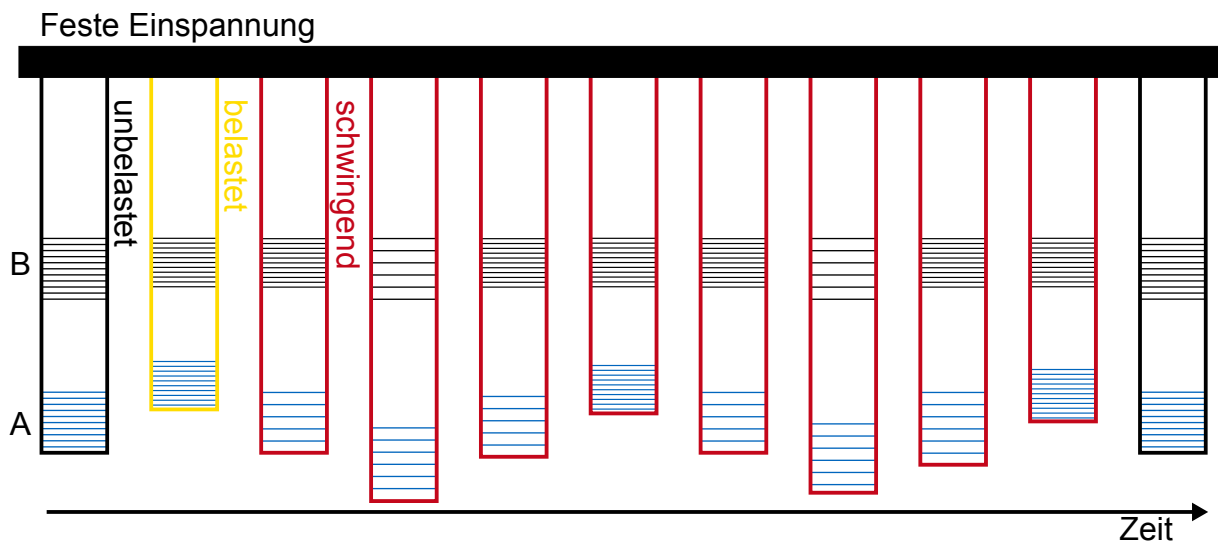


Abbildung 4.2: Dehnungswelle mit qualitativen Dehnungen an zwei Zonen in einem Schneidstempel beim Ausschwingen

Zu sehen sind die Signalverläufe der Messstellen A und B auf einem Stab. Das Signal der jeweiligen Messstelle gibt die lokale Dehnung an der Messstelle an. Messstelle A gibt dabei die lokale Dehnung direkt am Stabende an und Messstelle B die lokale Dehnung des Stabes mit zur Vermeidung von Randeffekten ausreichendem Abstand von der Einspannung. Zur Verdeutlichung ist das Diagramm mit Piktogrammen eines einseitig eingespannten Stabes mit den Messstellen und einer Dehnungsskala zu den jeweils passenden Zuständen versehen. Zunächst ist der Stab mit einer bestimmten Kraft statisch belastet und damit über seine gesamte Länge gleichmäßig gestaucht. Die Kraft nimmt dann stetig ab und verschwindet zu einem bestimmten Zeitpunkt schlagartig. Dies geschieht ähnlich wie oben beschrieben beim Scherschneidprozess.

Sofort nach Wegfall der Kraft beginnt sich der Stab zu entlasten. Messstelle A reagiert auf diese Entlastung mit Verringerung des Dehnungssignals. An Messstelle B hingegen ist die Entlastungswelle noch nicht angekommen. Dementsprechend ist bei Messstelle B noch die quasistatische Kraftabnahme zu sehen. Die schlagartige Kraftwegnahme ist also zu dem Zeitpunkt, zu dem sich das Signal der Messstelle A zum Signal der Messstelle B eine Differenz aufweist. Die genau gleichen Überlegungen gelten auch für den Durchbruch beim Lochschneiden. Wenn zwei analog zum vorherigen Beispiel angebrachte Dehnungsmessstellen an einem Schneidstempel eine Differenz im Signal aufweisen, markiert dieser Zeitpunkt den Zeitpunkt des Durchbruchs. Die Durchbruchkraft ist theoretisch die Kraft, die beide Messstellen zum infinitesimal kleinen vor dem Auftreten der Differenz liegenden Zeitpunkt anzeigen.

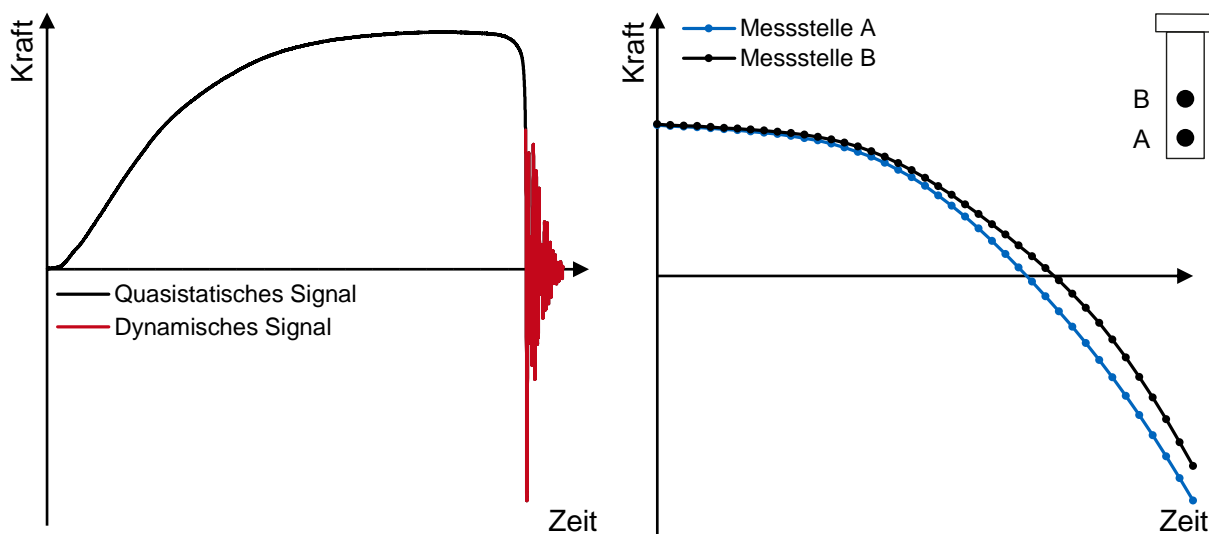


Abbildung 4.3: *Qualitatives Signal-Zeit-Diagramm beim Lochen (links). Qualitative Kraftsignale zweier Messstellen an einem Schneidstempel um den Bruchzeitpunkt (rechts)*

Allerdings finden sich in der Realität Einschränkungen des theoretisch aufgestellten Konzepts. Diese wichtigsten Einschränkungen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: *Modell und Realität beim Messen der Durchbruchkraft*

Theoretisches Modell	Reale Messtechnik	Optimierungsziel
Infinitesimal kleine Dehnungen	Integrierende Dehnungsmessung über Wirkfläche des DMS-Gitters	Kurzes DMS-Messgitter
Messstelle A direkt am Rand des Stabes	Messstelle A auf Grund Installationsanforderungen des DMS und Restriktionen durch den Schneidprozess mit Mindestabstand zur Schneidkante	Messstelle A so nahe wie möglich zur Schneidkante
Kontinuierliches Signal	Diskretes Signal mit begrenztem Auflösungsvermögen	Höchstmögliche Auflösung im Sinne von Signalquantisierung und Messrate

Zunächst sind im theoretischen Modell infinitesimal kleine Dehnungen denkbar. In der Realität wird das Signal des DMS die Dehnungsverteilung unter dem DMS mitteln. Somit zeigt der DMS bei ausreichender Länge des Messgitters beim Durchlaufen einer Welle ein konstantes Signal an. Dies kann durch Minimierung der Messgitterlänge verbessert werden. Im theoretischen Modell kann die Dehnungsänderung zu Beginn der Entlastung direkt an der Kante des Stabes gedacht werden. Dies kann wegen des Eindringens des Schneidstempels in das Blech in der Realität messtechnisch bei einer Messung mit DMS nicht realisiert werden. Ebenfalls benötigt der DMS

eine ausreichende Klebefläche um das Messgitter herum, für die Eliminierung von Randeffekte. Der DMS kann also nur mit einem Mindestabstand zur Schneidkante appliziert werden. Reale Messverstärker liefern quantisierte Messwerte, sowohl in Hinsicht auf das Signal als auch in Hinsicht auf die Zeit. Die Rissausbreitungsgeschwindigkeit bei Brüchen kann über 1000 m/s betragen (Gross und Seelig, 2016, S. 227). Damit kann der Durchbruch eines Blechs beim Scherschneiden mit einer Bruchhöhe von 1 mm von der Rissinitiierung bis zur Werkstofftrennung unter 1 μ s dauern. Dehnwellen in Stäben aus Stahl breiten sich je nach exaktem E-Modul und Dichte mit einer Geschwindigkeit von ca. 5000 m/s aus (Grote und Feldhusen, 2018, S. Z9). Ein Bruchereignis kann also in unter einer μ s entstehen und nach einer weiteren Mikrosekunde ist die folgende Entlastungswelle schon ca. 5 mm vom Bruchort entfernt. Die Messung erfordert also mindestens eine zeitliche Messauflösung nach *Formel 4.1* für eine präzise Bestimmung des Bruchzeitpunkts und damit der Durchbruchkraft.

$$t_{min} \geq \frac{c}{l_{Mess}} \quad (\text{Formel 4.1})$$

wobei:

t_{min}	=	minimale zeitliche Messauflösung
c	=	Schallgeschwindigkeit
l_{Mess}	=	Messabstand

Zur messtechnischen Bestimmung der Durchbruchkraft beim Lochen sind somit folgende drei messtechnische Mindestvoraussetzungen notwendig:

- Eine Kraftmessstelle nahe am Bruchort, um Verfälschungen durch ungerichtete Wellen zu minimieren
- Eine zweite Kraftmessstelle im Kraftfluss als statische Referenz während des Entlastungsbeginns
- Höchstmögliche Messauflösung nach *Formel 4.1* zur Erfassung des Bruchgeschehens und der Entlastungswelle (abhängig von der Entfernung der Messstellen und der Schallgeschwindigkeit im Werkstoff)

5 Versuchsanlagen und Einrichtungen

In diesem Kapitel werden die hauptsächlich in der Arbeit verwendeten Anlagen und Einrichtungen jeweils kurz beschrieben.

5.1 Mechanische Schnellläuferpresse

Die Schneidversuche wurden auf einer mechanischen Schnellläuferpresse BSTA 1250-181 der Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz durchgeführt. Die Presse ist mit einem servomotorischen Bandvorschub BSV 300, Baujahr 2016 der Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz ausgerüstet. Zur Zuführung von Bandmaterial ist eine Haspel mit Bandrichtautomat der Firma Kohler Maschinenbau GmbH, Friesenheim vorhanden. Die Presse zeichnet sich durch hohe Präzision und Steifigkeit aus. Durch einen Massengewichtsausgleich ist eine schwingungsarme, präzise Hubbewegung des Stößels sichergestellt. Die technischen Daten der Bruderer BSTA 1250-181 sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Technische Daten der Bruderer BSTA 1250-181

Nennkraft	1250 kN
Baujahr	2016
Hubverstellung	19 mm-100 mm
Maximalhubzahl	600 Hübe/min

Die Presse wurde weit unterhalb der Nennkraft betrieben, um einen Einfluss der Presse auf die Versuchsergebnisse möglichst gering zu halten und somit eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

5.2 Schneidwerkzeuge

Zur Durchführung der Versuche standen am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TUM (*utg*) zwei Werkzeuge zur Verfügung. Für die Durchführung von Einzelhubversuchen wurde ein nach DIN 9869-2 definiertes einreihiges Einfachlochwerkzeug mit Säulenführung und Niederhalter (Einzelhubwerkzeug) verwendet. Zur Durchführung von Dauerhubversuchen wurde ein nach DIN 9869-2 definiertes Folgeschneidwerkzeug zum Lochen und Abschneiden mit einem dreireihigen Dreifachlochwerkzeug mit Säulenführung und Niederhalter als Lochstufe und einem einreihigen Einfachabschneidwerkzeug ohne Stegabfall mit Säulenführung und Niederhalter als Abschneidstufe (Dauerhubwerkzeug) verwendet. Das Einzelhubwerkzeug ist ausgelegt, um im Einzelhubbetrieb Feinbleche mit variablen Schnittliniengeometrien und Schneidverfahren zu schneiden. Abbildung 5.1 zeigt einen Querschnitt des Einzelhubwerkzeugs.

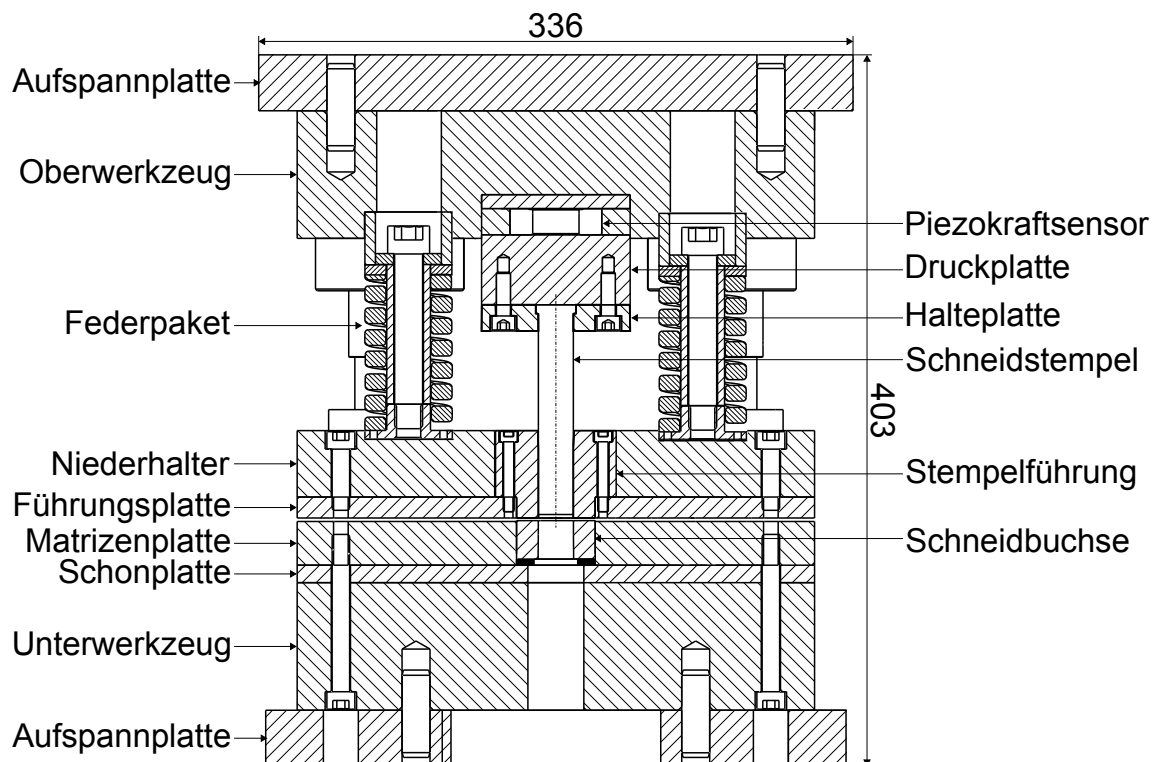


Abbildung 5.1: Querschnitt des Einzelhubwerkzeugs

Das Werkzeug ist überaus steif und präzise gefertigt und kann laut Angaben des Herstellers Toleranzen des Schneidspalts in Höhe von 0,001 mm einhalten. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde das Werkzeug zum Lochen eingesetzt. Die Modulbauweise dieses Werkzeugs ermöglicht es viele Parameter einzustellen. Darunter den Stempeldurchmesser, den Matrizen-durchmesser (Schneidspalt), die Stempel-länge, die Stempelkopfform, das Kopfspiel und die Niederhalterkraft. Das Werkzeug besteht aus einem Ober- und Unterwerkzeug mit Führungsplatte in Mittenbundführung. Die Schneidbuchse, die Stempelführung, der Schneidstempel und die Stempelhalteplatte sind austauschbar. Durch einen im Kraftnebenschluss verbauten Piezokraftmessensor können maximale Schneidkräfte gemessen werden. Der Stempel ist mittels einer Stempelhalteplatte über die Kraftmessdose am Oberwerkzeug verschraubt. Durch Einschleifen der Stempelhalteplatte kann das Kopfspiel des Schneidstempels eingestellt werden. Der Stempel ist durch die Stempelführung geführt, welche in die Stempelführungsplatte eingepasst ist. Die Stempelführungsplatte ist zur Matrizenplatte durch Passstifte, die nach Verschraubung der Platte mit der Führungsplatte bzw. dem Unterwerkzeug gezogen werden zentriert. Die Matrizenbuchsen sind durch Kaltdehnen in die Matrizenplatte eingepasst. Durch diese Konstruktion wird eine hohe Modularität bei hoher Präzision erreicht. Als Werkzeug für die Dauerhubversuche wurde für die effiziente Nutzung des Blechmaterials ein am *utg* vorhandenes mehrspuriges Werkzeug ausgewählt. Abbildung 5.2 zeigt das Dauerhubwerkzeug im Querschnitt.

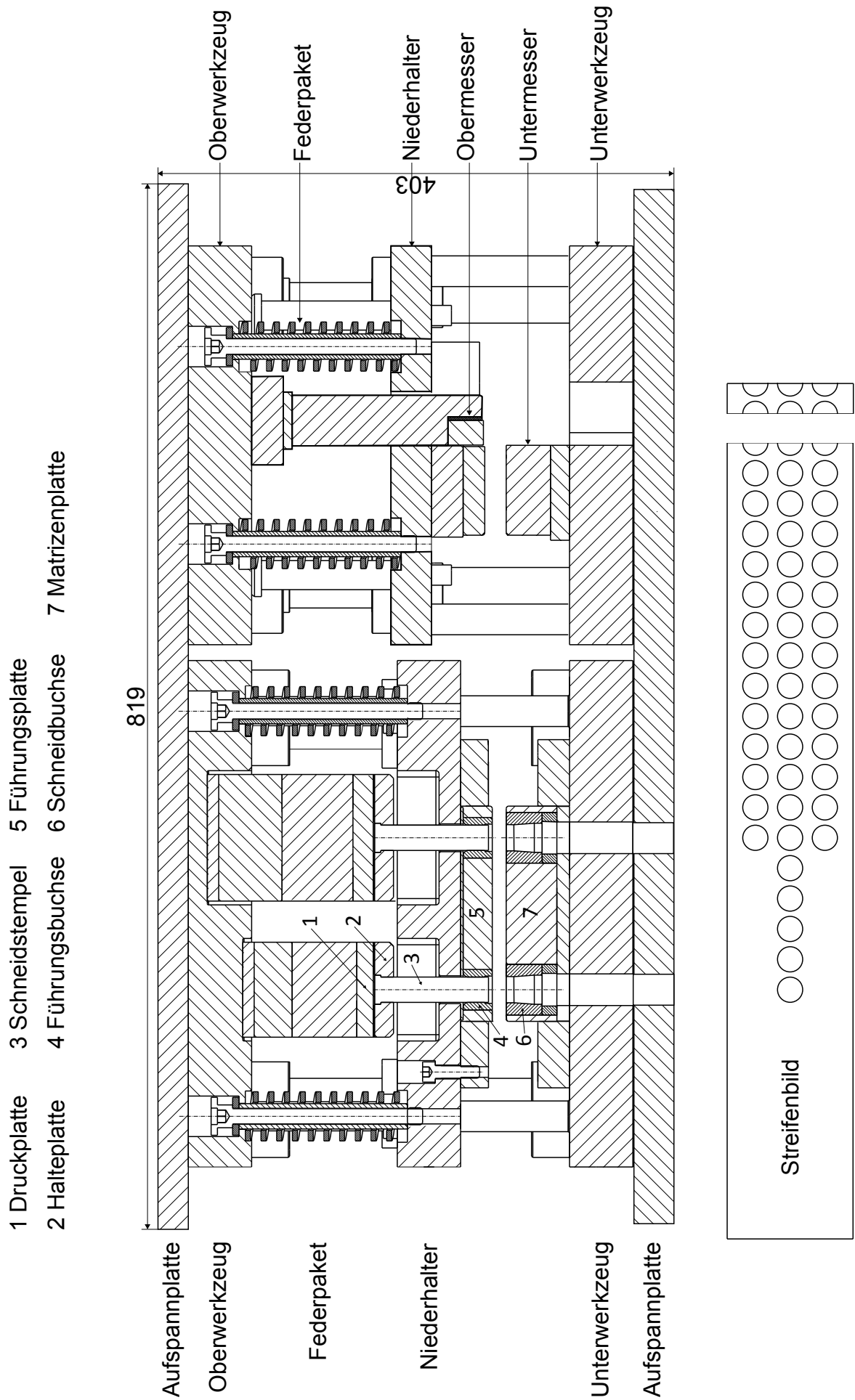


Abbildung 5.2: Querschnitt des Dauerhubwerkzeugs

Das Dauerhubwerkzeug besteht aus zwei Stufen. Die Schneidstufe führt dreispurig Lochoperationen aus und die Abhackstufe hackt den Blechstreifen ab, um einen Dauerhubbetrieb zu ermöglichen. Die Schneidstufe ist aufgeteilt in ein Ober- und Unterwerkzeug mit Führungsplatte. Die Säulen sind in Mittenbundform an der Führungsplatte befestigt. Die Niederhalterkraft wird über Schraubenfedern aufgebracht. Die Stempel sind mittels Stempelhalteplatte über Verbindungsblöcke am Oberwerkzeug befestigt. Eine gehärtete Druckplatte verhindert Stempelerindrücke. Durch Einschleifen der Stempelhalteplatten wird das Kopfspiel eingestellt. Die Stempelführungsplatte ist zur Matrizenplatte durch Passstifte, die nach Verschraubung der Platte mit der Führungsplatte bzw. dem Unterwerkzeug gezogen werden zentriert. Die Matrizenbuchsen sind durch Kaltdehnen in die Matrizenplatte eingepresst. Durch den zum Einzelhubwerkzeug ähnlichen Aufbau wird eine vergleichbare geometrische Präzision erreicht. Die Abhackstufe besteht aus einem Ober- und Unterwerkzeug mit Führungsplatte. Die Führung der Führungsplatte und des Oberwerkzeugs wird durch in das Unterwerkzeug eingepresste Säulen übernommen. Das Obermesser ist durch eine Blockkonstruktion, welche in der Führungsplatte geführt wird am Oberwerkzeug befestigt. Das Untermesser ist am Unterwerkzeug verschraubt. Die Niederhalterkraft wird über einen an der Führungsplatte angeschraubten Niederhalter aufgebracht. Schraubenfedern stellen dabei die Niederhalterkraft zur Verfügung. Beide Stufen sind mittels zweier Aufspannplatten zusammen verschraubt, um ein einfaches Spannen in der Presse zu ermöglichen.

5.3 Schneidstempel

Kreisrunde Schneidstempel lassen sich geometrisch durch drei Parameter charakterisieren: den Durchmesser, die Länge und die Kopfform. Der Durchmesser bestimmt dabei den Durchmesser des Loches, aber auch die Schneidkraft hängt bei gleichem Blechmaterial vom Durchmesser ab. Die Länge des Stempels bestimmt die Eigenfrequenz und die Knicksteifigkeit. Der Kopf befestigt den Stempel im Werkzeug. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei industriell übliche Schneidstempelausführungen verwendet. Eine Ausführung mit zylindrischem Kopf nach DIN ISO 8020 (Zylinder), eine mit kegeligem Kopf nach DIN 9861-1 (Kegel) und eine Ausführung nach DIN 5118 (Posaune). Abbildung 5.3 zeigt die Abmaße der Schneidstempel.

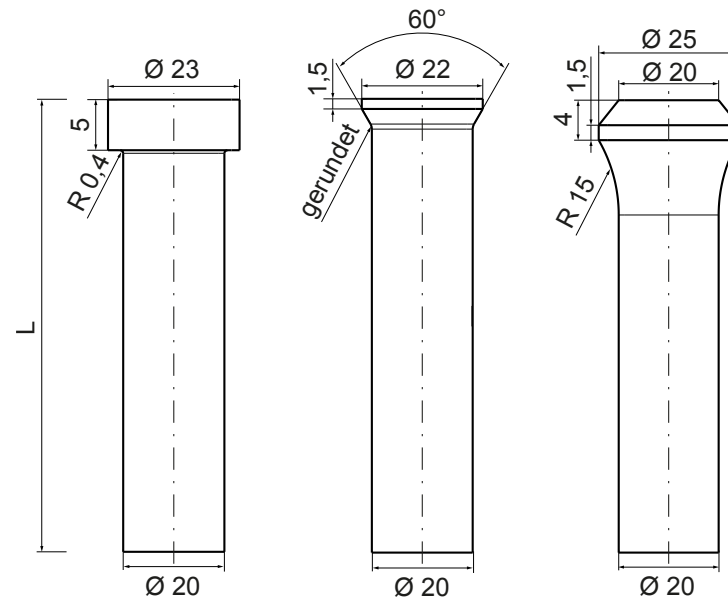


Abbildung 5.3: verwendete Stempelkopfformen: DIN ISO 8020 (links), DIN 9861-1 (mitte), DIN 5118 (rechts)

Sonstige Parameter am Schneidstempel sind Werkstoff, Schneidkantenzustand, Oberflächengüte, Härte etc. Diese Parameter haben vor allem Einfluss auf das Verschleißverhalten des Stempels.

5.4 Digitalmikroskop

Für die mikroskopische Aufnahme von Versuchsteilen wurde ein Digitalmikroskop VHX 2000 der Fa. Keyence Corporation, Osaka, Japan verwendet. Das Mikroskop ist ausgestattet mit einem Zoom-Objektiv VH-Z20R mit einer Vergrößerung von 20x bis 200x und einem verfahrbaren Objektisch VHX-S90F. In Tabelle 5.2 sind die technischen Daten aus dem Datenblatt aufgelistet.

Tabelle 5.2: Technische Daten der Bestandteile des Keyence VHX 2000

Auflösung CCD Sensor	2,11 Megapixel
Farbauflösung	16 Bit
Zoombereich	20x-200x
Tiefenschärfebereich	34 mm-0,44 mm
Auflösung x-y-Objektisch	1 μ m

5.5 3D-Koordinatenmessmaschine

Für die taktile Vermessung von Bauteilen oder Werkzeugen wurde eine 3D-Koordinatenmessmaschine vom Typ LH87 der Firma Wenzel Group GmbH & Co. KG, Wiesthal verwendet. Diese 3D-Koordinatenmessmaschine ist mit schleppüberwachten Servoantrieben ausgestattet und besitzt luftgelagerte Führungen. Die Führungen sind aus Hartgestein für ein besseres Temperaturverhalten. Der Tastkopf ist ein schaltendes und messendes System der

Renishaw plc, Wotton-under-Edge, Großbritannien vom Typ SP25-2. In Tabelle 5.3 finden sich die technischen Daten der 3D-Koordinatenmessmaschine aus dem Datenblatt.

Tabelle 5.3: Technische Daten der Wenzel LH87

Messbereich	800 x 1000 x 700 mm ³
Messunsicherheit	1,5 μm + L/450 mm
Maximale Tischbelastung	800 kg

5.6 Universalprüfmaschine

Die Versuche zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte der Blechwerkstoffe und die Kalibrierung der im Schneidwerkzeug integrierten Kraftmessdose wurden durchgeführt auf einer Universalprüfmaschine Typ 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm. Technische Daten aus dem Datenblatt dazu finden sich in Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Technische Daten der Zwick Typ 1484/DUPS-M

Maximalkraft	200 kN
maximale Traversengeschwindigkeit	200 mm/min
Prüfklasse	1 und besser

5.7 Profilmessgerät

Für die Vermessung von Schnittflächen und von Schneidkantenradien wurde ein Tastschnittgerät vom Typ MarSurf XCR 20 der Firma Mahr GmbH, Göttingen verwendet. Die technischen Daten aus dem Datenblatt finden sich in Tabelle 5.5.

Tabelle 5.5: Technische Daten des Mahr MarSurf XCR20

Messweg	1 mm – 200 mm
Messunsicherheit	(2 + L/50) μm
Positioniergenauigkeit	1 μm
Auflösung	x-Richtung: 1 μm z-Richtung: 0,38 μm

6 Werkstoffe

Die in der Arbeit verwendeten Blech- und Werkzeugwerkstoffe werden im Folgenden angeführt.

6.1 Blechwerkstoffe

Es wurden im Rahmen der Untersuchungen drei Blechwerkstoffe untersucht. Es handelt sich um den Dualphasenstahl HCT780XD bzw. HC450XD und der Werkstoffnummer 1.0943, den nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301 und den Mangan-Bor-Stahl 22MnB5 mit der Werkstoffnummer 1.5528 in pressgehärtetem Zustand. Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur die Werkstoffnummer zur Bezeichnung genutzt. Alle Werkstoffe hatten eine Blechdicke von $s = 2,0$ mm. Tabelle 6.1 zeigt die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe nach den Normen DIN EN 10346 für 1.0943, DIN EN 10088-3 für 1.4301 und dem Datenblatt der Firma voestalpine (voestalpine Steel Division, 2019) für 1.5528.

Tabelle 6.1: Chemische Zusammensetzung der Blechwerkstoffe (Massenanteile in %)

Nr.	C	Si	Mn	P	S	Al
1.0943	$\leq 0,18$	$\leq 0,80$	$\leq 2,50$	$\leq 0,08$	$\leq 0,015$	0,015-2,0
1.4301	$\leq 0,07$	$\leq 1,00$	$\leq 2,00$	$\leq 0,045$	$\leq 0,030$	-
1.5528	0,20-0,25	$\leq 0,50$	$\leq 2,00$	$\leq 0,02$	$\leq 0,005$	0,02-0,10

Nr.	Cr	Cr+Mo	Ni	Ti+Nb	V	B
1.0943	-	$\leq 1,40$	-	$\leq 0,15$	$\leq 0,20$	$\leq 0,005$
1.4301	17,50–19,50	-	8,00–10,50	-	-	-
1.5528	$\leq 0,50$	-	-	$\leq 0,05$	-	0,002–0,005

In Abbildung 6.1 sind die Gefüge der drei Blechwerkstoffe dargestellt. Die Gefüge der niedriglegierten Stahlwerkstoffe 1.0943 und 1.5528 wurden durch metallographische Behandlung und Ätzung mit Nital (3 % Salpetersäure, Rest Ethanol) sichtbar gemacht. Das Gefüge des 1.4301 wurde durch die Farbätzung LBI nach Lichtenegger und Bloech (Leistner und E. Weck, 1983, S. 50 ff.) geätzt.

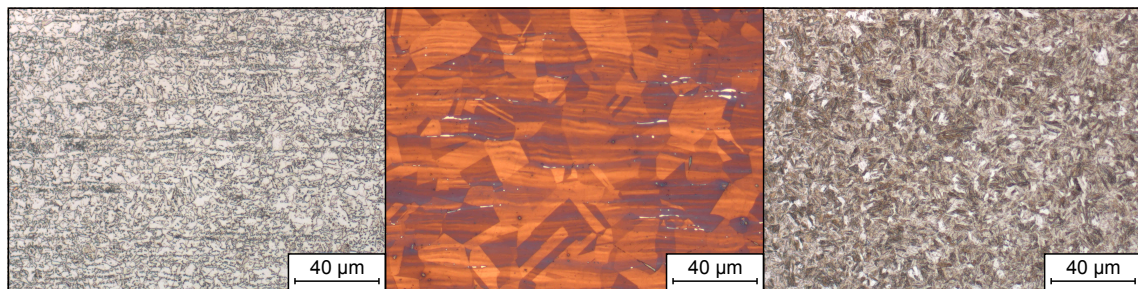


Abbildung 6.1: Gefügeaufnahmen nach Ätzung von 1.0934 (links), 1.4301 (mitte) und 1.5528 (rechts)

1.0943 zeigt in ferritischem Grundgefüge ca. 20 % Martensitinseln (Weißbach et al., 2015, S. 166). Das Gefüge des Dualphasenstahls entsteht durch eine besondere Glühung bei Raumtemperatur aus dem üblichen ferritisch-perlitischen Gefüge. Wenn die Martensitinseln mehr als 30 % einnehmen, bilden sich größere Martensitgebiete und die Verformbarkeit wird verringert (Roos et al., 2017, S. 208). 1.4301 hat durch die den Austenit stabilisierende Wirkung von Chrom und Nickel ein austenitisches Gefüge (Roos et al., 2017, S. 161). Im Gefüge können bis zu 10 % δ -Ferrit vorhanden sein (Bargel und Schulze, 2018, S. 271). 1.5528 hat durch die Zulegierung kleinster Mengen an Bor stark erniedrigte kritische Abkühlgeschwindigkeiten. Daher bildet sich bei Kontakt einer bei über 950 °C austenitisierten Platine bei mehrsekündigem Kontakt mit gekühltem Umformwerkzeug durch die Abkühlung ein martensitisches Gefüge aus (Weißbach et al., 2015, S. 237). Zur Aufnahme von mechanischen Kennwerten wurden Zugversuche durchgeführt. Diese wurden nach DIN EN ISO 6892-1 bei einer Geschwindigkeit von $0,0067 \text{ s}^{-1}$ durchgeführt. Die Dehnungen wurden durch ein an der Universalprüfmaschine angebrachtem taktilen Messsystem gemessen. Die Probengröße nach DIN 50125 betrug bei der Aufnahme der Kennwerte des 1.0943 84 mm x 10 mm (E2x6x20). Bei der Aufnahme der Kennwerte des 1.4301 und des 1.5528 250 mm x 30 mm (H20x80). Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus den Zugversuchen der 0°-Lage finden sich in Abbildung 6.2.

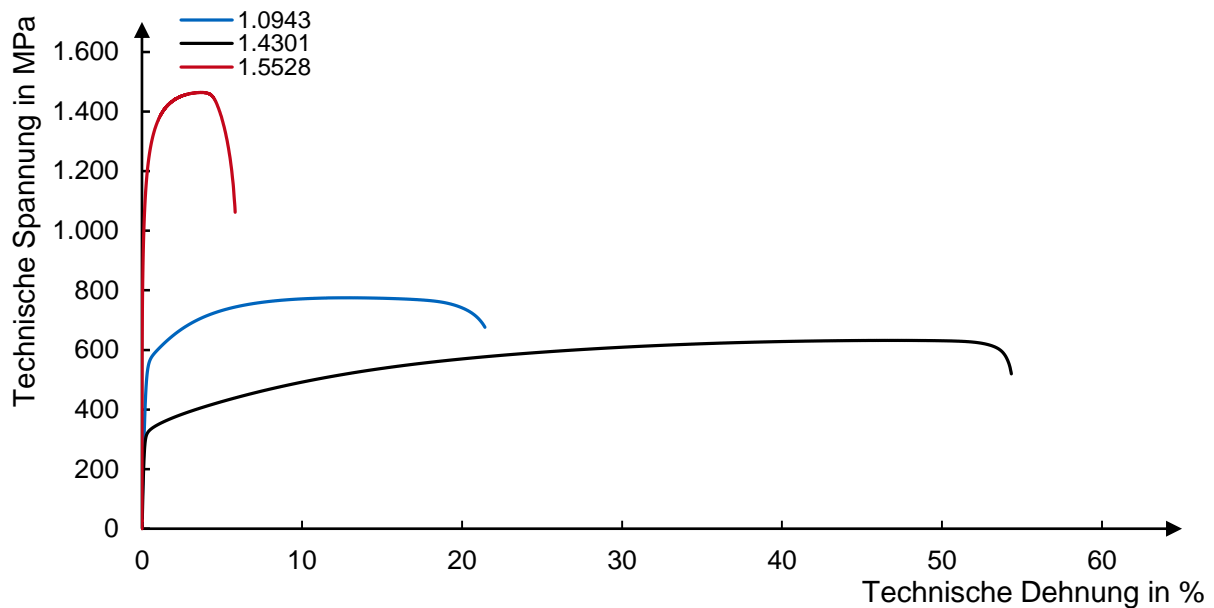


Abbildung 6.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der untersuchten Werkstoffe

Die durch die Zugversuche ermittelten mechanischen Kennwerte des Werkstoffs 1.0943 finden sich in Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2: Mechanische Kennwerte des 1.0943

Blechlage in °	$R_{p0,2}$ in MPa	R_m in MPa	$R_{p0,2}/R_m$ in %	A_g in %	A_{80} in %
0°	540 ± 34	776 ± 2	72	13 ± 2	21 ± 3
45°	540 ± 34	776 ± 1	70	12 ± 1	19 ± 2
90°	502 ± 37	787 ± 3	64	13 ± 1	19 ± 1

Dualphasenstähle besitzen einen gegenüber ferritisch-perlitischem Stahl erheblich erhöhten Verfestigungskoeffizienten, da die harte Martensitphase bei plastischer Verformung durch die Ferritphase umflossen werden muss. Somit besitzen diese Stähle nach Umformung eine stark erhöhte Festigkeit bei gleichzeitig hoher Gleichmaßdehnung. (Hornbogen und Warlimont, 2015, S. 153) Die mechanischen Kennwerte des Werkstoffs 1.4301 finden sich in Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Mechanische Kennwerte des 1.4301

Blechlage in °	$R_{p0,2}$ in MPa	R_m in MPa	$R_{p0,2}/R_m$ in %	A_g in %	A_{80} in %
0°	312 ± 11	634 ± 4	49	47 ± 1	54 ± 1
45°	307 ± 1	609 ± 2	50	48 ± 1	54 ± 2
90°	314 ± 8	622 ± 2	50	47 ± 1	53 ± 1

Austenitische Chrom-Nickel-Stähle haben durch ihr kubisch-flächenzentriertes Gitter eine extreme Verformbarkeit. Bei plastischer Verformung sind diese Stähle durch den entstehenden Verformungsmartensit stark kaltverfestigend. So kommt es zu der Kombination von hohen Umformgraden und hoher Zugfestigkeit. (Bargel und Schulze, 2018, S. 266 ff.) Die mechanischen Kennwerte des Werkstoffs 1.5528 sind in Tabelle 6.4 zu finden. Der Werkstoff 1.5528 liegt in pressgehärteter Form vor. Daher ist eine Walzrichtung nach Lösungsglühen nicht mehr vorhanden und die Proben können aus einer beliebigen Richtung entnommen werden.

Tabelle 6.4: Mechanische Kennwerte des 1.5528

R_{p0,2} in MPa	R_m in MPa	R_{p0,2}/R_m in %	A_g in %	A₈₀ in %
1108 ± 15	1463 ± 2	75	3,47 ± 1	5,5 ± 1

1.5528 hat durch seine martensitische Struktur eine sehr hohe Festigkeit, aber auch eine extrem reduzierte Zähigkeit (Rösler et al., 2012, S. 226). Dies ist auch aus den aufgenommenen Kennwerten ersichtlich.

6.2 Werkzeugwerkstoffe

Für die Einzelhubversuche wurden Normalien der Fa. Fibro GmbH, Hassmersheim verwendet. Der Werkstoff für die Einzelhubversuche war ein 1.3343. Tabelle 6.6 listet die chemische Zusammensetzung des verwendeten 1.3343 nach DIN EN ISO 4957 auf.

Folgende Tabelle 6.5 beinhaltet die wesentlichen physikalischen Eigenschaften des 1.3343. Dabei sind die Dichte und der E-Modul aus dem Werkstoffdatenblatt (HSM Stahl- und Metallhandel GmbH, 2019) entnommen und die Schallgeschwindigkeit nach Gleichung *Gleichung 2.22* errechnet.

Tabelle 6.5: Physikalische Eigenschaften des 1.3343

E-Modul in GPa	Dichte in kg/dm³	Schallgeschwindigkeit (longitudinal) in m/s
224	8,12	5252

Die Schneidstempel waren am Schaft mit 64±2 HRC und am Kopf mit 52±2 HRC gehärtet. Durch den weichen Kopf ist es möglich die Gefahr von Kopfbrüchen zu reduzieren. Als Aktivelementwerkstoff für die Schneidstempel wurde für die Verschleißuntersuchungen ein Kaltarbeitsstahl mit der Werkstoffnummer 1.2379 verwendet. Tabelle 6.6 zeigt die chemische Zusammensetzung des Kaltarbeitsstahls.

Tabelle 6.6: Chemische Zusammensetzung des 1.3343 und des 1.2379 (Massenanteile in %)

Nr.	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
1.3343	0,86-0,94	≤ 0,45	≤ 0,40	3,80-4,50	4,70-5,20	1,70-2,10	5,90-6,70
1.2379	1,45-1,60	0,10-0,60	0,20-0,60	11,00- 13,00	0,70-1,00	0,70-1,00	-

Die Schneidstempel wurden entgegen der in der Norm DIN EN ISO 4957 festgelegten Mindesthärte von 61 HRC lediglich auf 50 HRC gehärtet, um einen schnelleren Verschleißfortschritt erzeugen zu können. Mit geringerer Härte sinkt auch die Druckbelastbarkeit ab. Bei 50 HRC ergibt sich nach Uddeholm Datenblatt [UDD16] eine Druckbelastbarkeit von ca. 1650 MPa. Beim Schneiden eines 1.0943 mit einer Schneidkraft von 80 kN, einer beeinflussten Randzone von 1 mm und einer Sicherheit von 1,2 ergibt sich eine Druckbeanspruchung von ca. 1600 MPa auf den Schneidstempel. Diese liegt knapp unter der maximalen Druckbelastbarkeit des 1.2379 bei 50 HRC. Daher wurde diese minimal mögliche Härte gewählt. Die Gefüge der Werkzeugwerkstoffe sind in Abbildung 6.3 zu sehen.

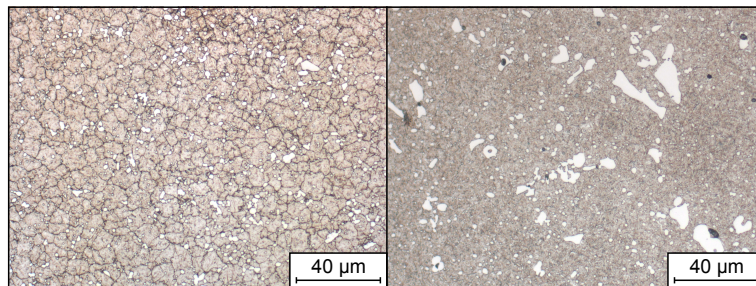


Abbildung 6.3: Gefügaufnahmen nach Ätzung von 1.3343 (links) und 1.2379 (rechts)

7 Messtechnik

Die in der Arbeit verwendete Messtechnik und deren Kalibrierung ist Inhalt dieses Kapitels.

7.1 Bestandteile und Aufbau

Die für diese Arbeit verwendete Messtechnik für die Messung der Durchbruchkraft bestand in Hinsicht auf die Sensorik aus einem Piezokraftsensor der Firma Kistler mit der Typenbezeichnung 9061A und einer DMS Vollbrückenschaltung aus DMS-Ketten, wovon jeweils zwei in Längs- und Querrichtung zur Stempelachse angebracht waren. Es wurden DMS-Ketten der Typen 1-KY11-2/120 und 1-KY21-2/120, bereitgestellt von der Firma HBM, verwendet. DMS-Ketten wurden gewählt, um einen definierten Abstand zwischen den DMS zu gewährleisten. Die Vollbrückenschaltung wurde gewählt, weil diese unempfindlich gegen Temperatureinflüsse ist, einen besseren Signal-Rausch-Abstand als eine Brücke mit weniger aktiven DMS aufweist und eine höhere Empfindlichkeit als andere Brückenschaltungen besitzt. Siehe dazu Kapitel 2.2.2.

Die messtechnische Umsetzung der Ermittlung der Longitudinalschwingung eines Schneidstempels wurde schon in *Mair* (Mair, 2016) behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein ähnliches Messkonzept verwendet. Diese bestand ebenfalls aus dem erwähnten Piezokraftsensor und einer DMS $2/4$ -Brückenschaltung in der zwei DMS des Typs LY41-3/350 von HBM in longitudinaler Stempelrichtung angebracht waren.

Um den Einfluss der Werkstoffdämpfung und von Störwellen deren Ausbreitungsrichtung nicht in den Hauptdehnungsrichtungen der DMS liegen gering zu halten, mussten die DMS Vollbrücken zur Ermittlung der Durchbruchkraft in Schneidkantennähe appliziert werden. Zur Ermöglichung dieser Anforderung wurde eine mit Aussparungen versehene Führung des Stempels verwendet. Die erste Vollbrückenschaltung wurde so nahe wie möglich an die Schneidkante appliziert, wobei die Stempleintauchtiefe und die Anforderungen an das Klebebett des DMS berücksichtigt werden mussten. Damit ergab sich ein Abstand vom Mittelpunkt des Messgitters des ersten DMS zur Schneidkante von 19 mm. Der notwendige zweite Messpunkt ergab sich dann durch die Länge der DMS-Kette und lag 8 mm höher als der erste Messpunkt. Der Abstand war unter Berücksichtigung der Messauflösung von $1 \text{ S}/\mu\text{s}$ größer als die mindestens notwendigen 5,850 mm, die sich bei einer longitudinalen Schallgeschwindigkeit von $5,850 \text{ mm}/\mu\text{s}$ im Stempel ergeben siehe (*Formel 4.1*).

Die DMS zur Ermittlung des longitudinalen Schwingverhaltens waren in Höhe von 30 mm unter der Oberkante des Stempelkopfes angebracht. Dies war die minimal mögliche Entfernung wegen Restriktionen durch Applikationsanforderungen und der Dicke der Stempelhalteplatte. Abbildung 7.1 zeigt die Position der DMS im verwendeten Werkzeug und die Form der Aussparungen der Stempelführung zur Ermöglichung der DMS Applikation nahe zur Schneidkante.

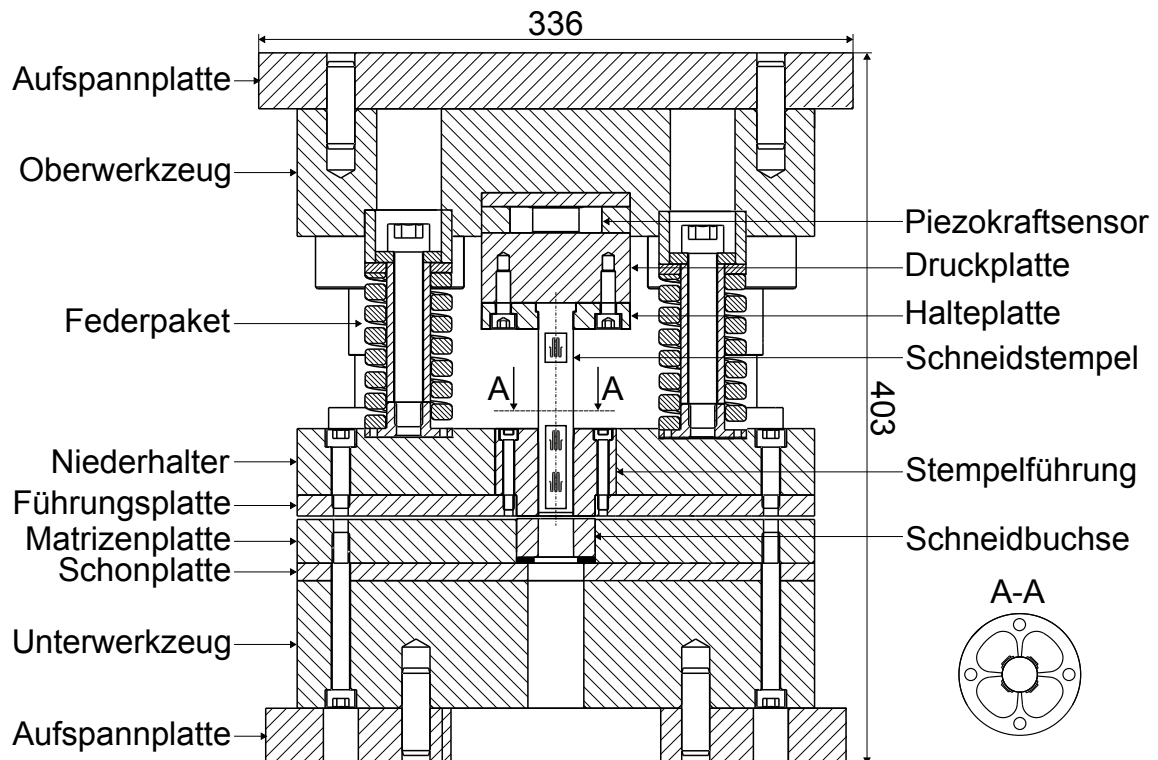


Abbildung 7.1: Werkzeug mit Positionen der DMS-Brücken und Aussparung in der Führung

Die Applikation der DMS auf den Schneidstempel wurde mittels des heiß aushärtenden Epoxidharzklebstoffs EP 310S der Firma HBM durchgeführt. Der Kleber wurde ausgewählt, da die Einsatztemperatur des Klebers über der Aushärtetemperatur liegt und deswegen mehrere DMS mit mehreren Aushärtevorgängen auf den Schneidstempel appliziert werden konnten. Ebenfalls erlaubt dieser Kleber eine präzisere Applikation der großen DMS-Ketten, da er Korrekturen zulässt und erst bei Wärmezufuhr aushärtet. Der Kleber lässt auch eine sehr dünne Klebeschicht zu und verringert damit den Einfluss der Klebeschicht auf die Dynamik der Messung etwa durch Dämpfungseffekte. Bei der Applikation wurde nach Anleitung des Klebers vorgegangen. Der notwendige Druck auf den DMS während des Aushärteprozesses wurde durch eine Schraubklemmenkonstruktion mit Spiralfedern hergestellt. Die Aushärtung erfolgte in einem Trockenschrank der Fa. Heraeus bei einer Temperatur von 190 °C. Die Temperatur wurde dabei durch ein direkt am Stempel befestigtes Thermoelement kontrolliert. Für gesteigerte Präzision wurden die DMS nachgehärtet. Nach Aushärtung wurde ein Abdeckmittel PU 140 aus Polyurethanlack der Firma HBM aufgebracht, um Alterungen durch hygroskopisches Potential des Klebers zu verhindern. Die DMS zur Messung der longitudinalen Schwingungen wurden mit dem Schnellkleber aus Cyanacrylat mit dem Handelsnamen Z70 der Fa. HBM aufgeklebt, da diese wesentlich kleiner sind als die DMS-Ketten und der Kleber daher durch Daumendruck aushärtbar ist.

Zur Integration der DMS in eine Messkette mussten diese verkabelt werden. Da eine direkte Verlötlung der vernickelten Anschlussbändchen der DMS-Ketten eine mangelnde dynamische Festigkeit während des Schnittschlags aufwies, wurde ein robusteres System entwickelt. Die Anschlussbändchen wurden an Pico-SPOXTM-Leiterplattenstiftleisten angelötet. Die verlöteten

Leisten wurden anschließend mit dem DMS in die Abdeckmasse SG 250 von HBM eingegossen, um eine ausreichende Stabilität während des Schneidprozesses zu gewährleisten. Ebenfalls musste der mit DMS und Verkabelung versehene Stempel im Werkzeug montiert werden können. Dazu wurde eine Montagehilfe konstruiert, die eine einfache Montage des verkabelten Stempels ermöglichte. Die auf der Montagehilfe für eine Vollbrückenschaltung verschalteten Kabel waren mit Pico-SPOXTM-Stecker versehen und wurden in die Leiterplattenstiftleisten der DMS-Ketten am Stempel eingesteckt. Auf der Montagehilfe befanden sich Stecker, die einen Signalfluss zum Messverstärker und die Spannungsversorgung der Brückenschaltungen ermöglichte. Abbildung 7.2 zeigt die Montagehilfe mit Stempel und Stempelhalteplatte.

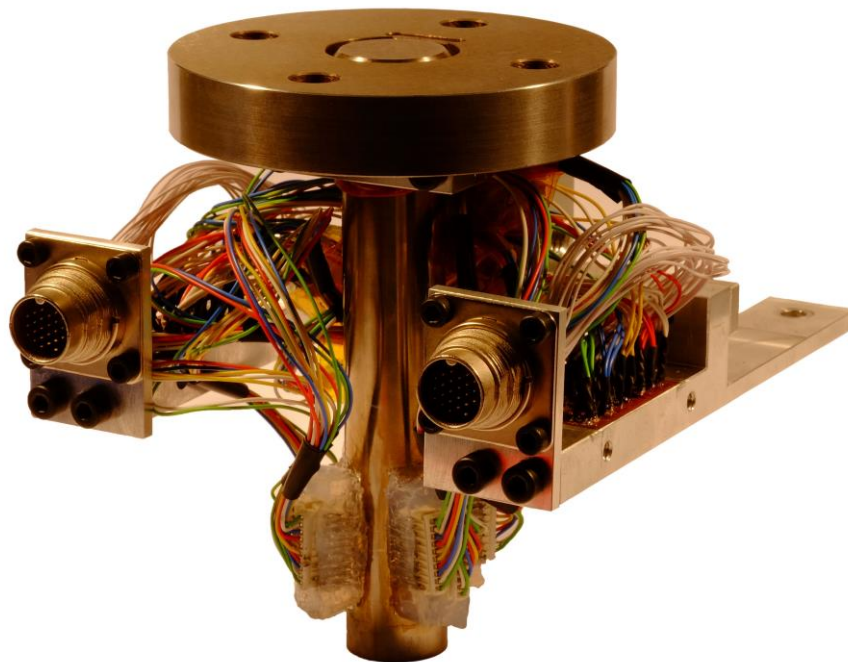


Abbildung 7.2: Montagehilfe für die Montage des Stempels mit Vollbrückenschaltungen

Für die Montage der Stempel für die Erfassung der Longitudinalschwingungen war keine Montagehilfe notwendig, da die Zugänglichkeit am Kopf wesentlich besser und die Verkabelung der $2/4$ -Brücke weniger aufwändig war. In Abbildung 7.3 sind die Piktogramme zu sehen, mit denen im Folgenden die einzelnen Messergebnisse nach verwendetem Messverfahren unterschieden werden können. Die Elemente können dabei auch in Kombination auftreten.

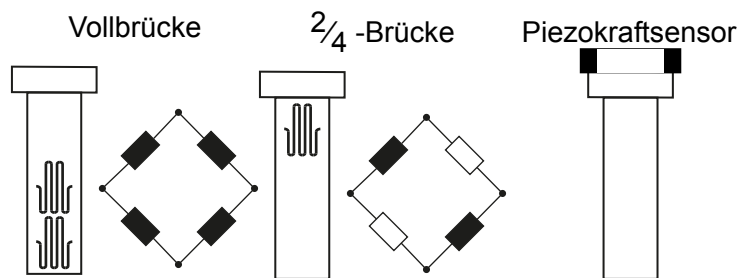


Abbildung 7.3: Piktogramme für Kennzeichnung des verwendeten Messkonzepts

Zur Erfassung der Signale aus den verwendeten Sensoren ist eine Messkette notwendig. Die schematische Darstellung der verwendeten Bestandteile und deren Vernetzung ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Zur Umwandlung des Ladungssignals aus dem Piezokraftsensor wurde ein Ladungsverstärker der Firma Kistler vom Typ 5015A verwendet. Zur Speisung der Brückenschaltungen und Aufnahme der Brückenausgangsspannung wurde ein GEN7t Messverstärker der Fa. HBM verwendet. Dieser war mit einer Messkarte zur Spannungsmessung (GN815) und einer Messkarte zur Speisung und Messung von Signalen von DMS-Schaltungen (GN411) ausgestattet. Die Messkarten weisen eine Messauflösung von 16 Bit und eine Messrate von 1 MS/s auf. Das Spannungssignal des Ladungsverstärkers wurde ebenfalls durch den Messverstärker aufgenommen. Die Ansteuerung des Messverstärkers und die Auswertung der Messdaten erfolgten durch einen angeschlossenen PC. Bei der Verkabelung der einzelnen Komponenten wurden, um die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) zu erhöhen, geschirmte Kabel verwendet.

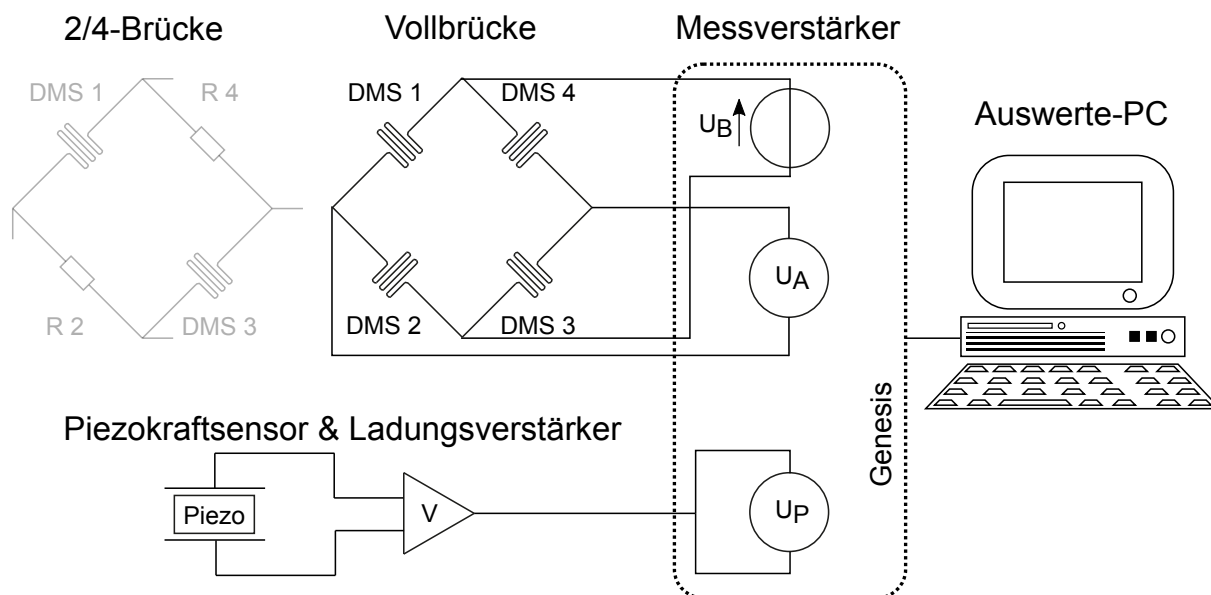


Abbildung 7.4: Messkette für Erfassung von Signalen aus dem Piezokraftsensor und aus Brückenschaltungen für DMS

7.2 Kalibrierung

Die Umrechnung des Spannungssignals aus der jeweiligen DMS-Brückenschaltung in eine Kraft kann direkt über mechanische Zusammenhänge von Dehnung und Spannung, wie in Gleichung

2.8 oder Gleichung 2.9 oder durch Kalibrierung des Messaufbaus mit einer geeichten Prüfmaschine erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kalibrierung der DMS-Schaltung in-situ gegen das Signal der im Werkzeug verbauten Piezokraftmessdose durchgeführt. Dabei wurde die Kalibrierkonstante für das DMS-Signal aus dem Quotient von Maximalkraft der Piezokraftmessdose während des Schneidvorgangs und der zeitlich dazu passenden Maximalspannung der DMS-Schaltung errechnet. Mit dieser Konstante konnte die Spannung aus der DMS-Schaltung in eine Kraft umgerechnet werden. Allerdings gilt die Kalibrierung streng genommen nur für die Schneidkraft bis zum Bruch. Dynamische Effekte verursachen unter Anderem eine Amplituden- und Phasenverschiebung. Dieses Übertragungsverhalten müsste kalibriert werden, was auf Grund fehlender Referenzsysteme bisher nicht realisiert werden konnte (Evers und Schading, 2006, S. 667). Daher wird das dynamische Übertragungsverhalten im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Dies führt allerdings nur zu einem kleinen Fehler bei der Bruchkraftmessung, da hier der Übergang vom statischen ins dynamische Übertragungsverhalten im Fokus steht und sich dynamische Effekte in diesem kurzen Zeitintervall noch nicht stark auswirken.

Die Piezokraftmessdose wiederum war gegen die Universalprüfmaschine, beschrieben in Kapitel 5.6 kalibriert. Abbildung 7.5 (links) zeigt das Vorgehen bei der Kalibrierung des Piezokraftmessensors und Abbildung 7.5 (rechts) zeigt das Vorgehen bei der Kalibrierung der Brückenschaltungen graphisch.

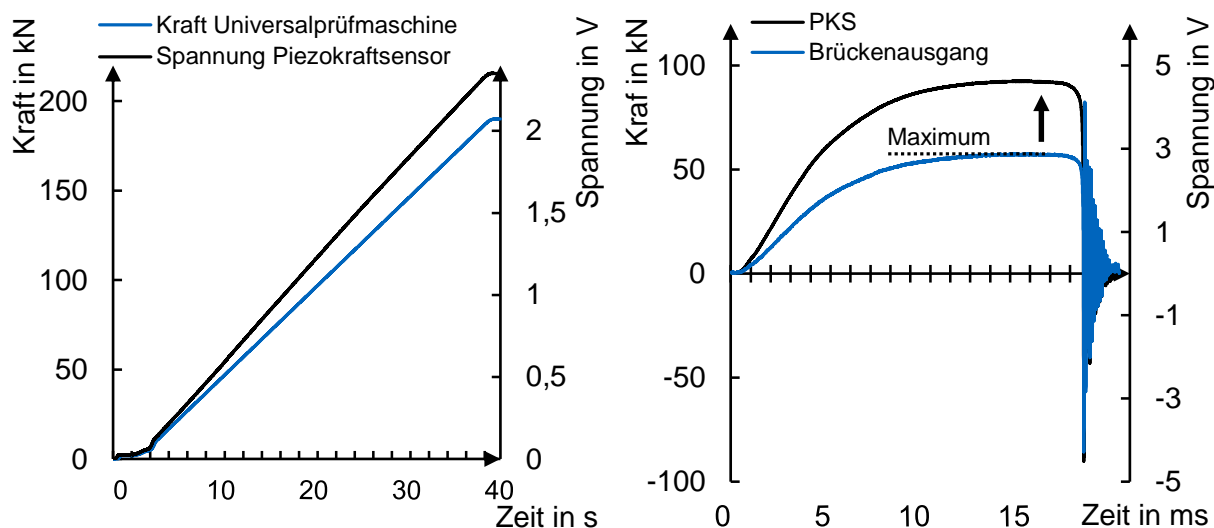


Abbildung 7.5: Vorgehen zur Kalibrierung des Piezokraftsensors (links) und der Brückenschaltung (rechts)

Dazu wurde die Stempeldruckplatte, die wie in Abbildung 5.1 ersichtlich ist, mit dem Piezokraftsensor verbunden ist, mit der Kraft der Universalprüfmaschine rampenartig belastet und somit eine Kalibrierkurve zwischen Kraft an der Stempeldruckplatte und Spannung aus der Piezokraftsensormesskette geschaffen. Diese Kalibrierkurve wurde angewendet, um in den Experimenten aus den Spannungswerten der Piezokraftsensormesskette eine Kraft zu berechnen.

Die Kalibrierung der Brückensignale erfolgte durch einen multiplikativen Kalibrierungsfaktor, der aus der Gleichsetzung des gemessenen Kraftmaximums des Piezokraftsensors mit dem Spannungmaximum des Brückensignals berechnet wurde. Damit wurde das Spannungssignal in ein Kraftsignal kalibriert.

Bei Messungen mittels Vollbrücke traten, wie in Abbildung 7.6 (links) zu sehen Überschwinger über die Maximalkraft im dynamischen Bereich auf.

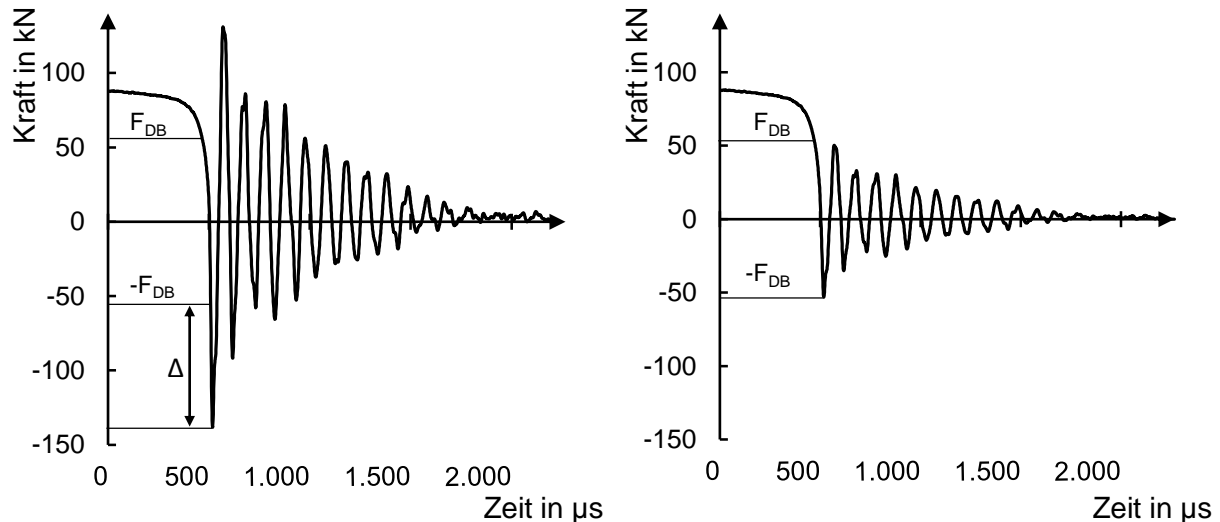


Abbildung 7.6: Vorgehen zur quasidynamischen Kalibrierung der Vollbrückenschaltung im dynamischen Bereich. Rohsignal (links) Kalibriertes Signal (rechts)

Dies impliziert zunächst einen zusätzlichen Energieeintrag in den Stempel. Allerdings lässt sich dieses Überschwingen nicht im Signal des PKS und auch nicht im Signal einer nahe am Stempelkopf angebrachten $2/4$ -Brücke bei gleichen Schneidparametern erkennen. Das Überschwingen muss also auf die verwendete Messtechnik oder die Messposition zurückzuführen sein.

Das Signal der Vollbrücke ist ein über die Brückenschaltung gemitteltes Signal von zwei längs und zwei quer zur Stempelachse angebrachten DMS. Durch diese Mittelung können auf Grund eines veränderten Materialverhaltens des Stempels im dynamischen Fall Verzerrungen auftreten. Allerdings sind diese Verzerrungen für die Messung der Durchbruchkraft mit dem vorgesehenen Messkonzept ohne Einfluss, da mittels des Messkonzepts nur der Zeitpunkt des Übergangs vom statischen in den dynamischen Fall bestimmt wird und eine quantitative Signalanalyse des dynamischen Kraftsignals nicht vorgesehen ist. Eine Änderung des Messkonzepts ist daher nicht zielführend.

Grundsätzlich werden bei dynamischen Messungen „frequenzabhängige Inertialkräfte erzeugt, die sich der zu messenden Eingangskraft störend überlagern können“ (Kobusch et al., 2008, S. 152). Deswegen können Amplituden und Phasenverschiebungen sowie Inertialkräfte im dynamischen Bereich auftreten, die auch zu einer Erhöhung der Amplituden führen können. Diese Störanteile könnten durch eine dynamische Kalibrierung herausgearbeitet werden. Allerdings ist eine dynamische Kalibrierung im Rahmen dieser Arbeit auf Grund des hohen Aufwands nicht

möglich. Es müsste ein dynamisches Referenzsystem aufgebaut werden, was die Frequenzen und Belastungen während des Schnittschlags nachbildet, ähnlich der Universalprüfmaschine im statischen Bereich. Dies ist extrem aufwendig. Um es anschaulicher darzustellen wird das mittels Vollbrücke gemessene Kraftsignal im dynamischen Bereich einer so genannten quasi-dynamischen Kalibrierung unterzogen. Abbildung 7.6 zeigt beispielhaft das Vorgehen zur quasi-dynamischen Kalibrierung der Vollbrückenschaltung bei dynamischer Belastung.

Um die Überschwinger vor allem in der grafischen Darstellung des durch die Vollbrückenschaltung gemessenen Ausschwingsignals zu beseitigen wurden die Rohsignale im dynamischen Bereich mit einem linearen Faktor, der sich aus dem Verhältnis der jeweiligen Durchbruchkraft und dem Betrag des ersten Minimums im Schwingsignal ergab, vermindert. So ergibt sich eine quasi-dynamische Kalibrierung aus der Gleichsetzung der maximalen mit dem Messaufbau gemessenen dynamischen Kraft mit der maximalen statischen Anregungskraft, die den Energieeintrag in das System bestimmt. Das dermaßen kalibrierte Signal ist dann in Abbildung 7.6 (rechts) zu sehen.

8 Versuchsergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die erzielten Versuchsergebnisse ausführlich vorgestellt und einer intensiven Diskussion unterzogen.

8.1 Versuchsplanung

Abbildung 8.1 zeigt den Versuchsplan zur Erreichung der in Kapitel 3 genannten Ziele.

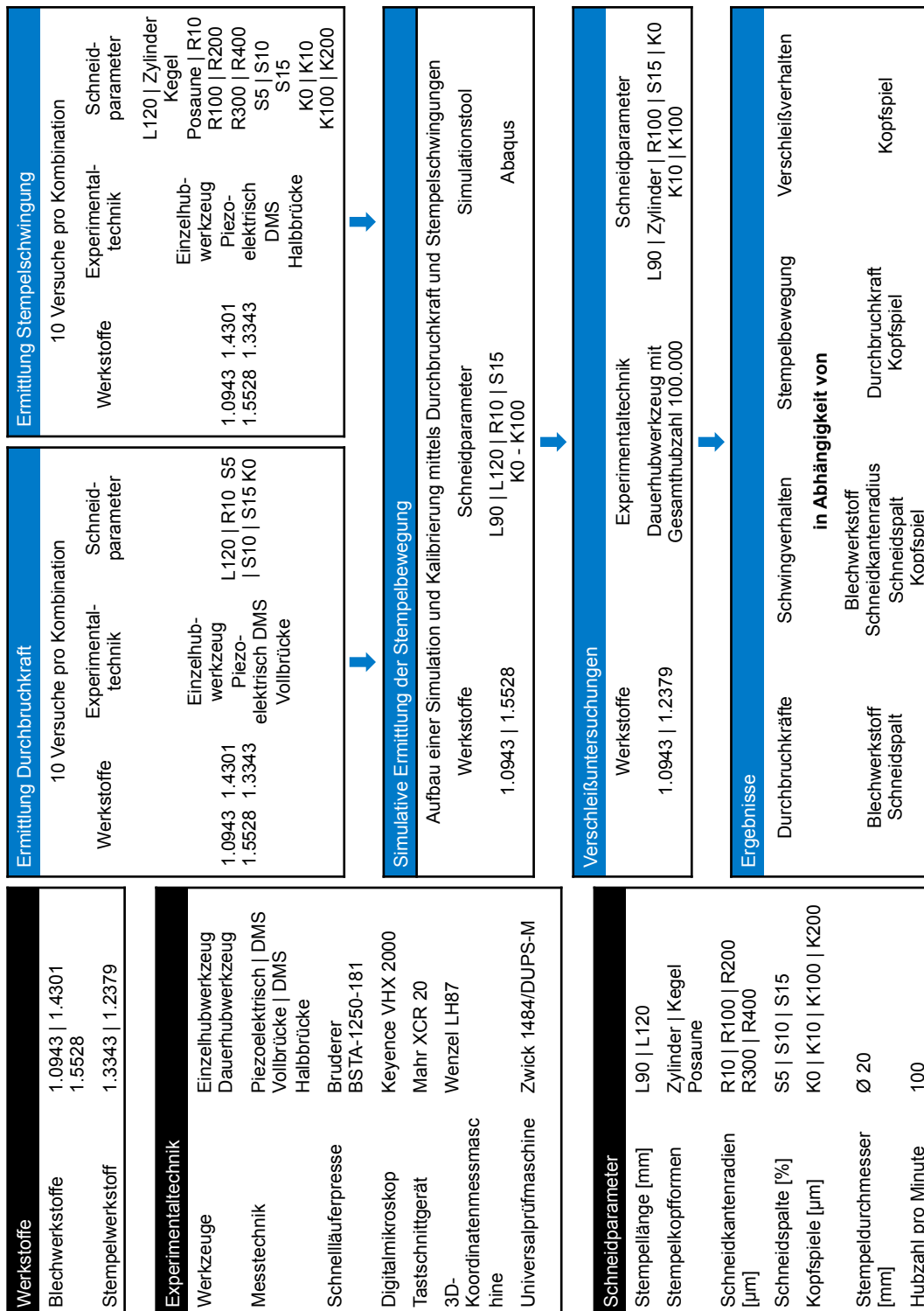


Abbildung 8.1: Zusammenfassung der Versuchsplanung

Auf die Werkstoffe und die Experimentaltechnik wurde oben schon ausführlich eingegangen. Die Schneidparameter ergeben sich zum Teil aus Erfahrungswerten und Anregungen aus Industrie und Forschung und zum Teil aus vorgegebenen Bedingungen, wie Restriktionen durch die verwendeten Werkzeuge. Die Stempellängen ergaben sich aus Restriktionen im Werkzeug. Bei Messungen mit DMS war es für bessere Zugänglichkeit vorteilhaft die Stempellänge zu maximieren. Die Kopfformen wurden auf Grund von geometrischen Grundformen, die industriell in der Ausführung von Stempelköpfen benutzt werden, ausgewählt und durch kommerziell erhältliche Stempelkopfformen ausgeführt. Die Schneidkantenverrundungen wurden dem jeweiligen Versuchszweck angepasst. Beim Messen der Durchbruchkraft wurde, um eine frühe Rissinitiierung und damit wegen der hohen verbleibenden Restblechdicke bei Bruch hohe messbare Bruchkräfte zu erzeugen, die Schneidkante des Stempels auf einen Radius von $10\ \mu\text{m}$ eingestellt. Für die Untersuchung der Abhängigkeit des Schwingverhaltens des Stempels bei fortschreitendem Stempelverschleiß wurden die Schneidkanten des Stempels iterativ verrundet, um den Verschleiß an der Schneidkante zu simulieren. Die Verschleißuntersuchungen wurden mit einem auf einen Schneidkantenradius von $100\ \mu\text{m}$ vorverrundeten Stempel begonnen, um initialen Verschleiß zu simulieren. Dieses Vorgehen sparte auch Versuchswerkstoff. Die Schneidspalte wurden durch Erfahrungswerte aus der Literatur gewählt. Siehe dazu Kapitel 2.1.2. Mit den Schneidspalten in Höhe von 5, 10 und 15 % konnte der Einfluss des Spannungszustandes im Blech und der Schnittflächenausprägung auf die Durchbruchkraft detailliert untersucht werden. Bei der Ermittlung des Schwingverhaltens und den Verschleißuntersuchungen wurde auf die Variation des Schneidspalts verzichtet. Die Kopfspiele ergaben sich teilweise aus den Untersuchungen selbst oder wurden praktischerweise zum Untersuchungszweck passend gewählt. Um das Ziel der Arbeit zu erreichen, wurden drei grobe Arbeitsschritte festgelegt. Nach experimenteller Ermittlung der Durchbruchkraft und des Stempelschwingverhaltens sollten die gewonnen Erkenntnisse zum Aufbau einer Simulation genutzt werden, mit der die Stempelbewegung und die Abhängigkeit der Bewegung vom Kopfspiel simulativ abgebildet werden kann. Aufbauend auf den Ergebnissen der Simulation sollte durch Verschleißuntersuchungen der Zusammenhang zwischen Stempelbewegung abhängig vom Kopfspiel und Stempelverschleiß experimentell hergestellt werden. Als Ergebnisse sollten die Durchbruchkräfte und das Schwingverhalten bei den untersuchten Parametern ermittelt werden. Ebenfalls sollte die Stempelbewegung und deren Einfluss auf den Stempelverschleiß ermittelt werden.

Grundsätzlich wurden für eine belastbare statistische Aussage in den experimentellen Versuchen jeweils 10 Versuche pro Parameterkonfiguration durchgeführt. Die Auswertung erfolgt durch Bildung des arithmetischen Mittelwerts und die Messunsicherheit wird durch die einfache Standardabweichung angegeben. Vergleiche dazu DIN V ENV 13005. In Diagrammen wird diese durch Fehlerbalken visualisiert.

8.2 Schnittflächenentstehung und -morphologie

Bei der Durchführung der Schneidversuche entstanden am Stanzgitter und am Butzen Schnittflächen nach den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Mechanismen. Während des Schneidvorgangs war der Stempel nicht mit der gesamten Oberfläche des Blechs in Kontakt, sondern nur mit einer schmalen Randzone, die sich durch die in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Kräfteverhältnisse bildet. In Abbildung 8.2 sind die Abdrücke des Stempels, die während des Schneidvorgangs auf dem jeweiligen Butzen entstanden sind, für die drei untersuchten Blechwerkstoffe zu sehen. Die Abkürzungen für die in der Abbildungsunterschrift angegebenen Schneidparameter sind in Abbildung 8.1 eingeführt.

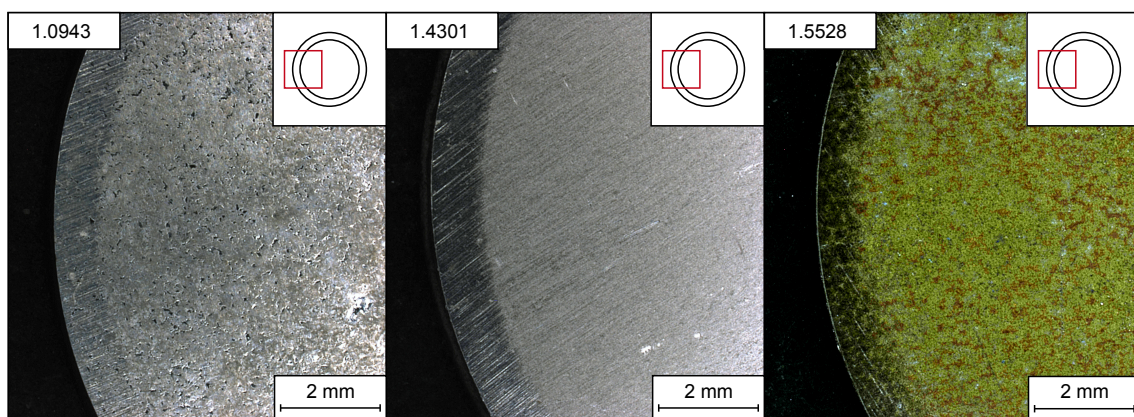


Abbildung 8.2: *Beeinflusste Randzonen am Butzen der drei Blechwerkstoffe*
 Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Die Entstehung dieser Abdrücke durch das induzierte Biegemoment ist in Kapitel 2.1.4 auf Seite 9 näher beschrieben. Durch das Vermessen der Breite der Abdrücke kann die Auflagefläche des Stempels während des Schneidvorgangs abgeschätzt und mit der maximalen Schneidkraft mittels *Formel 8.1* die maximale Oberflächenspannung auf dem Blech und auch die Spannungen im Stempel berechnet werden.

$$\sigma = \frac{F_S}{A_{RZ}} \quad (\text{Formel 8.1})$$

wobei:

σ = technische Spannung

F_S = Schneidkraft

A_{RZ} = Fläche der beeinflussten Randzone

Die Vermessung erfolgte optisch mittels des in Kapitel 5.4 beschriebenen 3D-Digitalmikroskops.

Auf Grund des ähnlichen E-Moduls und gleicher Blechdicke der Blechwerkstoffe ist die Biegesteifigkeit dieser Blechwerkstoffe nach den Grundlagen der technischen Mechanik auch sehr ähnlich. Dadurch ergeben sich sehr ähnliche elastische Reaktionen bei allen drei Blechwerkstoffen auf das induzierte Biegemoment. Die beeinflusste Randzone ist daher bei allen drei Blechwerkstoffen ca. 1 mm breit. Diese Randzone ist die Fläche, über die die Kraft zwischen Stempel und

Blech während des Schneidvorgangs übertragen wird. Daher muss bei einer klassischen Berechnung der Spannungen im Stempel diese Randzone und nicht die gesamte Stempelstirnfläche berücksichtigt werden.

Die mittels *Gleichung 2.1* und *Formel 2.1* errechneten maximalen Schneidkräfte beim Schneiden der Blechwerkstoffe ergeben die in Tabelle 8.1 mittels *Formel 8.1* unter Berücksichtigung einer Randzone von 1 mm berechneten maximalen Oberflächenspannungen.

Tabelle 8.1: Berechnete maximale Oberflächenspannungen beim Lochen

Werkstoff	maximale Schneidkraft in kN	maximale Oberflächen- spannung in N/mm^2
1.0943	80	1340
1.4301	64	1072
1.5528	147	2463

Durch die Nutzung einer mechanisch-gebundenen Schnellläuferpresse wird der Schneidvorgang durch weggebundenes Drücken des Schneidstempels in das Blech, welches über der Matrize liegt, ausgeführt. Wenn der Schneidstempel durch Veränderung der Schließhöhe der Presse nur unvollständig in das Blech eintaucht, entstehen sogenannte Anschnitte oder Durchsetzungen. An Hand dieser Anschnitte kann die Verformung des Blechwerkstoffs während des Schneidens mittels Schlifffbildern veranschaulicht werden. Dynamische Effekte auf den Materialfluss während des Schneidens werden dabei nicht berücksichtigt. Die verwendete Presse erlaubt eine Stößelverstellung im Raster von $10\ \mu m$. Da die Eintauchtiefe des Stempels in das Blech insgesamt vor Bruch mehrere $100\ \mu m$ beträgt und daher bei voller Abdeckung des möglichen Rasters 10 Aufnahmen pro $100\ \mu m$ Eintauchtiefe gezeigt werden müssten, sind nur exemplarische Anschnitte ausgewählt, um das Werkstoffverhalten während des Schneidens bis zum Bruch für die einzelnen Blechwerkstoffe zu erklären. In Abbildung 8.3 ist die Vorgehensweise zur Anfertigen von Anschnitten dargestellt.

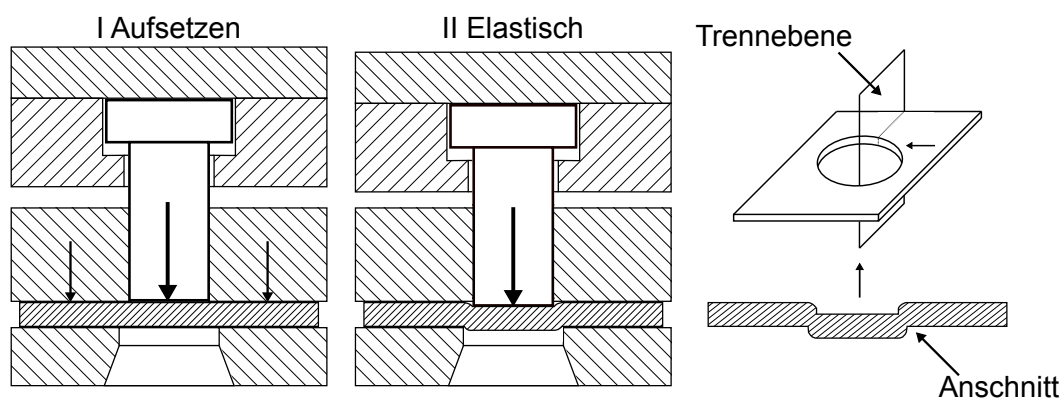


Abbildung 8.3: Vorgehen zur Erzeugung von Anschnitten

Mittels der schematischen Darstellung des Werkzeugs wird der unterbrochene Schneidprozess veranschaulicht. Die Phasen I und II werden komplett durchfahren. Die Phase III wird bei einer definierten Schließhöhe unterbrochen. Die Festlegung der Schließhöhe auf einen definierten Wert bewirkt, dass der untere Umkehrpunkt der Presse mitten in das Blech hinein verlagert wird und der Stempel somit vor Bruch aus dem Blech zurückgezogen wird. Dabei entsteht ein angeschnittenes oder durchgesetztes Blechteil. Dieses Blechteil wird sodann mittels eines Trennverfahrens aufgetrennt und einer metallographischen Behandlung unterzogen. Nach Einbetten und Polieren der Anschnittprobe wird diese geätzt, um die Mikrostruktur des Werkstoffs sichtbar zu machen. Dabei werden verschiedene Ätzmittel für die einzelnen Blechwerkstoffe verwendet. Für die Sichtbarmachung der Mikrostruktur des 1.0943 und des 1.5528 wird mit Nital und für den 1.4301 die Farbätzung LBI nach Lichtenegger und Bloech, wie in Kapitel 6.1 verwendet.

In Abbildung 8.4 sind Schliffbilder von Anschnitten, die nach der oben erklärten Methode hergestellt wurden, des Blechwerkstoffs 1.0943 dargestellt. Eingestellt war ein Schneidspalt von 15 % und eine Schneidkantenverrundung von 10 μm . Die Stempelleintauchtiefe wurde pro Anschnitt in Schritten von 10 μm ab Blechoberfläche vergrößert, um auffällige Veränderungen in den Anschnitten erkennen zu können. Zusammenfassend dargestellt werden in dieser Arbeit die Anschnitte in Schritten von 200 μm für die Blechwerkstoffe 1.0943 und 1.4301 und für den Werkstoff 1.5528 in Schritten von 100 μm . Die Anschnitte zwischen diesen gezeigten Anschnitten weisen keine charakteristischen Unterschiede auf. Die jeweilige Stempelleintauchtiefe ist in den gezeigten Aufnahmen oben links zu sehen. Die Darstellung des Stempels und der Matrize sind für eine bessere Übersicht nachträglich mittels Bildbearbeitung eingefügt.

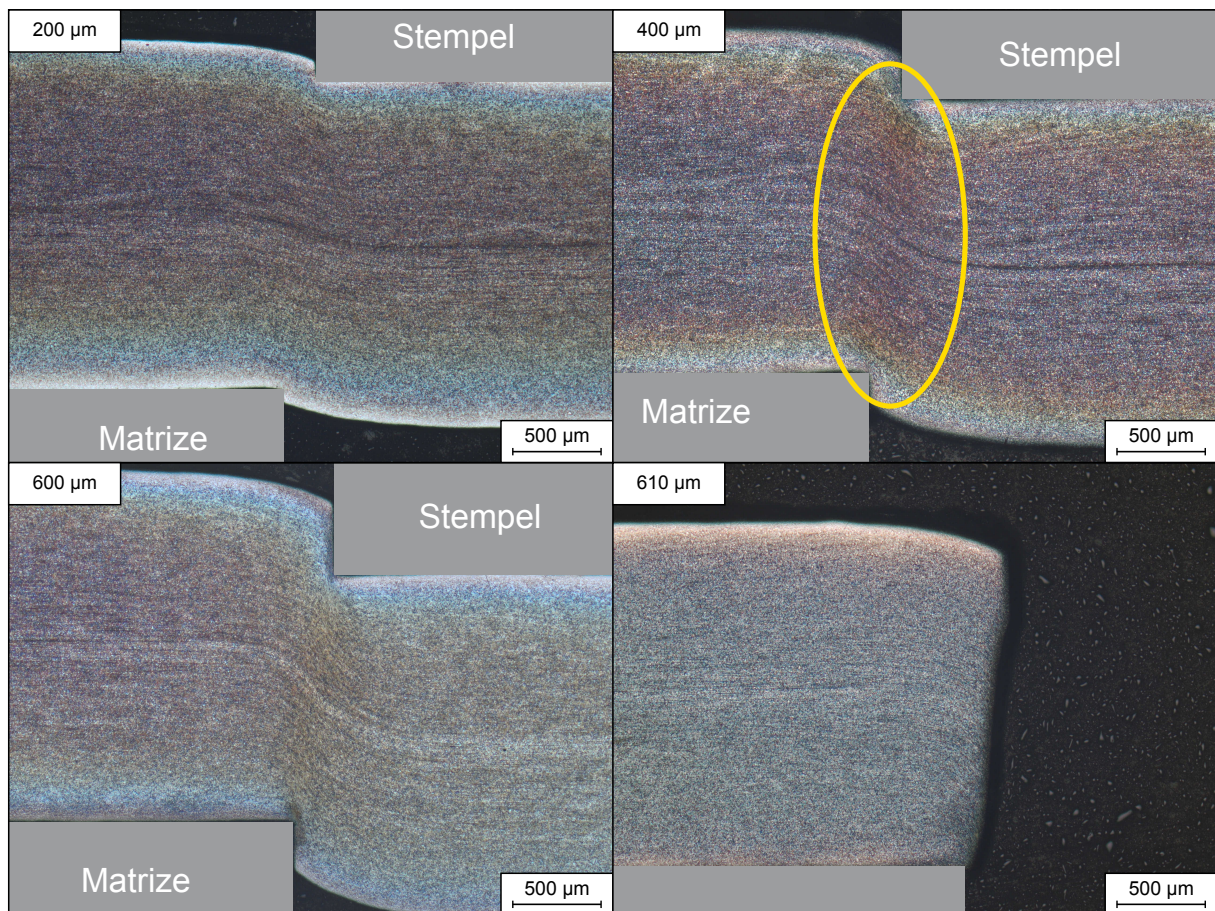


Abbildung 8.4: Anschnittfolge in Schritten von $200\ \mu\text{m}$ für den Werkstoff 1.0934
 Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Der erste Anschnitt zeigt eine sehr geringe plastische Verformung. Eine Scherzone ist noch nicht erkennbar. Elastische Verformungen können im Schliff nicht abgebildet werden, da diese nach Wegnahme der Stempelkraft verschwinden und in einem ex post angefertigten Schliffbild nicht darzustellen sind. Daher ist die Oberfläche des Abschnitts unter dem Stempel im Schliffbild im Gegensatz zur elastischen Wölbung während des Schneidvorgangs bis auf den plastischen Anteil, der durch das Biegemoment verursacht wird, nahezu eben. Ein weiteres Eindringen des Stempels bewirkt eine weitere plastische Verformung des Werkstoffs. Die sogenannte Scherzone bildet sich aus. Diese ist im Schliffbild erkennbar an einer hier sichtbaren Verdunkelung des Gefüges, welche durch eine starke Verzerrung der Körner in Scherrichtung und damit Stauchung in horizontaler Richtung entsteht. Diese Verzerrung führt wie die Stauchung eines Gitters zu einer Veränderung des optischen Eindrucks. Die Scherzone ist im zweiten Schliffbild bei einer Stempeltauchtiefe von $400\ \mu\text{m}$ durch eine gelbe elliptische Umrahmung gekennzeichnet. Mit weiterem Eindringen des Stempels bildet sich im Bereich des Schneidspalts die Scherzone weiter aus. Die Kristallstrukturen verschmieren wegen der extrem hohen Dehnungen, die der Werkstoff in diesem Bereich erfährt im weiteren Verlauf weiter. Ebenfalls sind die Dehnungsgradienten örtlich gesehen sehr hoch. Zu erkennen ist die Ausbildung des Kanteneinzugs und des Glattschnitts sowie des Grats durch Anschmiegen an die Matrizenkante.

Der Werkstoff verfestigt sich während des Eindringens des Stempels und gleichzeitig nimmt die Querschnittsfläche ab. Dies führt zu dem in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Kraftmaximum. Sobald die Verfestigung die durch die Querschnittsabnahme steigende Schubspannung nicht mehr kompensieren kann, kommt es zum Abfallen der Schneidkraft. Nach Überschreiten der Schubbruchgrenze kommt es dann zum Bruch, welcher durch einen Riss, der sich mit sehr hoher Geschwindigkeit durch den Werkstoff ausbreitet, initiiert wird. So ist zwischen dem vorletzten Bild und dem letzten Bild, welches die Schnittfläche des Stanzgitters im Querschnitt zeigt, eine maximale Differenz von $10\ \mu\text{m}$ der Stempeleintauchtiefe des vorletzten Bildes und der Stempeleintauchtiefe bei Bruch vorhanden.

Abbildung 8.5 zeigt die Anschnittfolge beim Schneiden des 1.4301.



Abbildung 8.5: *Anschnittfolge in Schritten von 200 µm für den Werkstoff 1.4301*
Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Auf Grund der höheren Duktilität des 1.4301 im Gegensatz zum 1.0943 kann der Stempel in den Werkstoff weiter in das Blech eindringen bevor es zum Bruch kommt. Daher ergeben sich bei gleicher Schrittweite von 200 μm Stempelleintauchtiefenzugabe dementsprechend mehr Anschnitte.

Erkennbar ist ebenfalls zunächst eine fortschreitende Plastifizierung des Werkstoffs, da auch hier elastische Verformungen nicht darstellbar sind. Anschließend bildet sich im Schneidspalt eine Scherzone, in der sich das Material unter dem dominierendem Scherspannungszustand plastisch verformt, aus. Diese bildet sich ausgehend von den Schneidkanten langsamer aus als beim 1.0943 und hält während des Vordringens des Stempels länger an bis es zum Bruch kommt. Die erste erkennbare Ausbildung an den Schneidkanten ist in der Abbildung durch eine gelbe elliptische Umrahmung gekennzeichnet. In der Scherzone fließt der Werkstoff und die Struktur des Werkstoffs wird stark verändert. Die Veränderung der Gefügestruktur fällt durch die hohe Duktilität des 1.4301 im Gegensatz zu spröderen Stählen ausgeprägter aus. Daher ist die Scherzone beim 1.4301 besser erkennbar als beim 1.0943.

Da auf Grund des Anschnittverfahrens jeder Anschnitt mit einem neuen Blech hergestellt werden muss, kommen in der Darstellung mittels Schliffbild Schwankungen in den jeweiligen lokalen Blecheigenschaften und auch Schwankungen bei der Herstellung und Mikroskopie des Schliffs zum Tragen. Daher weichen die Bilder der Stadienfolge in bestimmten Merkmalen leicht voneinander ab. So ist zum Beispiel die Scherzone bei einer Eintauchtiefe von 1000 μm dunkler und prägnanter als bei einer Eintauchtiefe von 1200 μm . Das Kaltwalzen des Blechs führt zu dem erkennbaren Mittelstreifen, an dem sich die Verformung über den Blechquerschnitt gut erkennen lässt. Auch hier sind die Ausbildung des Kanteneinzugs und des Glattschnitts zu sehen. Zwischen einer Eintauchtiefe von 1200 μm und 1400 μm kommt es beim 1.4301 zum Bruch, wohingegen es beim 1.0943 schon zwischen 600 μm und 800 μm Eintauchtiefe zum Bruch kommt. Dies zeigt abermals die hohe Duktilität des 1.4301 im Vergleich zum 1.0943.

In Abbildung 8.6 sind Anschnitte beim Schneiden des 1.5528 dargestellt.

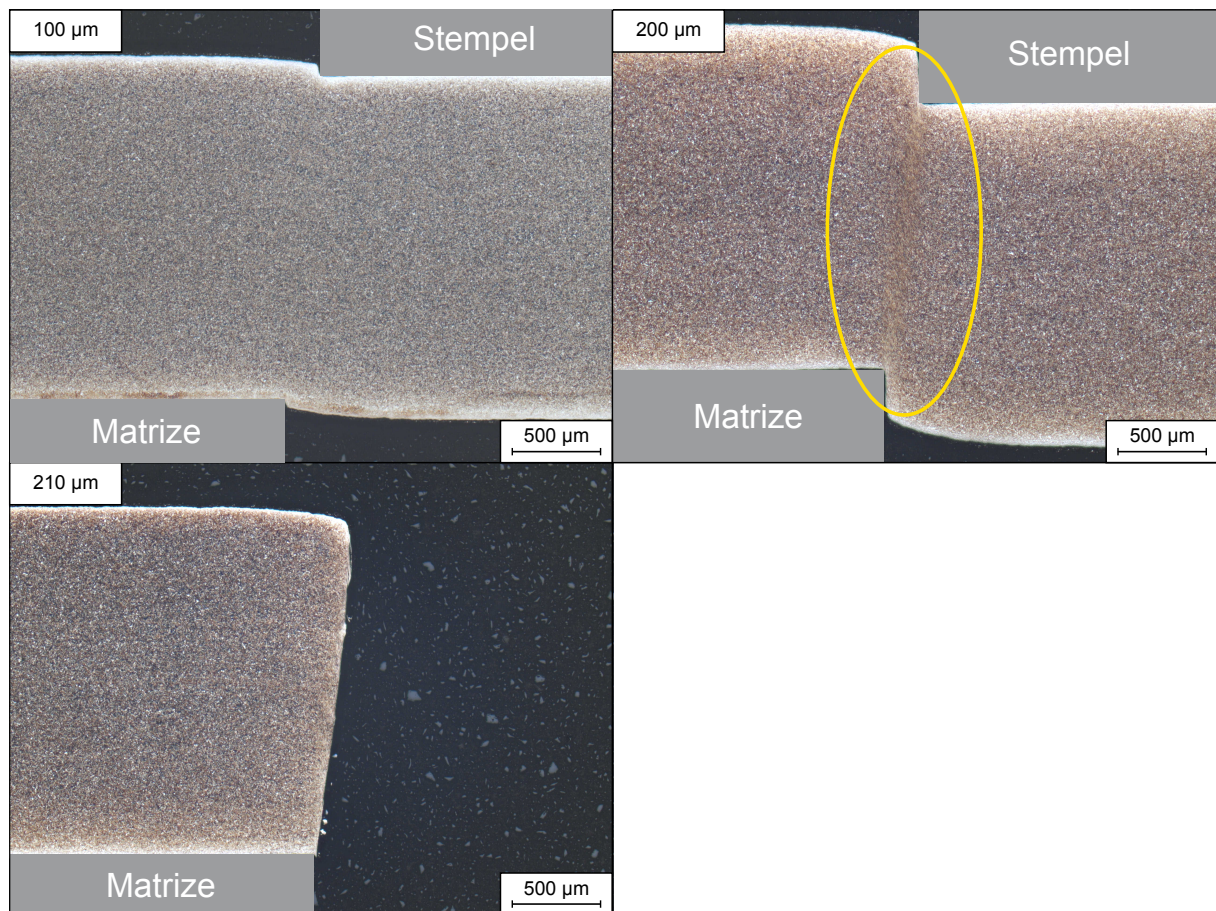


Abbildung 8.6: *Anschnittfolge in Schritten von 100 µm für den Werkstoff 1.5528*
Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Durch die sehr hohe Sprödigkeit des 1.5528 im Vergleich zu den anderen Werkstoffen dringt der Stempel weniger in das Blech ein bevor es zum Bruch kommt. Daher wird die Stempeleintauchtiefe auch nur um jeweils 100 µm vergrößert. Die geringe Stempeleintauchtiefe bis zum Bruch führt zu geringen Glattschnitthöhen und größeren Bruchhöhen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Schneidprozess schneller abläuft als bei Werkstoffen mit geringeren Bruchhöhen. Durch die hohe Fließgrenze ist ein geringerer Kanteneinzug als bei den anderen Werkstoffen feststellbar (Schmelzer, 2007, S. 83). Eine Scherzonenbildung ist relativ gut erkennbar (siehe gelbe elliptische Umrahmung). Das Gefüge des 1.5528 ist rein martensitisch und die Verformung der typischen Martensitnadeln bewirkt die gute Erkennbarkeit der Scherzone. Nach Bruch ist eine klare Schnittfläche mit gut abgrenzbaren Charakteristiken zu erkennen.

In den vorherigen Schlißbildern ist die Ausbildung des Kanteneinzugs sowie des Glattschnitts und der Scherzone gut erkennbar. Bei scharfer Matrizenkante und passendem Schneidspalt beginnt wegen der Überlagerung von Zug- und Scherspannungen der Riss nahezu immer an der Matrizenkante. In Abbildung 8.7 sind die ersten Anrisse an der Matrizenkante zu sehen.

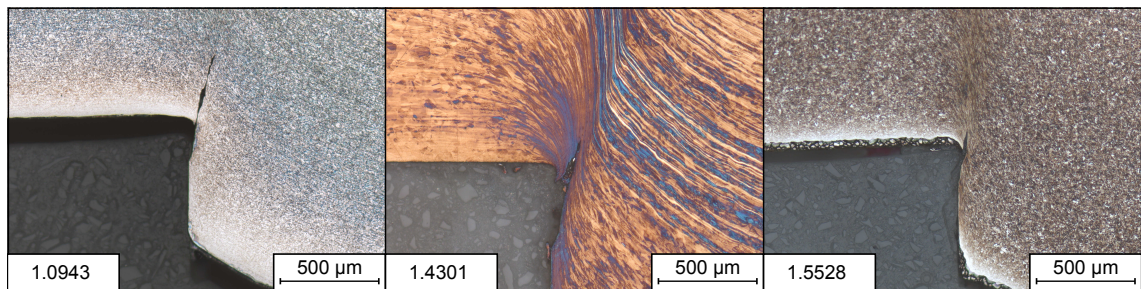


Abbildung 8.7: Rissbeginn an der Matrizenkante bei den drei untersuchten Blechwerkstoffen
Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Die Anrisse sind in ihrem Anfangsstadium und wurden durch viele Versuche erzeugt, da der Riss sehr schnell zum Bruch führt und die Schließhöhe der Durchsetzung und die Eigenschaften des aktuellen Blechausschnitts so zusammenfallen müssen, dass ein Riss, aber noch kein vollständiger Bruch, entsteht. *Haupt* gibt die Rissausbreitungsgeschwindigkeit in Stahl nach *Tetelmann* (Tetelman und McEvily, 1971) mit 2000 m/s an (Haupt, 2003, S. 6).

Die durch die oben erläuterten Prozesse entstandenen Schnittflächen wurden mikroskopisch und taktil untersucht. In Abbildung 8.8 sind die entstandenen Schnittflächen in Frontalaufnahme zu sehen.

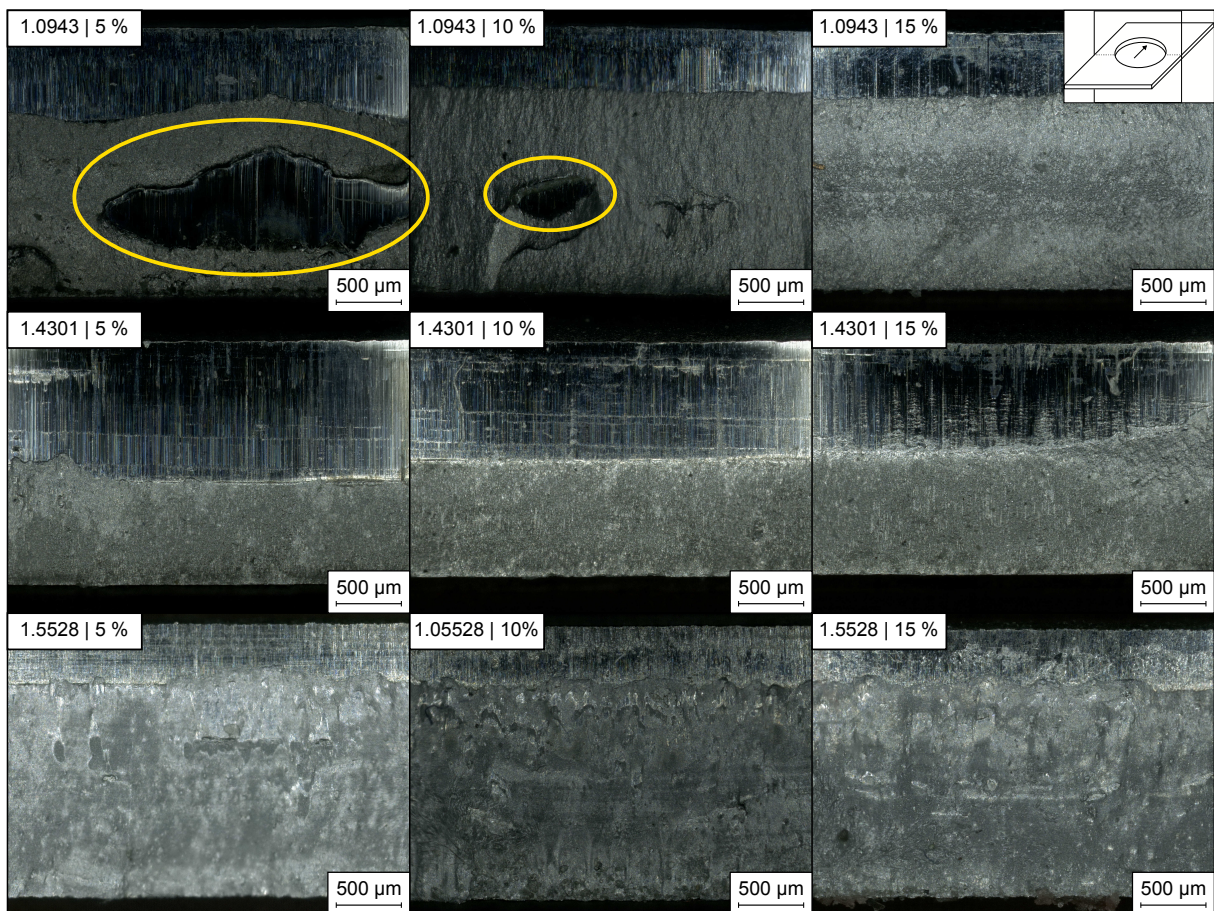


Abbildung 8.8: Frontalansichten der Schnittflächen für die Versuchsreihe Durchbruchkraft
Schneidparameter: L120 | R10 | K0

Der 1.0943 zeigt bei den Schneidspalten von 5 % und 10 % von oben nach unten nach dem Kanteneinzug einen Glattschnitt, dann eine Bruchfläche und dann wieder einen partiellen Glattschnitt, der in einen Restbruch übergeht. Dieser Effekt ist beim Schneidspalt von 5 % stärker ausgeprägt (siehe gelbe elliptische Umrahmung in der Abbildung). Dieses Phänomen nennt sich Sekundärglattschnittbildung (Demmel, 2014, S. 10). Dieser entsteht, wenn der Riss nach dem ersten Glattschnitt vom Stempel aus initiiert wird. Bei einem zu kleinen Schneidspalt müsste der Riss einen steilen Winkel einnehmen, um in die Richtung der Schneidkante der Matrize zu laufen und mit dem von der Matrize ausgehenden Riss zur Vereinigung die zum Bruch führt zu kommen. Der Riss kann diesen steilen Winkel nicht einnehmen und läuft mit einem flacheren Winkel tendenziell in das Stanzgitter über den Schneidspalt hinaus und kommt dort zum Erliegen. Der Stempel beginnt somit mit weiterem Eintauchen einen zweiten Glattschnitt welcher in einem Restbruch endet. Mit Vergrößerung des Schneidspalts können die Risse bei der ersten Initiierung aufeinander zulaufen und der Butzen bricht aus dem Stanzgitter. Zu erkennen ist dies bei einem Schneidspalt von 15 % beim 1.0943.

Der 1.4301 zeigt ein harmonischeres Bruchverhalten über den Schneidspalt. Es zeigt sich über die untersuchten Schneidspalte kein Sekundärglattschnitt. Die Ursache dafür liegt im zäheren Verhalten des 1.4301. Bevor der Riss entsteht kann der 1.4301 stärker umgeformt werden. Der Riss benötigt also eine höhere Aktivierungsenergie als beim spröderen 1.0943. Diese erhöhte Aktivierungsenergie führt nun zu einer schnelleren gezielteren Rissausbreitung. Der Riss hat ebenfalls eine kürzere Distanz zur Blechoberfläche als bei einer frühen Rissinitiierung und wird damit durch immer kleiner werdenden Restquerschnitt gezielter in die Richtung des energieärmsten Weges gelenkt.

Das Phänomen Sekundärglattschnitt zeigt sich ebenfalls bei kleinen Schneidspalten beim 1.5528. Hier greifen dieselben Erklärungsmuster wie beim 1.0943. Allerdings ist hier der Sekundärglattschnitt nicht an allen Stanzproben zu erkennen. Der 1.5528 liegt in pressgehärteter Form vor. Durch prozessbedingte Temperaturunterschiede bei der Presshärtung der einzelnen Bleche sind beim 1.5528 stärkere Chargenschwankungen zu erwarten.

Abbildung 8.9 zeigt die Schlifffbilder der entstandenen Schnittflächen im Querschleiff ohne Ätzung.

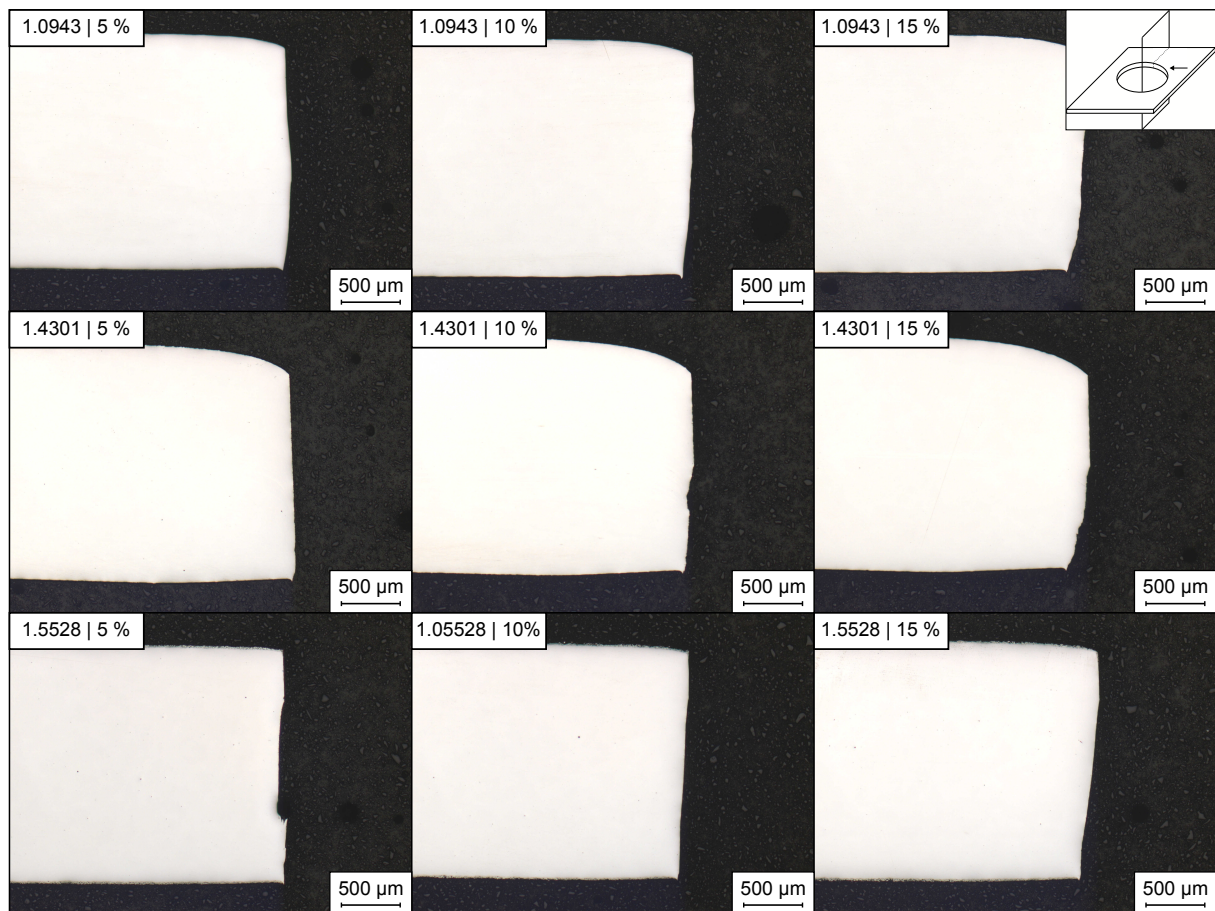


Abbildung 8.9: Schliffbilder der Schnittflächen der Versuchsreihe Durchbruchkraft
Schneidparameter: L120 | R10 | K0

Auch im Querschliff sind die gleichen Phänomene wie in der Frontalansicht erkennbar. Die Abweichungen von der Normschnittfläche bei kleinen Schneidspalten und die Bildung des Sekundärglattschnitts durch Ausbauchungen in der Queransicht. Im Gegensatz zu Frontalaufnahmen, die ein zweidimensionales Bild der Schnittflächenoberfläche zeigen, wird durch Querschliffe ein zweidimensionales Bild im Querschnitt erzeugt. Die daraus ersichtlichen Schnittflächenkenngrößen werden vornehmlich zur Qualitätskontrolle von Schnittflächen eingesetzt.

Die Kontur der Schnittfläche im Querschnitt kann auch durch ein so genanntes Tastschnittgerät aufgenommen werden. Die technischen Daten des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Tastschnittgeräts der Fa. Mahr ist in Kapitel 5 zu finden. Die aufgenommene Kontur kann einfach vermessen werden.

Die nach VDI 2906 ausgewerteten Schnittflächenkenngrößen aus Messungen für die Versuchsreihe Durchbruchkraft sind in Abbildung 8.10 zu sehen. Die gewonnenen Daten fußen auf jeweils 10 Messungen pro Versuchsparametereinstellung. Die Abweichungsbalken bezeichnen die einfache Standardabweichung.

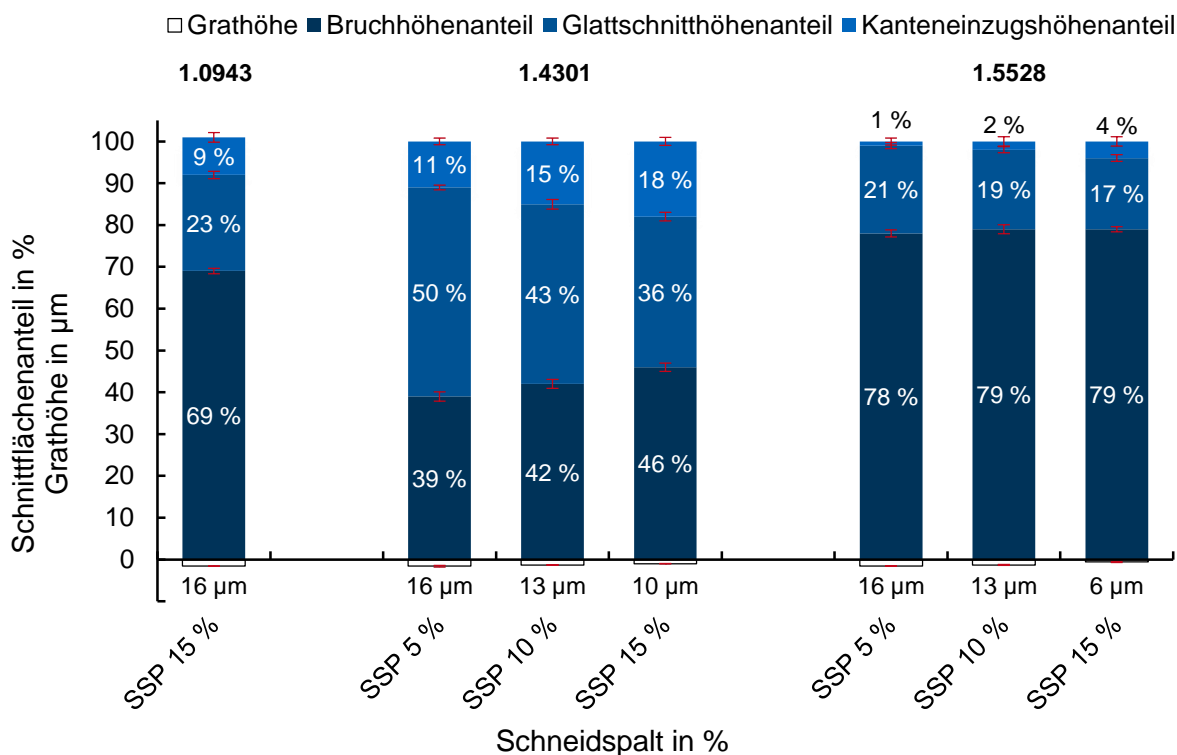


Abbildung 8.10: Schnittflächenkenngrößen der Versuchsreihe Durchbruchkraft
Schneidparameter: LI20 | R10 | K0

Die Schneidspalte beim 1.0943 können wegen des Sekundärglattschnitts nicht nach Norm ausgewertet werden. Bei den anderen beiden Blechwerkstoffen zeigen sich die erwarteten Effekte. Die Kanteneinzugshöhe und die Bruchhöhe verhalten sich proportional und die Glattschnittsowie die Grathöhe antiproportional zum Schneidspalt. Bei höherem Schneidspalt wird ein größeres Moment induziert, welches den Kanteneinzug vergrößert. Durch das höhere Moment wird ebenfalls ein höherer Spannungszustand im Blech erreicht, was einen frühen Bruch und damit eine hohe Bruchhöhe verursacht. Der Glattschnitt zeigt durch den frühen Bruch abnehmende Tendenzen. Der Grat ist bei kleineren Schneidspalten tendenziell höher, da der Werkstoff länger fließen kann und sich daher mehr Grat ausbildet.

Abbildung 8.11 zeigt die Schnittflächenausprägung in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung bei den in der Versuchsreihe Schwingungsverhalten untersuchten Blechwerkstoffen.

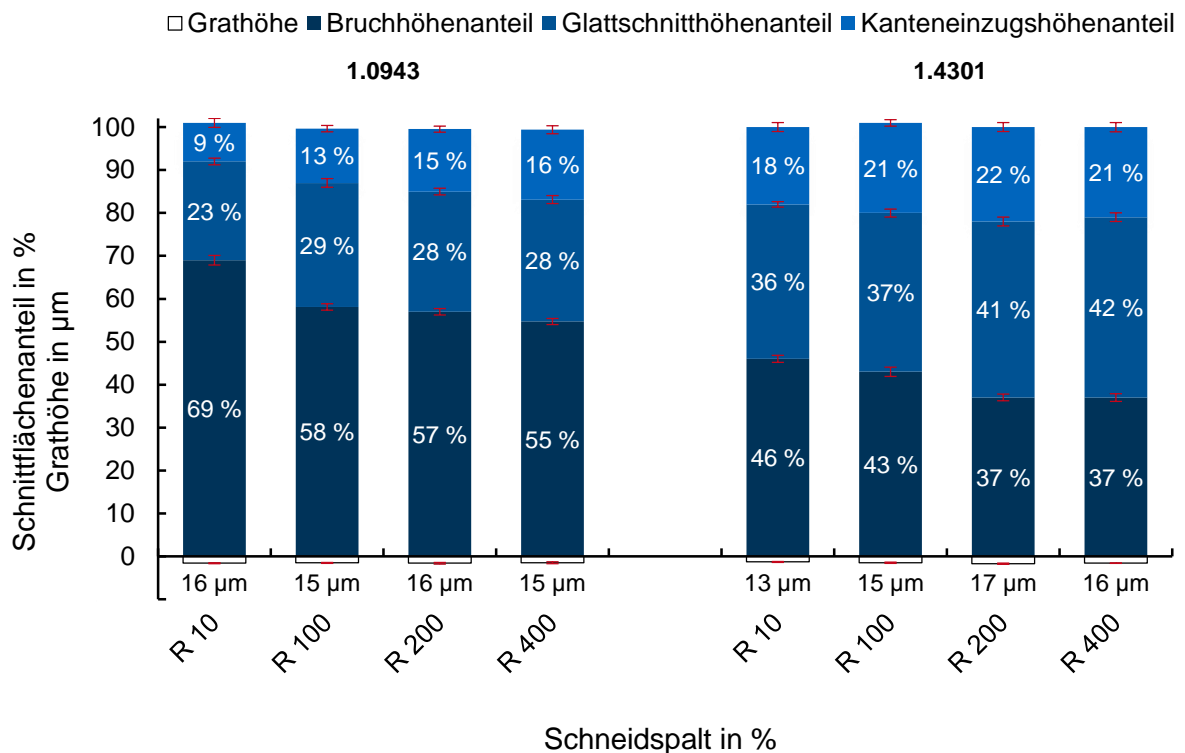


Abbildung 8.11: Schnittflächenkenngrößen der Versuchsreihe Stempelschwingungen
Schneidparameter: L120 | S15 | K0

Eine höhere Schneidkantenverrundung am Stempel hat im Anschnitt den gleichen Effekt wie ein größerer Schneidspalt, da sich das Blech zunächst nicht am Radius anschmiegt. Daher steigt der Kanteneinzug mit größerer Schneidkantenverrundung an. Im weiteren Verlauf wird durch den Radius eine höhere Druckspannung in das Blech eingebracht, was den Spannungszustand in Bezug auf Zugspannungen kompensiert und damit die Schubbruchgrenze später erreichen lässt. Daher wird bei höherer Verrundung ein größerer Glattschnittanteil und ein geringerer Bruch erreicht (Hörmann, 2008, S. 96 ff.). Der Schneidkantenzustand des Stempels hat hier keinen Einfluss auf die Gratausbildung am Stanzgitter. Eine Verrundung an der Schneidkante führt zu höheren Druckspannungen in der Scherzone, was ein längeres Fließen begünstigt und dadurch einen höheren Grat hervorruft. Durch die scharfkantige Ausbildung der Matrzenschneidkante wird hier allerdings ein Fließen des Werkstoffs über die Matrzenschneidkante und damit eine Gratbildung allerdings weitgehend verhindert.

Bei einer größeren Schneidkantenverrundung verkleinert sich auch der Durchmesser der Lochung im Stanzgitter. Der Stempeldurchmesser betrug 19,986 mm. Die Lochdurchmesser wurden mittels der in Kapitel 5 beschriebenen Koordinatenmessmaschine taktil durch einen Messtaster mit einer Rubinkugel mit 1 mm Durchmesser in der Mitte des Glattschnitts aufgenommen. Die aufgenommenen Messwerte sind in Abbildung 8.12 dargestellt.

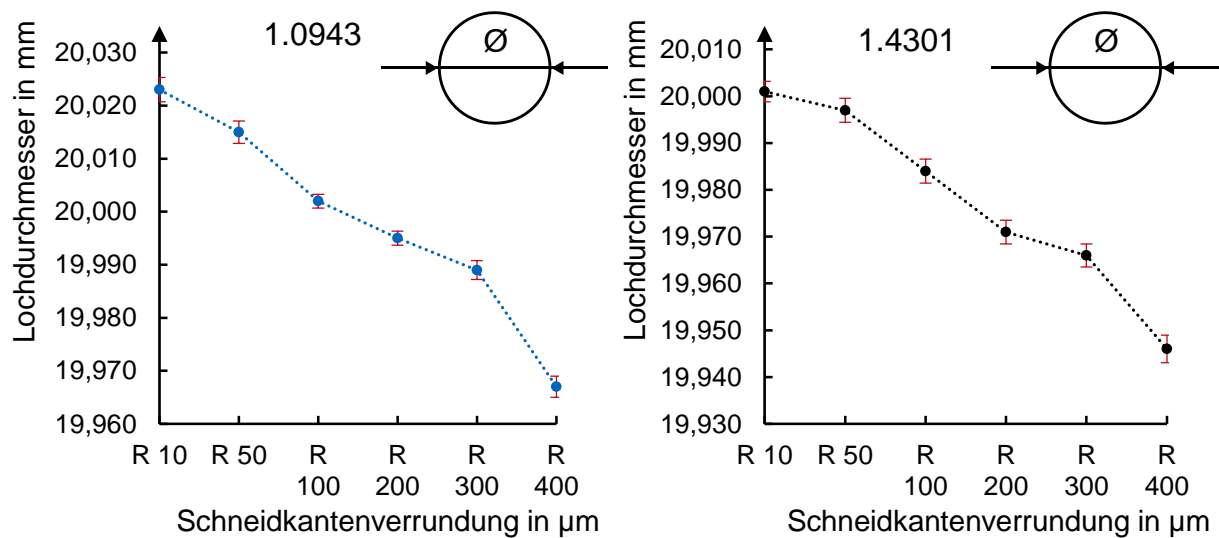


Abbildung 8.12: Lochdurchmesser in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943 und 1.4301

Schneidparameter: L120 | S15 | K0

Auch hier wirkt die erhöhte Druckspannung bei größerer Verrundung insofern als das sich das Loch nach Durchbruch bei größerer Schneidkantenverrundung stärker kontrahiert. Grundsätzlich steigen die Rückzugskräfte am Stempel durch die höhere Pressung zwischen Lochung und Stempel durch den erhöhten Glattschnittanteil und das engere Loch an. Ebenso wirkt eine engere Pressung zwischen Stempel und Lochung dämpfend auf Schwingungen des Stempels.

8.3 Kraftmessungen am Schneidstempel

Die Messungen der Kräfte am Stempel beim Lochen fanden mit den in Kapitel 7 auf den Stempel applizierten beschriebenen DMS-Vollbrückenschaltungen und mittels Piezokraftsensor (PKS) statt. Im Folgenden werden die Einflüsse auf die Ergebnisse der Kraftmessungen präsentiert und diskutiert.

8.3.1 Einfluss des Blechwerkstoff

In Abbildung 8.13 (links) sind die Schneidkraft-Zeitkurven beim Schneiden der drei Blechwerkstoffe dargestellt.

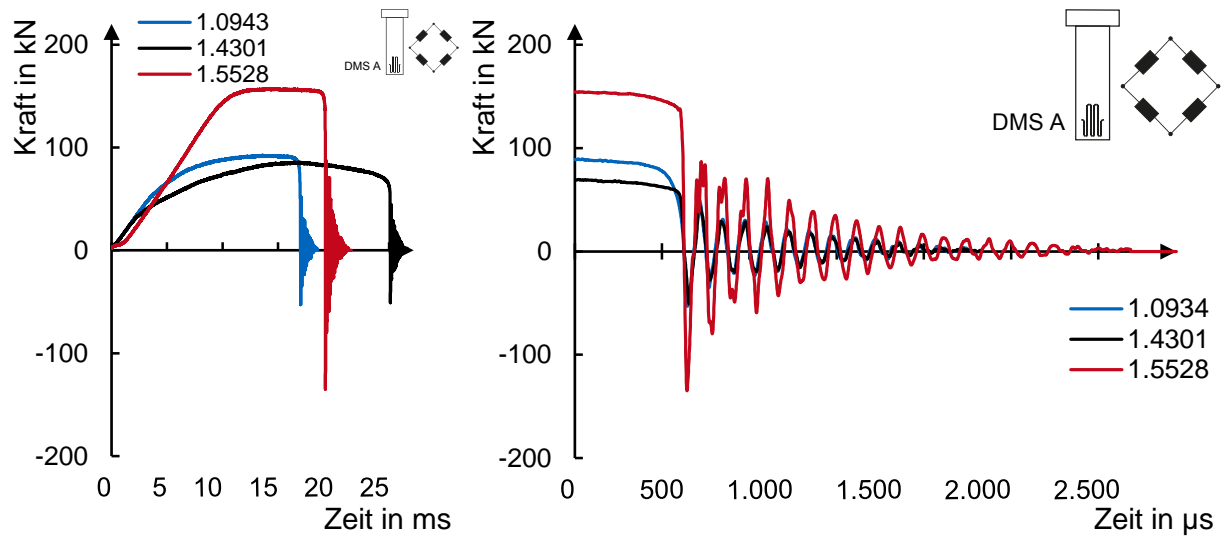


Abbildung 8.13: Schneidkraft-Zeit-Kurven von Messstelle DMS A in Abhängigkeit der Blechwerkstoffe (links). Ausschwingensignale der Messstelle DMS A in Abhängigkeit der Blechwerkstoffe (rechts)
 Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Das globale Schneidverhalten der Blechwerkstoffe korreliert teilweise mit den in Kapitel 6.1 dargestellten Spannungs-Dehnungskurven der Blechwerkstoffe. Der 1.0943 bricht bei den vorliegenden Schneidparametern am schnellsten. Der 1.5528 hingegen bricht beim Lochen später als der 1.0943, obwohl er eine Bruchdehnung von 5,5 % im Gegensatz zur weit höheren Bruchdehnung des 1.0943 in Höhe von ca. 20 % aufweist. Allerdings ist in der Schneidkraft-Zeit-Kurve des 1.5528 ein Kraftplateau mit einer Dauer von ca. 10 ms erkennbar, welches beim 1.0943 nicht auftritt. Die Schneiddauer eines Werkstoffs kann somit nicht mit der Bruchdehnung korreliert werden. Im Zugversuch spröde Werkstoffe brechen beim Lochen nicht unbedingt schneller als relativ gesehen im Zugversuch duktilere Werkstoffe. Ebenso lässt sich die Dauer bis zum Bruch nicht durch die Bruchhöhe feststellen. In den Schnittflächenkenngrößen weist der 1.5528 bei den hier diskutierten Schneidparametern eine Bruchhöhe von 79 % auf, während der 1.0943 eine Bruchhöhe von 69 % und der 1.4301 eine Bruchhöhe von 46 % aufweist (siehe Abbildung 8.10). Obwohl der 1.5528 eine größere Bruchhöhe aufweist als der 1.0943 bricht er später. Bei fortschreitender Zeitdauer während des Schneidprozesses wird der Stempel durch den Stößel zwangsgesteuert immer weiter in Richtung des unteren Totpunkts gedrückt. Ein Kraftplateau im DMS-Signal bedeutet eine konstante Stauchung des Schneidstempels. Da der Schneidstempel den Zwangsdruck des Stempels also nicht durch Stauchung ausgleicht, muss er weiter in das Blechmaterial eindringen, wobei er eine konstante Kraft erfährt. Die Verfestigung des 1.5528 unter Schubbeanspruchung gleicht also die Verringerung des Schneidwiderstands durch die Querschnittsabnahme während des Eindringens des Schneidstempels aus.

Die Ausschwingensignale in Abbildung 8.13 beim 1.0943 und beim 1.4301 liegen nahezu übereinander. Das bedeutet, dass in beiden Fällen die gleiche Anregungsenergie den Stempel in die freie Schwingung versetzt hat.

8.3.2 Einfluss der Messposition

Neben dem Werkstoffeinfluss hat auch die Position und die Art des Kraftmessensors Einfluss auf die Ausprägung des Ausschwingensignals. Abbildung 8.14 zeigt die Messsignale von drei unterschiedlichen Messpositionen.

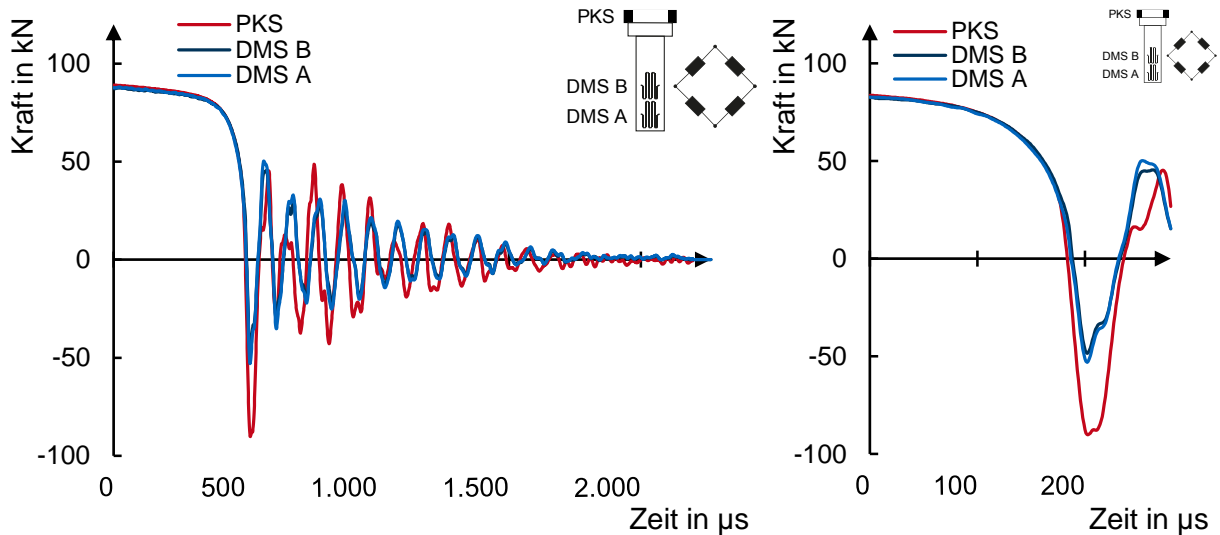


Abbildung 8.14: Ausschwingensignale in Abhängigkeit der Messposition beim Schneiden von 1.0943 (links). Vergrößerte Darstellung (rechts)
 Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Im quasistatischen Bereich zeigen alle drei Sensoren an den jeweiligen Messpositionen das gleiche Signal an. Während des Ausschwingens zeigt sich, dass alle drei Sensoren in einer ähnlichen Eigenfrequenz schwingen. Der PKS zeigt eine etwas geringere Frequenz als die beiden DMS. Dies ist durch den Distanzklotz zwischen Stempel und PKS zu erklären, der eine Länge von ca. 12 mm hat und damit die an der Kraftmessdose angeflanschten einfach eingespannten Schwingungslänge auf 132 mm erhöht, was eine rechnerische Eigenfrequenz nach Gleichung 2.25 von 9947 Hz ergibt. Eine Schwingungslänge von 120 mm hat eine rechnerische Eigenfrequenz von 10942 Hz. Die gemessene Frequenz des PKS beträgt 9346 Hz. Die gemessene Frequenz am Stempel 9524 Hz. Die gemessene Frequenz am PKS ist geringer als die gemessene am Stempel, was sich in der Tendenz auch in der Rechnung zeigt und physikalisch sinnvoll ist.

Es zeigt sich in Abbildung 8.14 (rechts), dass mit größer werdendem Abstand von der Stempelkante das Signal kleiner wird. Das lokale Schwingungsverhalten des Stempels direkt an der Schneidkante ist im Vergleich zum Schwingungsverhalten höherer Ebenen verändert, da sich wie in Kapitel 8.2 erläutert die Schneidkraft nur auf eine schmale Ringzone aufprägt. Kurz bevor Durchbruch ist der Bereich des Stempels um die Schneidkante daher stärker gedehnt als die Stempelachse. Diese Dehnung setzt sich unter quasistatischer Belastung in gleichem Maße weiter nach oben fort, da die lokalen Steifigkeiten unter Druckbeanspruchung keinen Unterschied auf der Manteloberfläche aufweisen. Jedes lokale Element auf der Stempelmantelfläche bis zur Schneidkante hat gleiche geometrische Bedingungen. Die Schneidkante wird durch die Stützwir-

kung des Blechs versteift. Nach Durchbruch allerdings entfällt die Stützwirkung des Blechs und es ergibt sich ein gradueller Steifigkeitsunterschied ausgehend von der Schneidkante nach oben. Ebenfalls nimmt die Signalamplitude der Entlastungswelle durch die Werkstoffdämpfung nach oben hin ab. Diese Effekte führen zu einem Amplitudenunterschied zwischen DMS A und DMS B.

8.3.3 Einfluss der Schneidparameter

Der Einfluss der Schneidparameter auf die Ergebnisse von Kraftmessungen beim Lochen ist bedeutend. Im Rahmen dieser Arbeit wurde insbesondere der Schneidspalt variiert. Abbildung 8.15 zeigt die Ausschwingssignale beim Schneiden der drei Blechwerkstoffe für die untersuchten Schneidspalte. Oben links ist der Überblick für den 1.0943 dargestellt. Die anderen drei Diagramme zeigen dann den Ausschnitt des Ausschwingens.

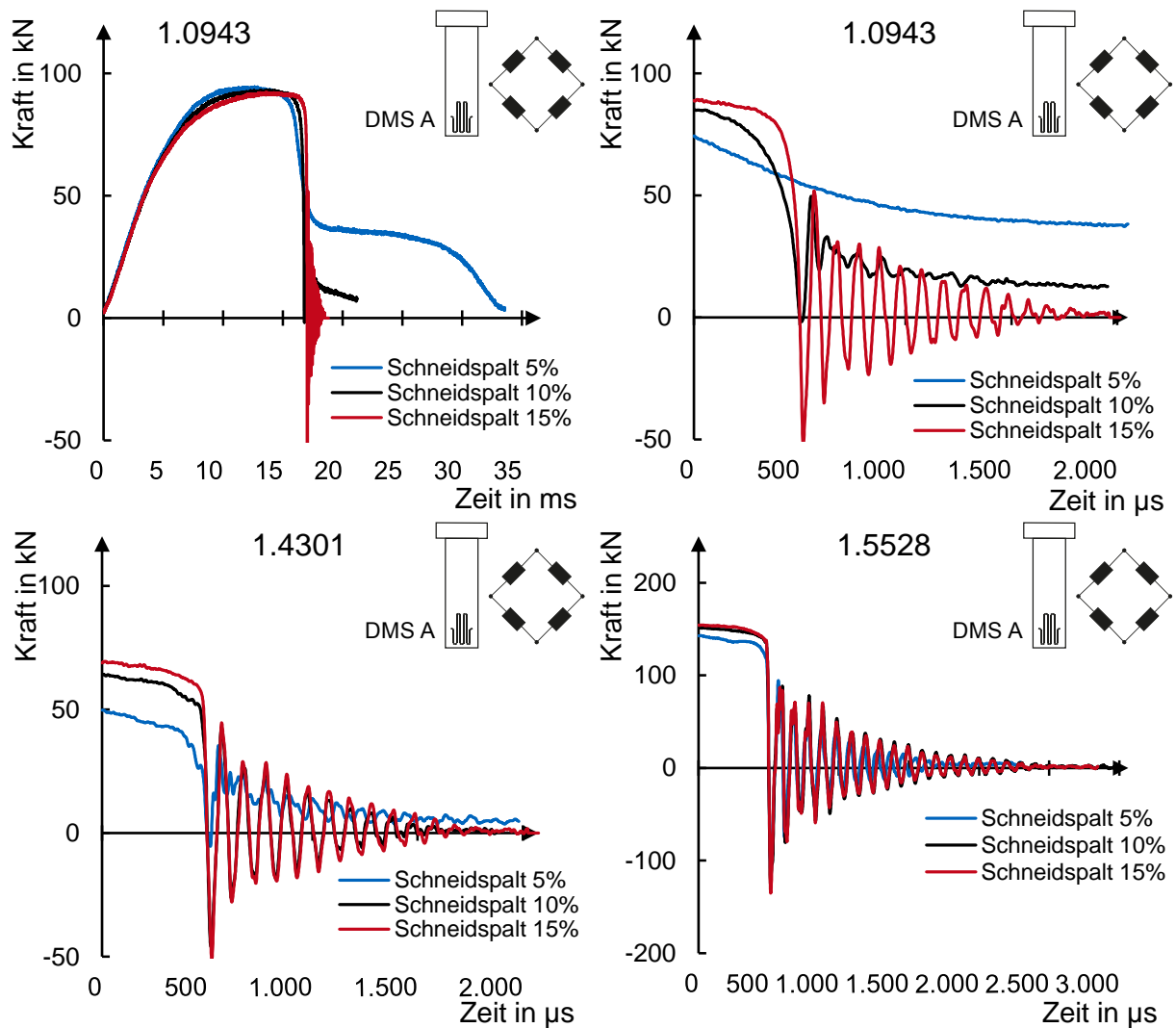


Abbildung 8.15: Ausschwingssignale der Messstelle DMS A in Abhängigkeit des Schneidspalts für die untersuchten Blechwerkstoffe
 Schneidparameter: L120 | R10 | K0

Die Signale korrelieren dabei mit den durch taktile und optische Untersuchungen festgestellten Ausprägungen der Schnittflächen. Siehe dazu die Abbildungen 8.8, 8.9 und 8.10. Der 1.0943 zeigt beim Schneidspalt 5 % wegen des ausgeprägten Sekundärglattschnitts keinen Bruch und damit kein Ausschwingen, sondern eine Kurve nach Art einer Überdämpfung. Bei einem Schneidspalt von 10 % lässt sich ein geringes Ausschwingen feststellen, was in Bezug auf Amplitude und Zeit jedoch stark abgedämpft wird. Dies ist wiederum auf den ebenfalls entstehenden Sekundärglattschnitt zurückzuführen. Beim 1.4301 zeigt sich schneidspaltabhängig eine Abdämpfung bei kleineren Schneidspalten, was auf die Vergrößerung des Glattschnitts und damit der Reibfläche zurückzuführen ist. Es kann also wie aus der klassischen Schwingungslehre bekannt eine Schneidparameterkonfiguration für viele Werkstoffe gefunden werden, die eine Dämpfung verursacht, die einen aperiodischen Grenzfall erzeugt. Beim 1.5528 ist keine merkliche Abdämpfung in Abhängigkeit des Schneidspalts erkennbar. Wegen der hohen Sprödigkeit des Werkstoffs müsste für eine Dämpfungswirkung des Stanzgitters eine wesentliche Verringerung des Schneidspalts vorgenommen werden.

8.4 Ermittlung der Prozesskräfte

8.4.1 Maximale Schneidkraft

Die Ermittlung der maximalen Schneidkraft beim Scherschneiden ist ein vielfach angewendetes Standardverfahren. Sie ist vor allem notwendig zur Auslegung von Werkzeugen, Peripherie und Scherschneidprozess. Abbildung 8.16 zeigt schematisch wie die maximale Schneidkraft aus einem Kraft-Zeit- (links) oder Kraft-Weg-Diagramm (rechts) entlesen werden kann.

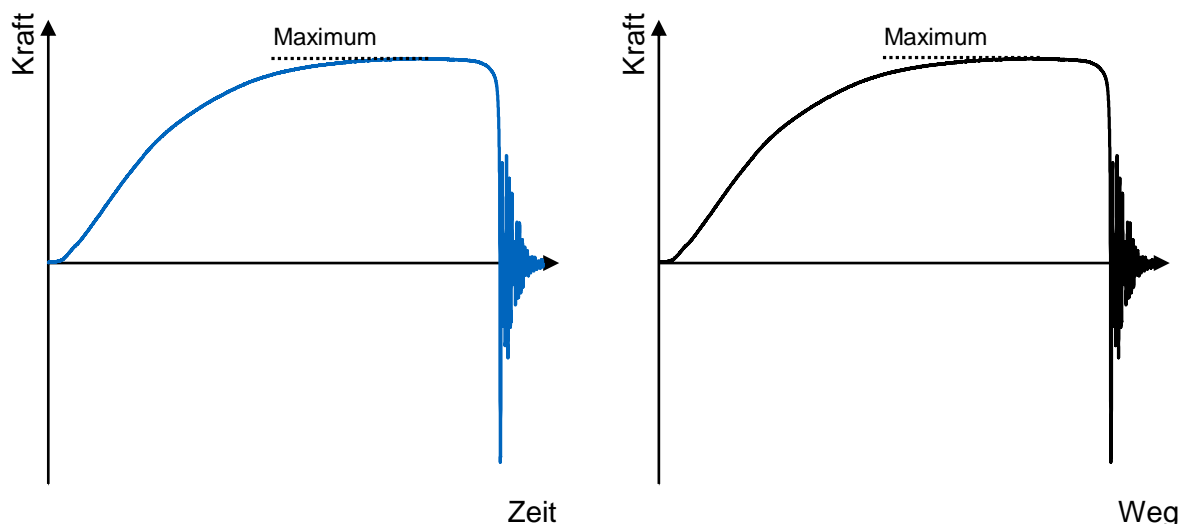


Abbildung 8.16: Bestimmung der maximalen Schneidkraft bei zeit- oder wegabhängiger Messung

Graphisch ist das Maximum der gemessenen Kraft einfach zu identifizieren, indem eine Linie parallel zur Abszisse, die die Zeit- oder Wegachse darstellt, durch den höchsten Punkt der Kurve gelegt und zur Ordinate verlängert wird. Die dort abgelesene Kraft ist die maximale Schneidkraft.

Mathematisch lässt sich das Maximum einer Kurve durch Bildung und Nullsetzen der ersten Ableitung finden. Bei Vorliegen von diskreten Datenpunkten ist eine Kurve zu interpolieren.

Die in Kapitel 2.1.4 aufgeführte *Gleichung 2.1* zum Abschätzen der maximalen Schneidkraft wurde zusammen mit *Formel 2.1* verwendet, um die in Tabelle 8.2 berechneten zu erwartenden maximalen Schneidkräfte beim Schneiden der untersuchten Blechwerkstoffe zu finden.

Tabelle 8.2: Berechnete maximal zu erwartende Schneidkräfte

Werkstoff	Zugfestigkeit in MPa (0°-Lage)	Maximale Schneid- kraft in kN
1.0943	776	80
1.4301	634	64
1.5528	1463	147

Da sich die verwendeten Blechwerkstoffe und das Experiment in den in *Gleichung 2.1* und *Formel 2.1* verwendeten Parametern nur durch die Zugfestigkeit unterscheiden, sind die berechneten maximalen Schneidkräfte proportional zur Zugfestigkeit der Blechwerkstoffe.

8.4.2 Durchbruchkraft

Die Ermittlung der Durchbruchkräfte beim geplanten Versuchsprogramm wird nach dem in Kapitel 4 vorgestellten und im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren vorgenommen.

In Abbildung 8.17 (links) ist das Ausschwingensignal der Messstelle A nach Durchbruch beim Loches des 1.0943 mit 15 % Schneidspalt und 10 μm Schneidkantenradius zu sehen. In Abbildung 8.17 (rechts) ist der Ausschnitt dargestellt in dem sich die Differenz der beiden Messstellen zeigt. Diese Differenz ist auf die Entlastungswelle nach Durchbruch zurückzuführen. Beim Auftreten einer Differenz beider Messstellen ist also im vorliegenden Versuchsaufbau der Durchbruch geschehen.

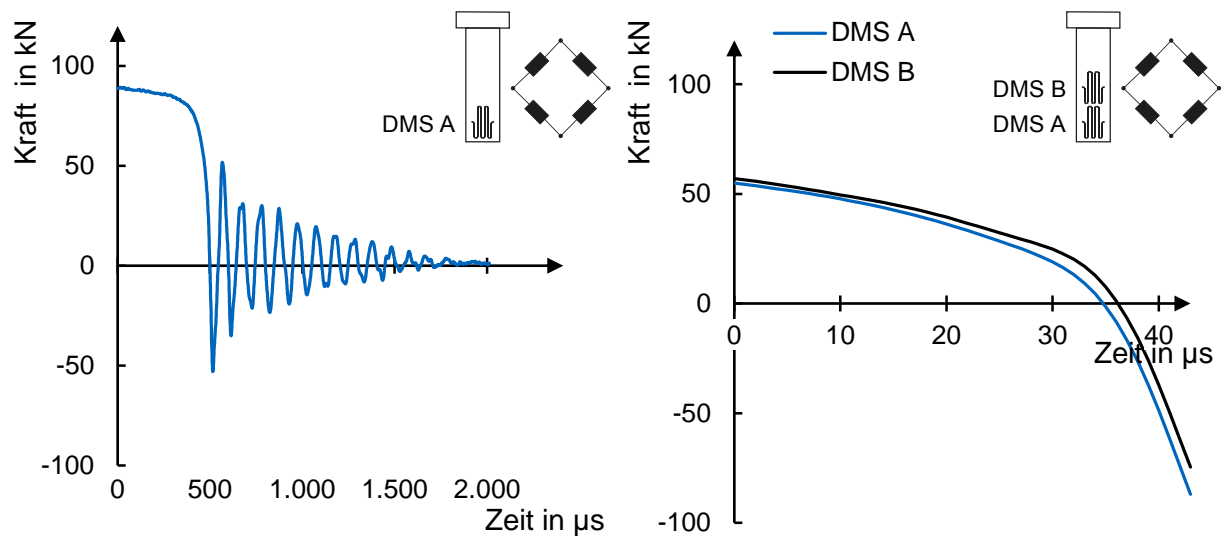


Abbildung 8.17: Ausschwingverhalten (links) und Bruchverhalten (rechts) beim Lochen von 1.0943

Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Erkennbar ist vor allem in Abbildung 8.17 (rechts) das qualitative Durchbruchverhalten des 1.0943. Vor dem Durchbruch fällt die Schneidkraft nahezu linear ab und der Durchbruch schließt sich ohne auffällige Veränderung im Verlauf der Kraftkurve an. Die untere Messstelle entlastet sich vor der oberen Messstelle, da sich der Stempel von unten nach oben entlastet. Qualitativ zeigen beide ein ähnliches Entlastungssignal. Die Amplitude von Messstelle B ist allerdings wegen der Werkstoffdämpfung, die die Entlastungswelle auf der Strecke von Messstelle A zu Messstelle B erfährt, schon verringert. Das Entlastungssignal an beiden Messstellen zeigt den charakteristischen Verlauf mit weicher Krümmung einerseits wegen der Massenträgheit des Stempels und auch wegen der Zeitkonstante der verwendeten Messkette. Nach Krümmung des Signals nach unten beschleunigt sich die Entlastung an der jeweiligen Messstelle bis zum Dehnungsmaximum, nach welchem sich das Signal umkehrt und zur Kontraktion des Stempels führt. Dies wiederholt sich jeweils mit immer kleiner werdenden Amplitude bis die Schwingung abgeklungen ist. Zu sehen ist dieses Ausschwingen wiederum in Abbildung 8.17 (links).

In Abbildung 8.18 (rechts) ist der Entlastungsvorgang beim Durchbruch des 1.4301 zu sehen.

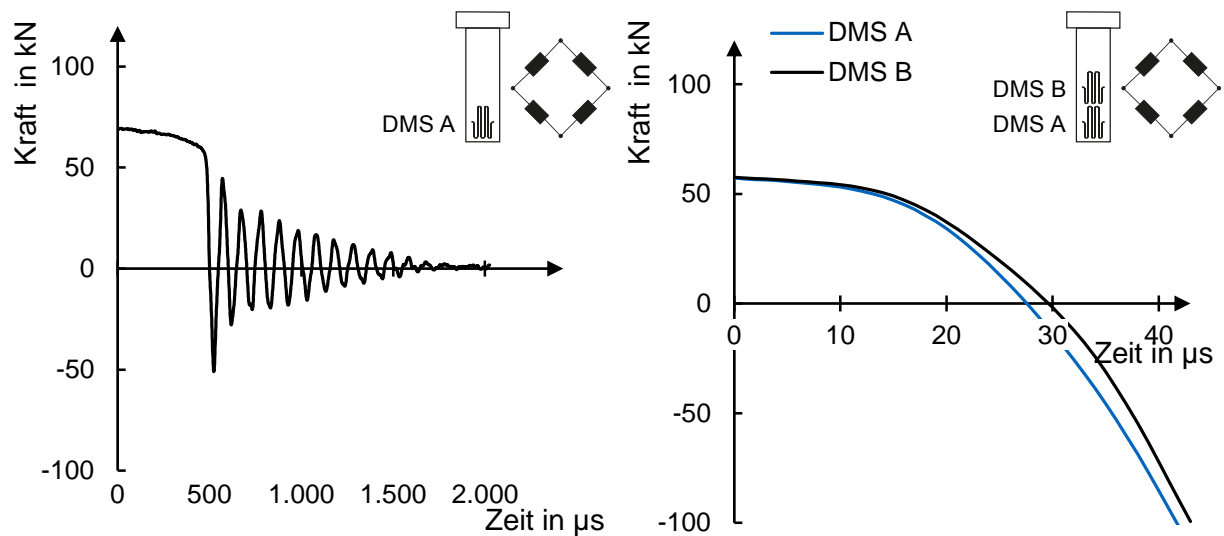


Abbildung 8.18: Ausschwingverhalten (links) und Bruchverhalten (rechts) beim Lochen von 1.4301

Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Beim Durchbruch des 1.4301 zeigt sich ein weniger starker Abfall der Schneidkraft im quasi-statischen Bereich bis zum Bruch als beim 1.0943. Der 1.4301 zeigt eine stärkere Verfestigung kurz vor Bruch und ein ruckartigeres Bruchverhalten als der 1.0943, was sich auch in den Kraftverläufen aus dem Zugversuch zeigt. Der 1.0943 ist insgesamt zwar spröder als der 1.4301, was bedeutet, dass er früher bricht. Allerdings bricht der 1.4301 trotz höherer Duktilität plötzlich. Die Entlastungszeit vom Bruch bis zum Dehnungsmaximum und das Dehnungsmaximum des Stempels sind jedoch nahezu gleich beim 1.0943 und beim 1.4301. Die Schlussfolgerung aus diesem Umstand, dass bei beiden Blechwerkstoffen die gleiche Anregungsenergie zur Schwingung führt, wurde schon weiter oben dargelegt. Das Ausschwingensignal des 1.4301 ist in Abbildung 8.18 (links) zu sehen. Es zeigt sehr große Ähnlichkeit mit dem Signal in Abbildung 8.17 (links).

Abbildung 8.19 (rechts) zeigt den Entlastungsverlauf beim 1.5528.

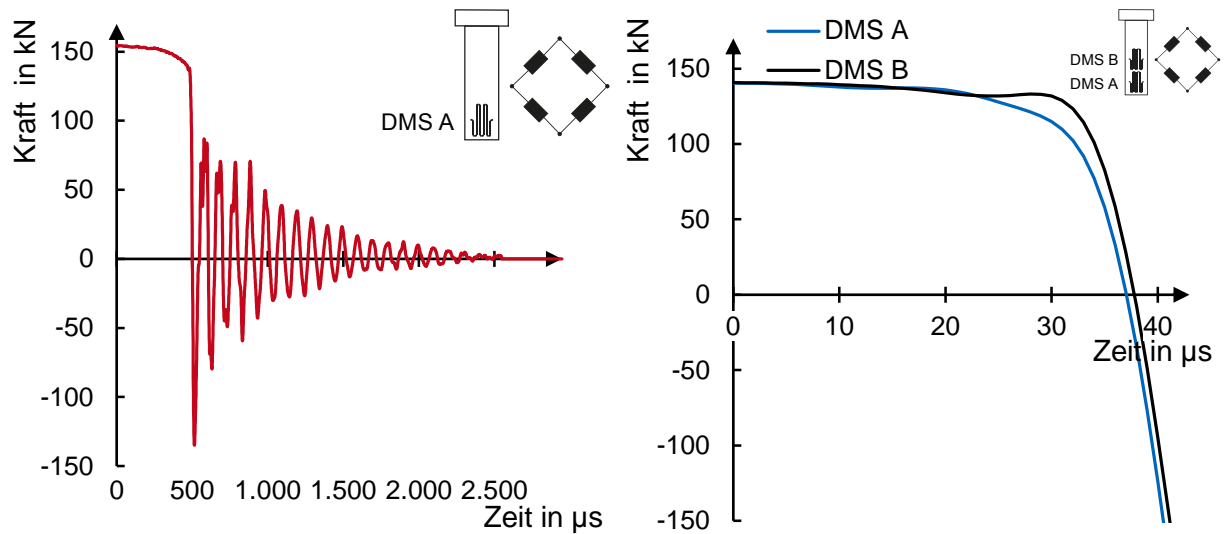


Abbildung 8.19: Ausschwingverhalten (links) und Bruchverhalten (rechts) beim Lochen von 1.5528

Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Durch die hohe Zugfestigkeit und die hohe Sprödigkeit zeigt sich hier auch eine schlagartige Entlastung des Schneidstempels. Wegen des starken Impulses zeigt Messstelle B sogar Ansätze einer höheren Oberschwingung durch das leichte Ausschwingen nach oben vor dem Signalabfall. Die Entlastung an sich verläuft wegen des starken Impulses sehr schnell und es wird eine sehr hohe Entlastungsamplitude erreicht.

Die Ermittlung der Durchbruchkraft wurde mit der in Kapitel 4 vorgestellten Methode vorgenommen. Dazu musste für die Auswertung der gewonnenen Messsignale ein Entscheidungskriterium für die Differenz zwischen den beiden DMS-Signalen A und B, ab der ein Bruch angenommen wurde, aufgestellt werden. Die Vorgehensweise dazu wird exemplarisch an Hand von Messdaten beim Schneiden des Werkstoffs 1.0943 in Abbildung 8.20 aufgezeigt.

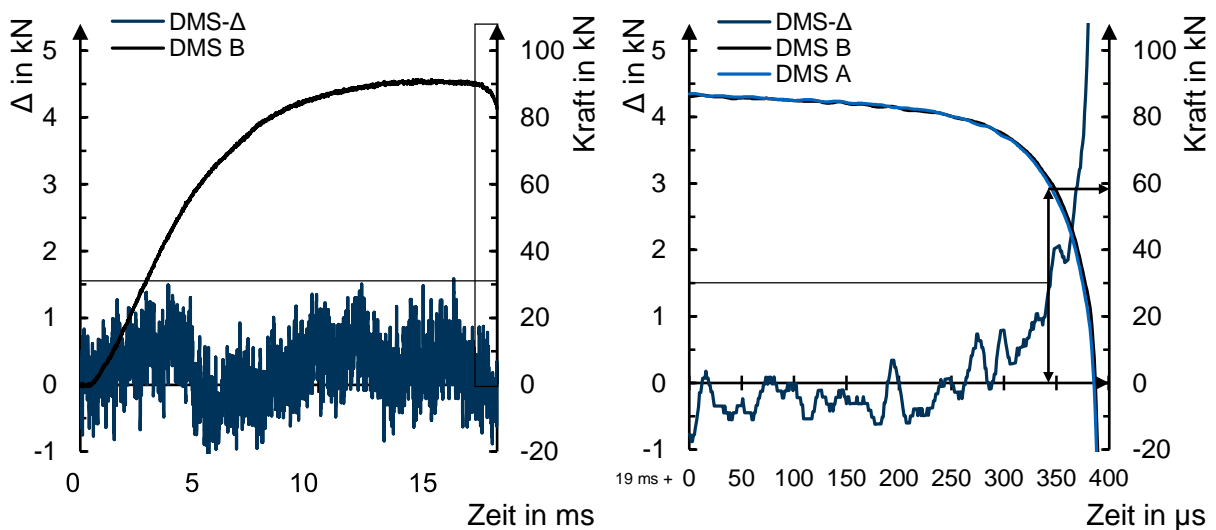


Abbildung 8.20: Auswertungsmethodik der Messdaten zur Ermittlung der Durchbruchkraft

Zunächst muss ein Kriterium für den Schwellenwert der Differenz, ab dem ein Bruch festgestellt werden kann, gefunden werden. Da die DMS-Signale einem natürlichen Rauschen unterliegen, wurde das Rauschen der Differenz während der quasistatischen Stempelbelastung ermittelt. Dieses Rauschen bewegte sich mit der verwendeten Messkette im Bereich zwischen -1 kN und 1,5 kN mit wenigen Ausreißern nach oben. Daher wurde der Schwellenwert, um einen Einfluss des Rauschens auszuschließen auf 2 kN festgelegt. Für eine andere Messkette muss dieser Schwellenwert individuell bestimmt werden. Ab dem Erreichen dieses Schwellenwerts und einer steigenden Tendenz wurde die entsprechende Zeit als Bruchzeit definiert. Die Kraft an der Messstelle DMS B zur Bruchzeit wurde als Durchbruchkraft definiert. Die Durchbruchkraft konnte auch graphisch durch das Trennen der beiden Kraftkurven ermittelt werden. Graphische und mathematische Ermittlung ergaben durchgehend gleiche Ergebnisse. Eine Kompensation der Bruchzeit auf die wahre Bruchzeit, die wegen der Entfernung der Messstelle A von der Schneidkante vor dem Auftreten des Schwellenwerts lag, erfolgte nicht, da die Laufzeit der Entlastungswelle von der Schneidkante zur Messstelle A unter $4 \mu\text{s}$ lag und diese Zeitdifferenz eine unerhebliche Kraftdifferenz erzeugte und außerdem bei Bedarf einfach errechnet werden kann.

$$\delta(t) > 2 \rightarrow t = t_{DB} \quad (\text{Formel 8.2})$$

$$F_{DB} = F(t_{DB}) \quad (\text{Formel 8.3})$$

8.4.3 Ergebnisse der Prozesskraftmessungen

In Abbildung 8.21 sind die nach den vorgestellten Methoden ausgewerteten maximalen Schneidkräfte und die Durchbruchkräfte beim Schneiden der untersuchten Blechwerkstoffe in Abhängigkeit des Schneidspalts dargestellt. Die geringen statistischen Abweichungen in der einfachen Standardabweichung vom Mittelwert zeigt, dass die Auswertemethoden robuste Ergebnisse liefern.

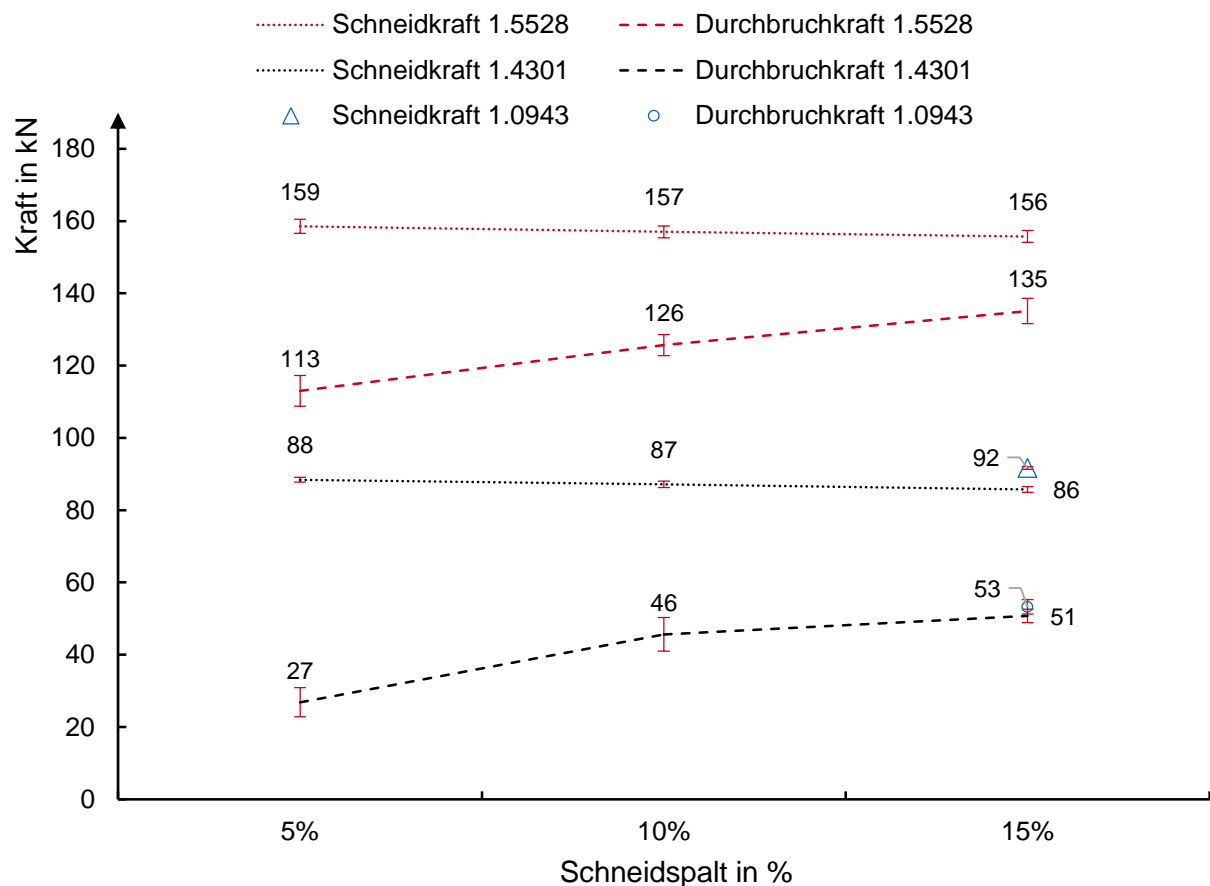


Abbildung 8.21: Maximale Schneid- und Durchbruchkräfte in Abhängigkeit von Werkstoff und Schneidspalt (Neumayer und Volk, 2018, S. 49)

Die maximale Schneidkraft nimmt mit steigendem Schneidspalt ab und die Durchbruchkraft steigt mit steigendem Schneidspalt bei jedem untersuchten Werkstoff an. Für den 1.0943 konnte nur der Schneidspalt von 15 % ausgewertet werden, da bei kleineren Schneidspalten der Bruchzeitpunkt auf Grund von Sekundärglattschnitt nicht mehr eindeutig feststellbar war.

Die Durchbruchkräfte liegen bis zu 70 % unter den maximalen Schneidkräften und reagieren mit einer weitaus größeren Sensitivität auf Veränderungen des Schneidspalts. So fällt die Schneidkraft beim 1.5528 um lediglich 2,5 % (4 kN) bei einer Schneidspaltvergrößerung von 5 auf 15 % ab und die Durchbruchkraft steigt um 19,5 % (22 kN) an. Ausgeprägter ist dieser Effekt noch beim 1.4301 mit einem Abfall der maximalen Schneidkraft um 2,3 % (2 kN) und einem Anstieg um 89 % (24 kN) der Durchbruchkraft.

Wie in Abbildung 8.10 zu sehen führt ein steigender Schneidspalt zu einer Abnahme des Glattschnitts und zu einer Zunahme des Bruchflächenanteils. Die abnehmende maximale Schneidkraft bei steigendem Schneidspalt ist durch die Zunahme der Zugspannungen durch das höhere Moment im Blech zu erklären, was durch die Addition der entstandenen Zugspannungen ein früheres Überschreiten der Schubbruchgrenze verursacht.

Die zunehmende Durchbruchkraft erklärt sich durch den steigenden Bruchflächenanteil mit zunehmendem Schneidspalt. Eine größere Restdicke, die im Blech durchbrochen werden muss, führt zu einer höheren Kraft. Beziehungsweise bricht das Blech bei einem größeren Schneidspalt und damit einem geringeren Glattschnitt durch, während noch eine relativ große Kraft anliegt.

Wie schon in Kapitel 8.3.1 vermutet haben die Blechwerkstoffe 1.0943 und 1.4301 in der betrachteten Parameterkonstellation die nahezu gleiche Durchbruchkraft. Die Werkstoffkennwerte und Schnittflächenkenngrößen zeigen jedoch keinen Hinweis auf dieses Phänomen und unterscheiden sich teilweise stark wie Tabelle 8.3 zeigt.

Mittels der ermittelten Durchbruchkraft kann auch eine genaue Angabe der Schneidarbeit nach Gleichung 2.2 erfolgen. Der Anteil zwischen Durchbruchkraft und Nulldurchgang wird dabei nicht in die Schneidarbeit aufgenommen, da der Bruch ja schon erfolgt ist. Allerdings ist der Beitrag in den üblichen Fällen vernachlässigbar klein.

Tabelle 8.3: Werkstoffkennwerte und Schnittflächenkenngrößen von 1.0943 und 1.4301 im Vergleich

Werkstoff	$R_{p0,2}$ in MPa	R_m in MPa	A_g in %	A_{80} in %
1.0943	558	776	13	21
1.4301	312	634	47	54

Werkstoff	Glattschnittflächenanteil in %	Bruchflächenanteil in %
1.0943	23	69
1.4301	36	46

Diese Erkenntnis weist somit auf eine sehr komplexes Zusammenspiel der Mechanismen, die zum Durchbruch im Schneidprozess und damit der Durchbruchkraft führen, hin. Eine empirische Bestimmung der Durchbruchkraft ist zumindest auf der vorliegenden Datenbasis mit den Standardkennwerten in der Umformtechnik in diesem Fall nicht ableitbar und Bedarf weiterer Forschungsanstrengungen.

8.5 Ermittlung der Schneidstempelbewegung

Nach erfolgtem Durchbruch entlastet sich das mechanische System aus Presse, Werkzeug und Stempel schlagartig. Der Gradient des Kraftabfalls hängt stark von den Schneidparametern und dem Bruchverhalten des Blechwerkstoffs ab. Bei genügend steilem Gradienten des Kraftabfalls beginnt das vormals unter Spannung stehende System bei fehlender äußerer Anregung in seinen durch die Entlastung angeregten Eigenfrequenzen zu schwingen. Der Stößel einer Schneidpresse vom Typ BSTA 25BL der Firma Bruderer weist dabei eine erste Eigenfrequenz in Bewegungs-

richtung des Stößels von 302 Hz auf (Hirsch, 2012, S. 79). Die Werkzeugplatte bei *Hirsch* wies eine Eigenfrequenz in Bewegungsrichtung des Stößels in Höhe von ca. 1200 Hz auf (Hirsch, 2012, S. 72). Die erste Eigenfrequenz eines zylindrischen Schneidstempels lässt sich dabei mit *Gleichung 2.24* bzw. durch *Gleichung 2.25* abschätzen. Das Schwingverhalten des Stempels lässt sich experimentell durch den in Kapitel 7 erklärten Messaufbau experimentell bestimmen oder mittels FEM-Simulation simulieren.

8.5.1 Eigenfrequenzen der Schneidstempel

Die Eigenfrequenzen der Stempel lassen sich nach verschiedenen Verfahren ermitteln. Einerseits können die Stempel als Zylinder betrachtet werden und die Eigenfrequenzen nach *Gleichung 2.24* und *Gleichung 2.24* errechnet werden. Andererseits können die Eigenfrequenzen simulativ oder aus den vorhandenen Messungen durch Ermittlung der Periodenzeit gewonnen werden. In Tabelle 8.4 sind die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten ersten Eigenfrequenzen des Stempels mit Zylinderkopf dargestellt. Die höheren Eigenfrequenzen haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Relativbewegungen des Stempels und wurden daher nicht ermittelt.

Tabelle 8.4: *Eigenfrequenzen in Hertz des zylindrischen Stempels*

	90 mm			120 mm		
	Rechnung	Messung	Simulation	Rechnung	Messung	Simulation
Fest	14.588	-	14.376	10.942	9.524	10.833
Frei	29.177	-	29.011	21.836	22.391	21.665

In Tabelle 8.5 finden sich die simulativ ermittelten Eigenfrequenzen der drei untersuchten Stempelkopfvarianten.

Tabelle 8.5: *Simulierte Eigenfrequenzen in Hertz der Stempel in Abhängigkeit der Kopfform (Frei)*

Zylinder	Kegel	Posaune
21.665	21.474	21.139

Zu erkennen ist der geringe Einfluss, des Stempelkopfes auf die Eigenfrequenzen der Schneidstempel. Da die Stempel trotz unterschiedlichen Kopfformen eine zylindrische Grundstruktur beibehalten, haben die Köpfe keinen großen Einfluss auf die Eigenfrequenzen.

8.5.2 Experimentell ermittelte Stempelbewegung

Die experimentelle Bestimmung des Stempelschwingverhaltens war einerseits notwendig, um die zur Optimierung des Kopfspiels notwendigen Simulationen kalibrieren zu können und andererseits lieferten die experimentell ermittelten Schwingungsuntersuchungen qualitative Aussagen

über das Stempelverhalten und die Auswirkungen von Schneidparametern auf dieses Verhalten. Die Messung des Stempelschwingverhaltens wurde mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Aufbau an der dort beschriebenen Messstelle C, die eine $2/4$ -Brücke darstellt, durchgeführt, um das Schwingverhalten direkt am Kopf zu erfassen. Mit diesem Aufbau konnte lediglich das Schwingverhalten beim Schneiden der Blechwerkstoffe 1.0943 und 1.4301 erfasst werden. Bei Messungen des Ausschwingens beim Blechwerkstoff 1.5528 war die Belastung auf die Lötstellen am DMS zu hoch.

In den folgenden Diagrammen sind lediglich die Ausschwingssignale dargestellt. Auf die Darstellung der Phasen I bis III wird weitgehend verzichtet, da vor allem das Ausschwingverhalten des Stempels von Interesse ist.

In Abbildung 8.22 sind die mit Messstelle C aufgenommenen Ausschwingssignale beim Schneiden der beiden Blechwerkstoffe 1.0943 und 1.4301 zu sehen. Wie schon in Kapitel 8.3.1 erläutert, bedeutet das nahezu deckungsgleiche Ausschwingverhalten, dass die Energie, die zur freien Schwingung des Stempels führt, einen nahezu gleichen Betrag aufweist und da die Energie durch die Durchbruchkraft bestimmt wird, brechen diese Blechwerkstoffe bei der verwendeten Schneidparameterkonfiguration bei der gleichen Kraft.

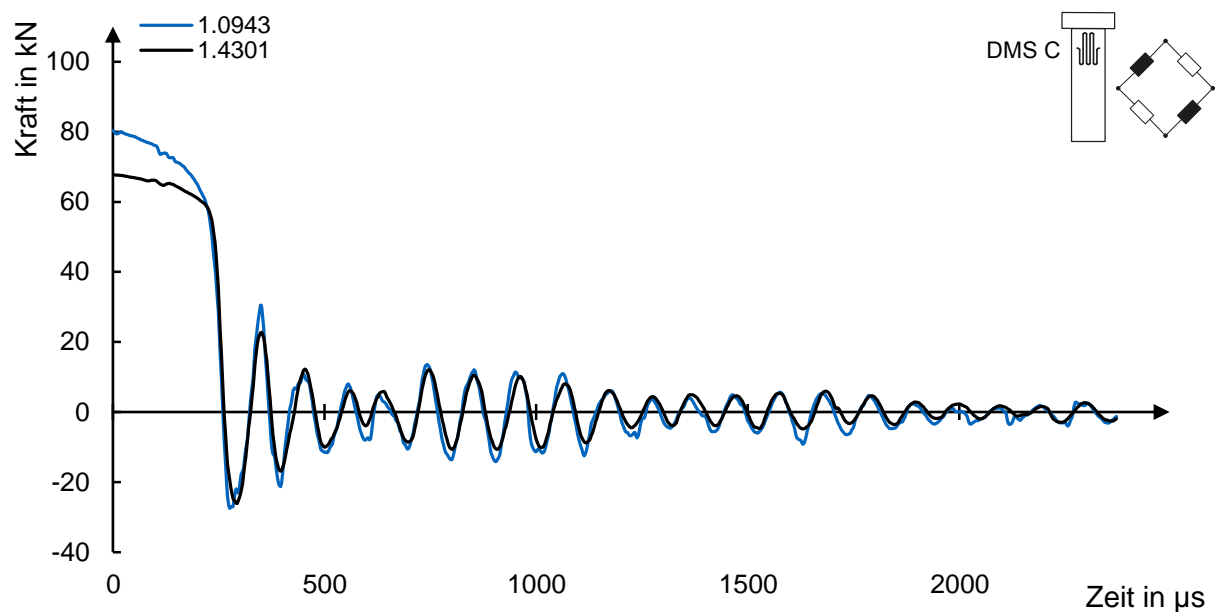


Abbildung 8.22: Ausschwingssignale am Stempel beim Lochen von 1.0943 und 1.4301
Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Die nahezu gleichen Ausschwingssignale beim Schneiden der beiden Blechwerkstoffe mit zwei verschiedenen Messaufbauten und das Ergebnis der Auswertung der Durchbruchkraft zeigen wiederum, dass zwei Blechwerkstoffe mit keinerlei Gemeinsamkeiten, was Materialkennwerte oder Zusammensetzung betrifft, bei gleichen Schneidparametereinstellungen die gleiche Durchbruchkraft aufweisen können.

Ebenso dient diese Messung zusammen mit der Messung an Messstelle A und der Auswertung der Durchbruchkraft auf Grund der Unabhängigkeit sowohl der Messverfahren als auch der Zeit und den Umständen, unter denen die Messungen stattgefunden haben, als Verifikation für das Auswerteverfahren zur Bestimmung der Durchbruchkraft. Gleicher Ausschwingvorgang bedeutet gleiche Durchbruchkraft bei sonst gleichen Parametern.

Einfluss der Schnittfläche

Durch Reibung am Stanzgitter während des Ausschwingvorgangs wird die Stempelschwingung abgedämpft. Die wirkende Reibungskraft am Stanzgitter ist bei Annahme einer Coulomb'schen Reibung nicht durch die Höhe des Glattschnitts, welcher bei normaler Schnittflächenausprägung die Reibfläche ist, sondern durch den Reibungskoeffizienten und die Normalkraft zwischen den Reibflächen bestimmt. Die Normalkraft wird durch die Passung zwischen Stempel und Loch bestimmt. Wie in Kapitel 8.2 gezeigt verengt sich die Lochung bei einer erhöhten Schneidkantenverrundung. Der Stempeldurchmesser an der Mantelfläche bleibt dagegen selbstverständlich im Rahmen des Verschleißes nahezu konstant. Eine Verengung des Lochs führt somit zu einer engeren Passung und zu höheren Reibungskräften. Höhere Reibungskräfte führen zu höheren Dämpfungen der Stempelschwingung. In Abbildung 8.23 sind die Ausschwingssignale beim Schneiden des 1.0943 mit verschiedenen Schneidkantenverrundungen dargestellt. Dabei war der Stempel fest eingespannt.

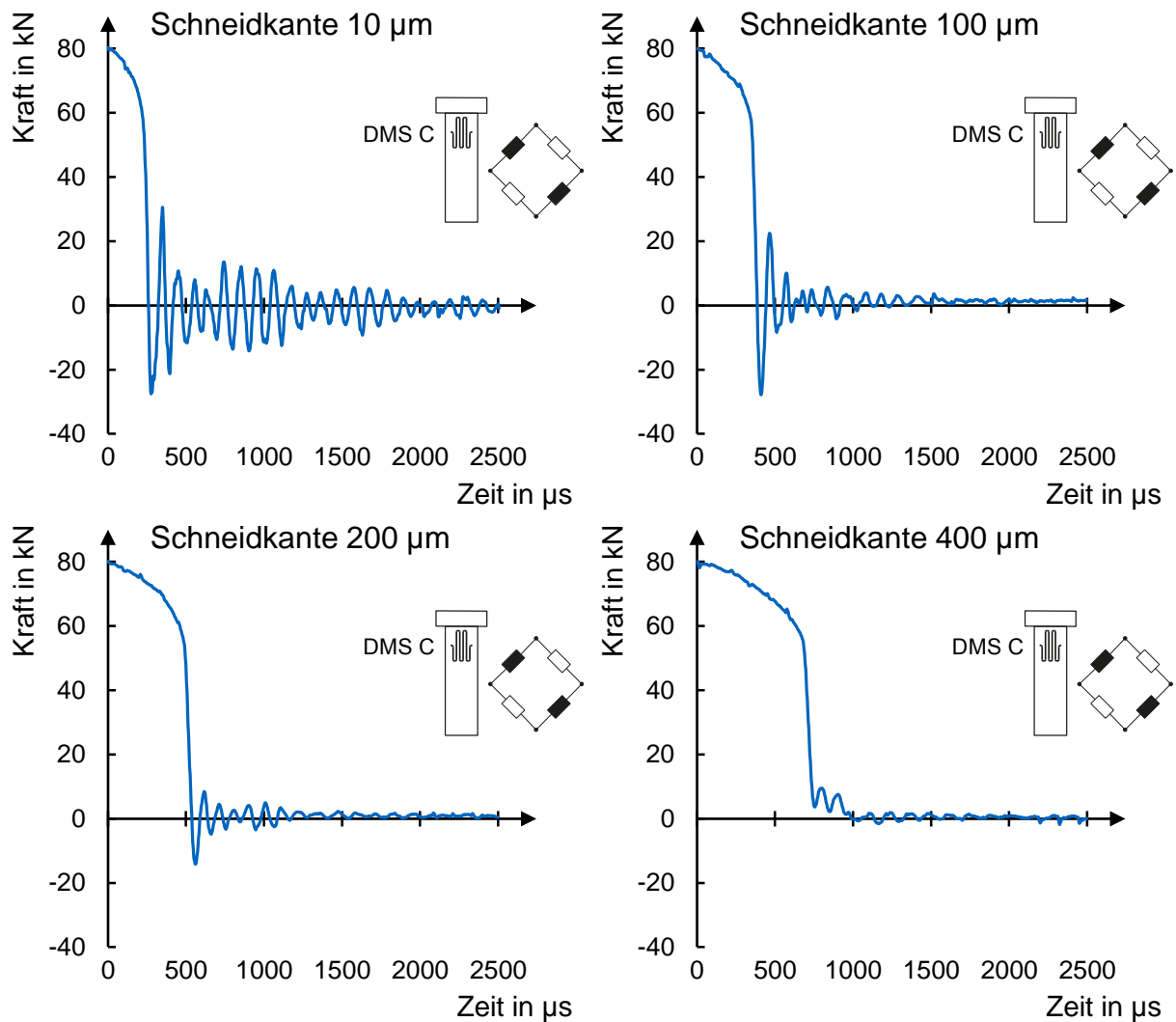


Abbildung 8.23: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943
 Schneidparameter: L120 | S15 | K0

Zu erkennen ist eine deutliche Dämpfung der Schwingung mit größerer Schneidkantenverrundung am Stempel. Wie in Kapitel 8.2 aus Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 ersichtlich ist, vergrößert sich der Glattschnitt und verkleinert sich die Lochung bei höheren Kantenverrundungen am Stempel. Diese Effekte führen zu einer höheren Reibung der Stempelmantelfläche im Stanzgitter und damit zu einer höheren Dämpfung des Ausschwingvorgangs. In Abbildung 8.24 ist das Ausschwingen des Stempels beim Schneiden des 1.4301 zu sehen.

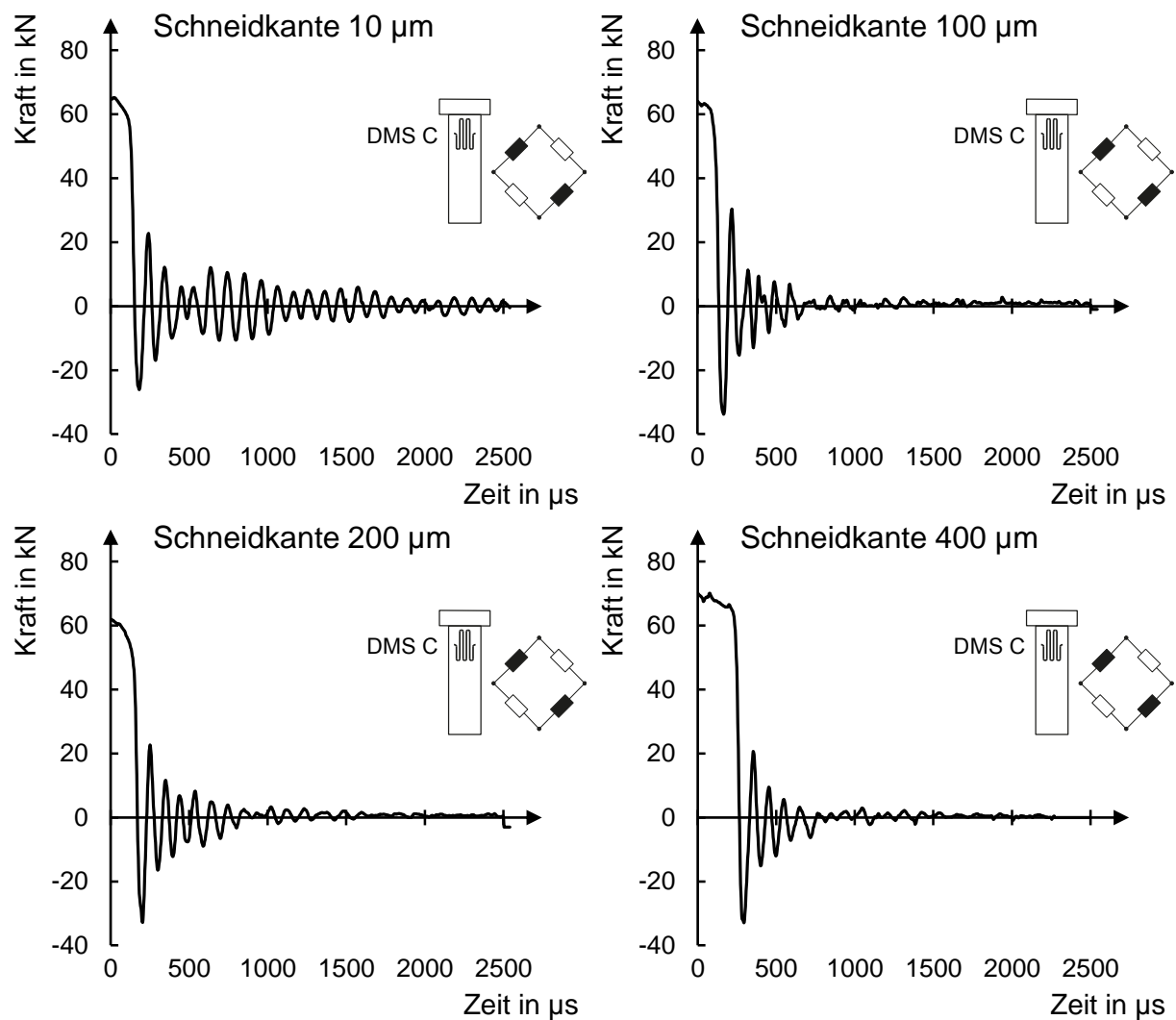


Abbildung 8.24: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.4301
 Schneidparameter: L120 | S15 | K0

Auch hier zeigt sich eine starke Dämpfung mit zunehmender Kantenverrundung. Die Dämpfungswirkung fällt allerdings geringer aus als beim 1.0943.

Die graphisch erkennbaren Dämpfungsveränderungen lassen sich mit Hilfe der technischen Mechanik quantifizieren. Abbildung 8.25 zeigt die Vorgehensweise, wie das logarithmische Dekrement aus Gleichung 2.18 aus den teilweise unharmonisch abklingenden Kurven bestimmt wurde.

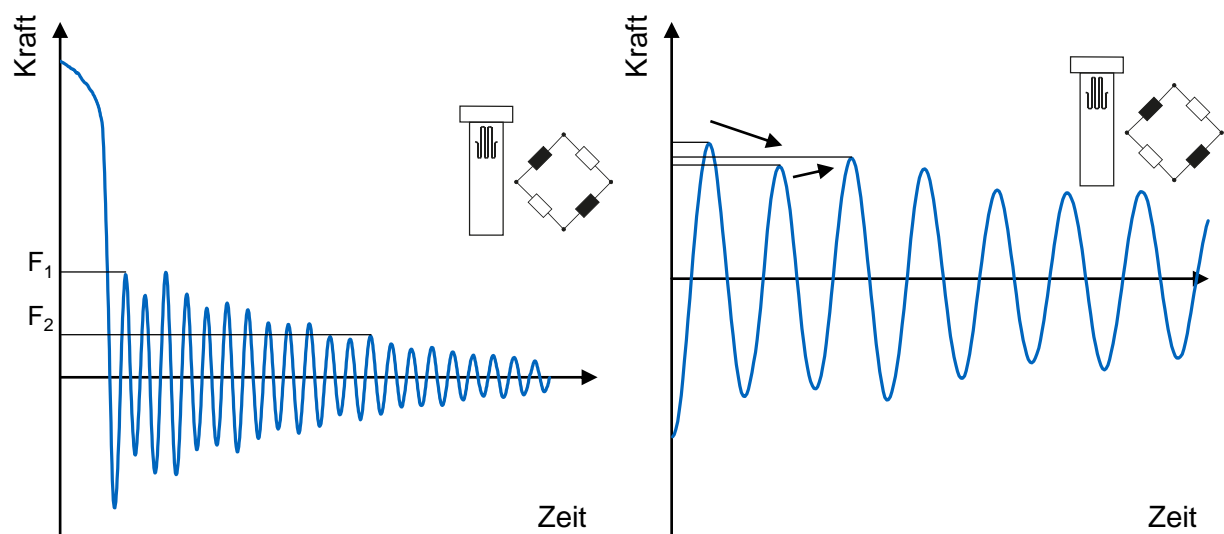


Abbildung 8.25: Vorgehensweise zur Bestimmung des logarithmischen Dekrements

Abbildung 8.25 (rechts) zeigt den Ausschnitt, in dem sich die Amplituden in den Ausschwingungssignalen durch bestimmte Effekte (Überlagerung anderer Schwingungsmoden, Blechschwingung) teilweise nach Abminderung wieder erhöhen. Damit kann das logarithmische Dekrement nicht auf Grund von zwei aufeinander folgenden Schwingungszyklen berechnet werden. Abbildung 8.25 (links) zeigt nun, dass die Amplituden für das logarithmische Dekrement die erste Amplitude und eine Amplitude, die im mittleren Bereich des Ausschwingens liegt, sind.

In Abbildung 8.26 sind die mittels *Gleichung 2.19* berechneten Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes für die Ausschwingungssignale beim Schneiden der zwei Blechwerkstoffe zu sehen.

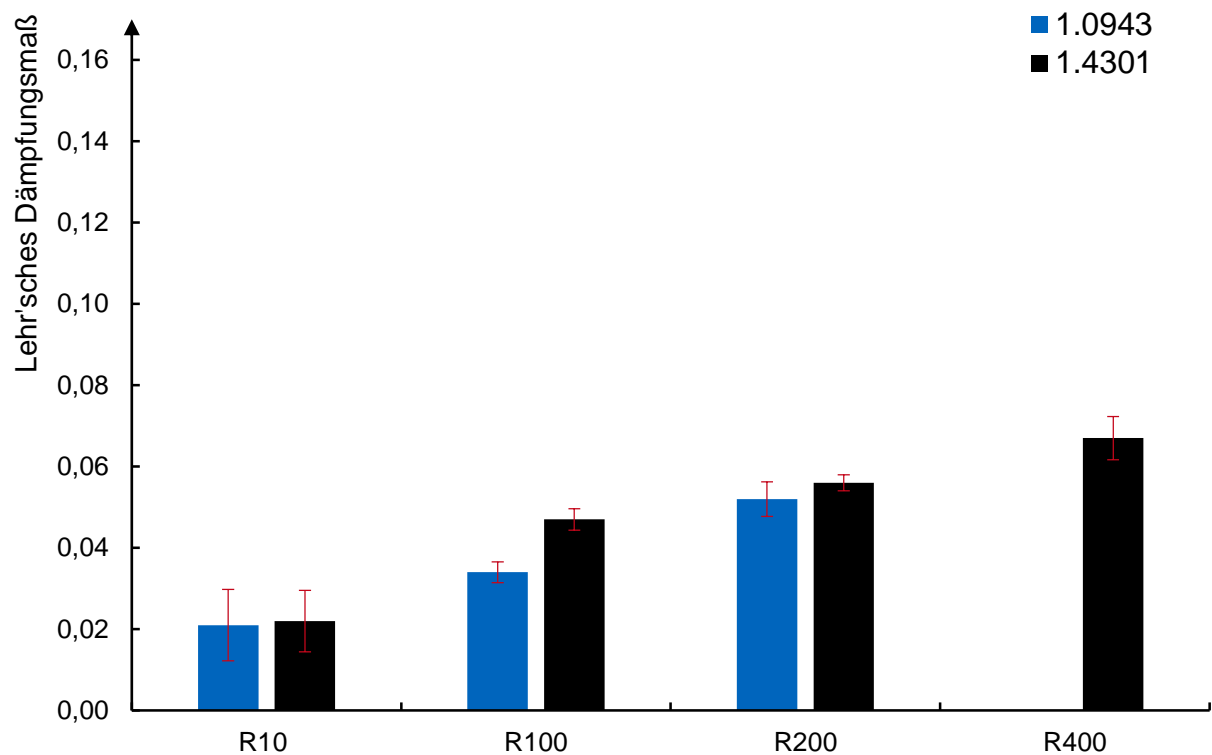


Abbildung 8.26: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943 und 1.4301

Schneidparameter: L120 | S15 | K0

Mit steigender Schneidkantenverrundung steigt die Dämpfung stark an. Beim 1.0943 ist bei einer Verrundung von 400 μm nahezu keine Schwingung mehr festzustellen. Allerdings führt eine höhere Schneidkantenverrundung auch zu einer veränderten Durchbruchkraft, was ebenfalls den Ausschwingvorgang in Amplitude und Dauer beeinflusst. Deswegen sind die Werte des Dämpfungsgrades beim 1.4301 bei den Schneidkantenverrundungen von 100 μm und 200 μm höher, obwohl die Schwingung beim 1.0943 bei diesen Kantenverrundungen schneller abklingt. Dies deutet darauf hin, dass die Durchbruchkraft beim 1.0943 stärker mit höherer Kantenverrundung sinkt als beim 1.4301.

Einfluss des Kopfspiels

Bei einer Befestigung des Stempels mit Kopfspiel kann sich der Stempel in Längsrichtung in der Höhe des Kopfspiels bewegen. Die Kontaktvorgänge, die sich während des Kontaktes zwischen den Flächen des Schneidstempelkopfs und den Flächen der Druck- und Halteplatte ergeben, können durch Reibung oder durch Stoßvorgänge die Stempelschwingung abdämpfen. Ebenfalls schwingt der Stempel während des freien Flugs um seinen Masseschwerpunkt und baut damit ebenfalls Energie durch innere Dissipation ab. Beim Auftreffen des Kopfes auf die Halteplatte oder die Druckplatte hat die Schwingungsphase, in der sich der Stempel gerade befindet, für eine Einbringung oder die Vernichtung von Schwingungsenergie des Stempels einen Einfluss. Analog zum Zweimassenschwinger führt ein Auftreffen des Kopfes auf die Halteplatte während einer Kontraktionsphase zu einem Energieeintrag und in der Ausdehnungsphase zu einer Energieableitung aus dem Stempel.

In Abbildung 8.27 sind Ausschwingssignale für verschiedene Kopfspiele und Schneidkantenverrundungen beim Schneiden des 1.0943 zu sehen.

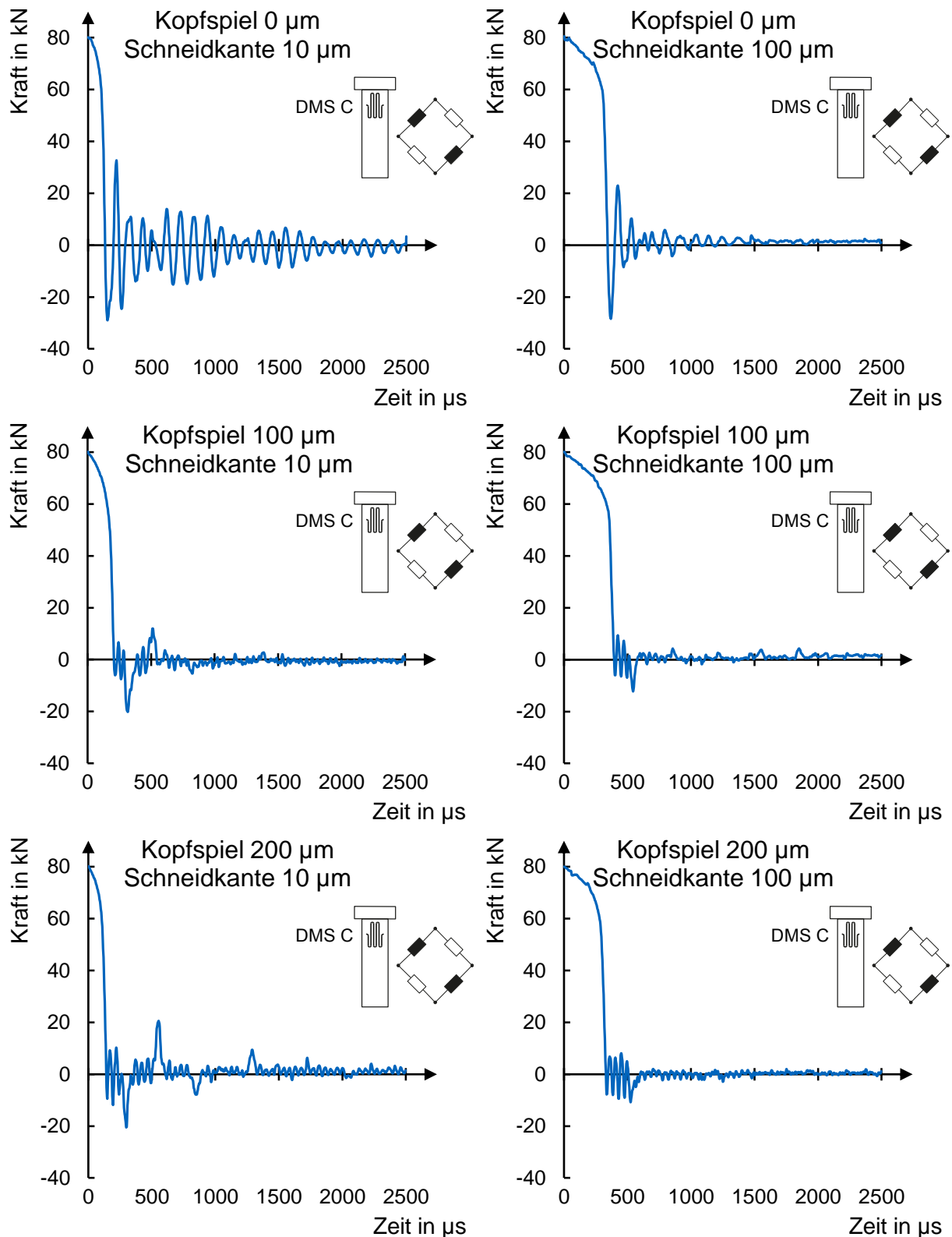


Abbildung 8.27: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.0943
Schneidparameter: L120 | S15

Das Ausschwingssignal des Stempels mit einer Schneidkante von 10 μm und einem Kopfspiel von 0 μm wurde weiter oben schon diskutiert. Bei einem Kopfspiel von 100 μm ist nach Abfallen

der Schneidkraft eine Oszillation an der Messstelle mit höherer Frequenz als im fest eingespannten Fall erkennbar. Diese Oszillation misst die Eigenschwingung des Stempels um seinen Masseschwerpunkt während er von der Druckplatte abhebt und sich nach unten bewegt. Diese Eigenschwingung hat eine Frequenz von 22391 Hz. Die Amplitude ist gegenüber den Amplituden des fest eingespannten Stempels wesentlich verringert. Wenn der Stempel auf die Halteplatte auftrifft, ist ein Ausschlag im Signal zu erkennen. Dieser Ausschlag kommt durch die Dehnung des Stempels durch den Aufprall auf die Stempelhalteplatte zustande. Die Amplitude dieses Ausschlags liegt ebenfalls unter der Amplitude beim ersten Ausfedern des Stempels bei fester Einspannung. Wie schon bei *Mair* (Mair, 2016) erläutert, ist also ein geringes Kopfspiel grundsätzlich für die dynamische Belastung des Stempelkopfs günstiger als eine feste Einspannung, da die auf den Kopf wirkenden Kraftamplituden geringer sind. Der Stempel bewegt sich von der Stempelhalteplatte wieder nach oben, da hier ein elastischer Stoß vorliegt, der bewirkt, dass sich Stempel und Halteplatte wieder voneinander trennen. Der Stempel behält seine Eigenschwingung während der Bewegung nach oben bei. Der Stempelkopf trifft danach wieder auf die Druckplatte und baut abermals Energie ab.

Der Verlauf der Dehnungszustände des Stempels und damit auch die Bewegungsvorgänge während des Ausschwingvorgangs sind bei einem Kopfspiel von 200 μm noch deutlicher erkennbar. Der Stempel schwingt ungefähr doppelt so lange bis er auf die Halteplatte trifft. Dies korreliert mit der Verdoppelung des Kopfspiels. Aus dem Dehnungssignal lassen sich in diesem Fall vier Stöße ableiten. Zwischen den Stößen vergrößert sich jedes Mal die Dauer der Eigenschwingung, was durch die Verlangsamung des Stempels wegen eines starken Energieabbaus durch die Stoßkontakte verursacht wird. Ebenfalls wird an der Amplitude der Eigenschwingung deutlich, wie der Stempel durch die Stoßvorgänge abgedämpft wird.

Die zwei Diagramme, die einmal das Signal bei einer Schneidkantenverrundung von 100 μm und jeweils bei einem Kopfspiel von 100 μm und 200 μm zeigen, ähneln sich qualitativ. Bei beiden schwingt der Stempel mit seiner freien Eigenfrequenz bis zum Aufschlag auf die Halteplatte. Bei einem größeren Kopfspiel ist die Zeit bis zum Aufschlag lediglich erhöht. Dieser Aufschlag bewirkt in beiden Fällen ein Ende der Schwingung des Schneidstempels. Dies zeigt die starke Dämpfungswirkung, die von einem Auftreffen auf der Halteplatte ausgeht. Ebenfalls hat eine höhere Schneidkantenverrundung eine hohe Dämpfungswirkung auf die Stempelschwingung beim 1.0943. Beide Dämpfungen zusammen ergeben sogar ein abruptes Ende der Eigenschwingung des Stempels.

In Abbildung 8.28 sind die Ausschwingssignale für verschiedene Kopfspiele und Schneidkantenverrundungen beim Schneiden des 1.4301 zu sehen.

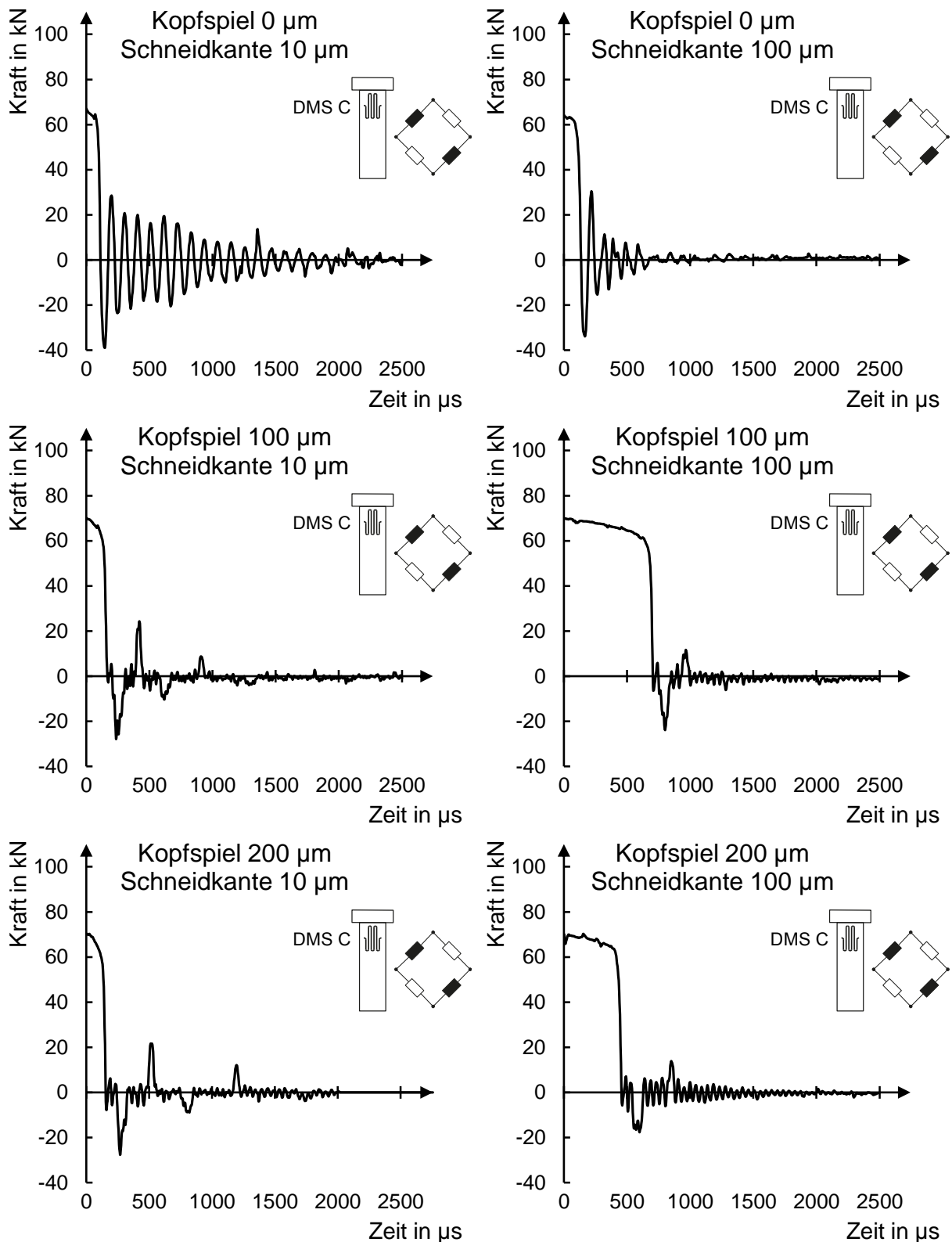


Abbildung 8.28: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.4301
Schneidparameter: L120 | S15

Hier zeigen sich ähnliche Ergebnisse, wie beim 1.0943. Allerdings ist hier die Dämpfungswirkung der Schneidkantenverrundung von $100\ \mu\text{m}$ weniger ausgeprägt, was auch bei dieser

Verrundung eine Bewegung des Stempels innerhalb des Kopfspiels ermöglicht. Die Dämpfungswirkungen des Kopfspiels lassen sich abermals mit dem Lehr'schen Dämpfungsmaß quantifizieren. Die Dämpfungsgrade zeigt Abbildung 8.29.

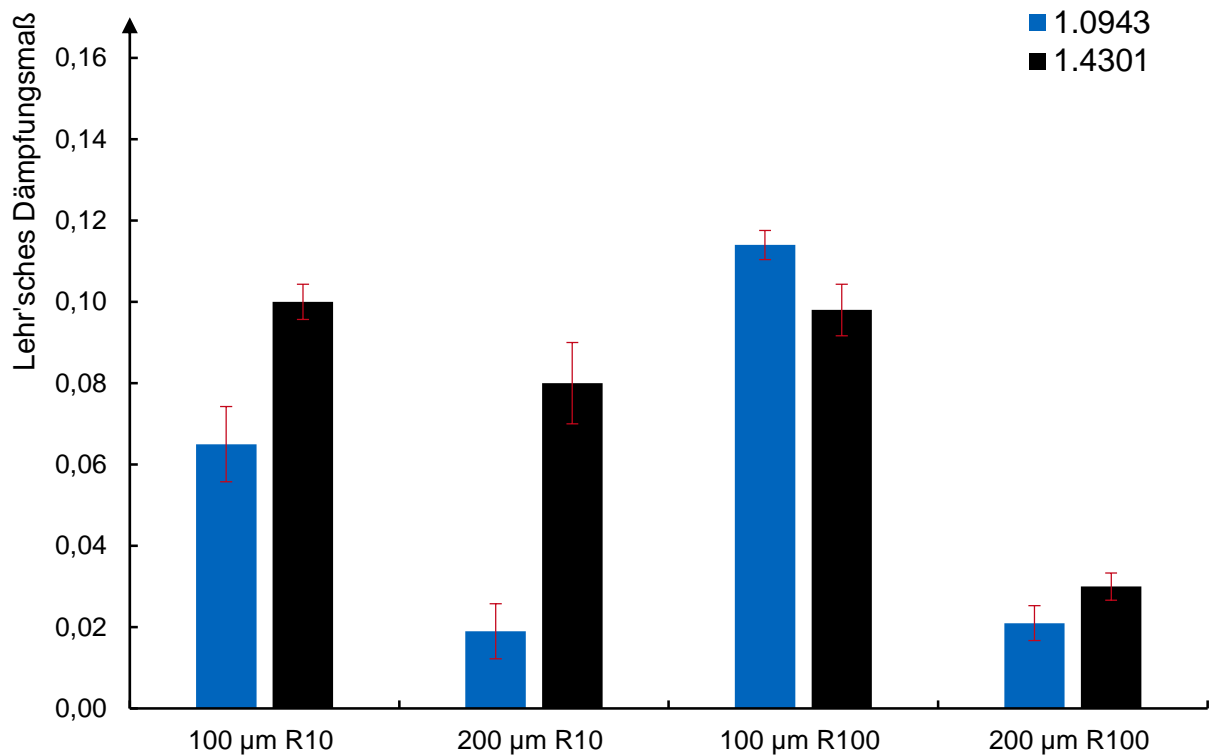


Abbildung 8.29: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.0943 und 1.4301
Schneidparameter: L120 | S15

Die höchste Dämpfungswirkung zeigt das kleine Kopfspiel in Verbindung mit der größeren Schneidkantenverrundung. Bei einer Schneidkantenverrundung von 10 µm ist die Dämpfungswirkung beim kleinen Kopfspiel ebenfalls größer als beim großen Kopfspiel. Das größere Kopfspiel zeigt eine kleine Dämpfung.

In Abbildung 8.30 ist das Kraftsignal aus DMS C bei einem Kopfspiel von 100 µm beim Schneiden des 1.0943 vergrößert dargestellt.

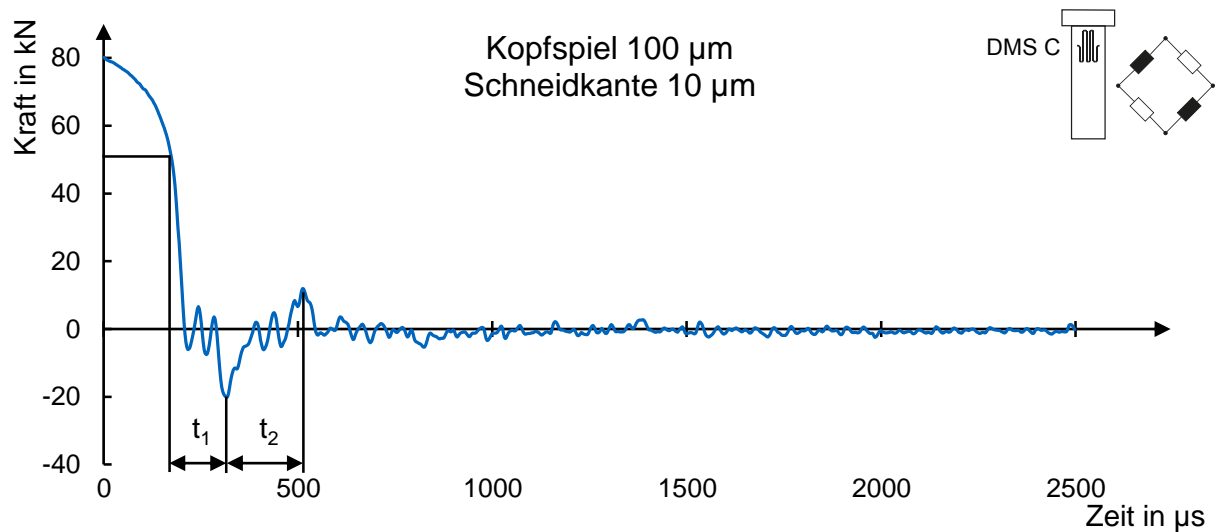


Abbildung 8.30: Kraftsignal am Stempelkopf beim Ausschwingen mit 100 µm Kopfspiel beim Schneiden des 1.0943
Schneidparameter: L120 | R10 | S15

Das ausgeprägte Minimum und Maximum zwischen den Schwingzyklen werden durch Stöße des Stempelkopfs auf die Halte- bzw. Kopfplatte des Werkzeugs erzeugt. Das Minimum bedeutet, dass sich der Stempel positiv dehnt und das Maximum bedeutet, dass sich der Stempel negativ dehnt, also staucht. Zu erkennen ist, dass sich die Zeit zwischen erstem und zweitem Auftreffen verlängert. Der Stempel wird durch die Schwingung und die Stöße also abgebremst. Mittels des bekannten Kopfspiels und der Zeit zwischen Durchbruch und erstem Stoß, oder der Zeit zwischen den Stößen, lässt sich eine mittlere Geschwindigkeit des Stempelkopfs berechnen. Der Abstand zwischen DMS und den wahren Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Stempel bewirkt einen Fehler in der Größenordnung von einer Mikrosekunde und wird hier vernachlässigt. Für den ersten Flug benötigt der Stempel laut Diagramm 148 µs, dies ergibt eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,68 m/s. Der zweite Flug benötigt eine Zeit von 195 µs, was eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,51 m/s ergibt. Der Stempel wird somit abgebremst.

In Abbildung 8.31 ist das Kraftsignal aus DMS C bei einem Kopfspiel von 200 µm beim Schneiden des 1.0943 vergrößert dargestellt.

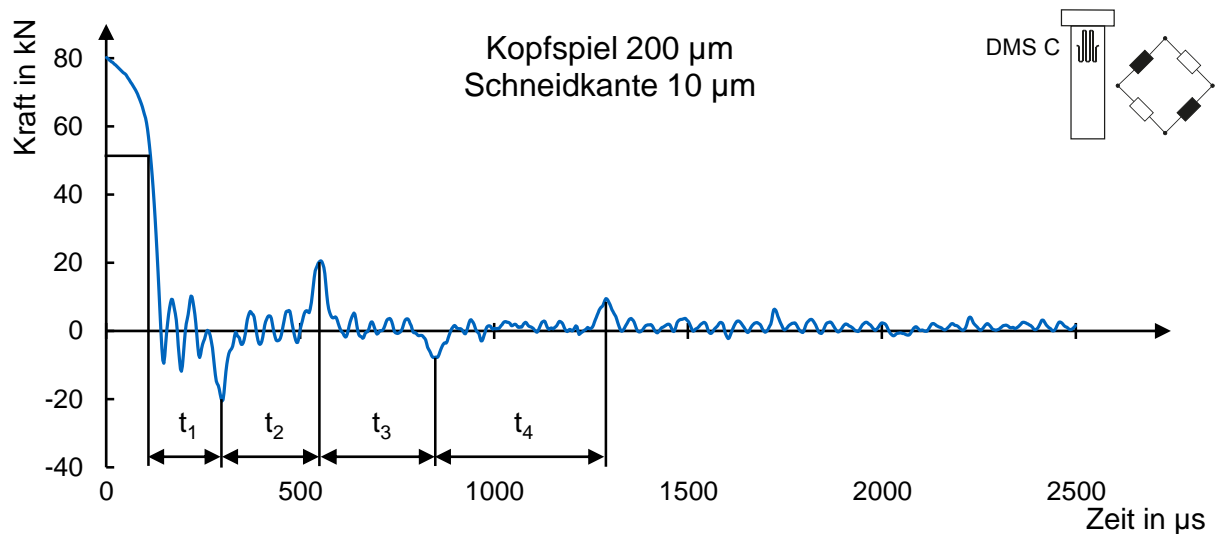


Abbildung 8.31: Kraftsignal am Stempelkopf beim Ausschwingen mit 200 µm Kopfspiel beim Schneiden des 1.0943

Schneidparameter: L120 | R10 | S15

Die Flugzeiten zwischen den Stößen betragen hier 187, 265, 293 und 447 µs. Dies ergibt Durchschnittsgeschwindigkeiten von 1,07, 0,75, 0,68 und 0,45 m/s. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Stempels im ersten Flug bei einem Kopfspiel von 200 µm ist größer als bei einem Kopfspiel von 100 µm. Dies weist darauf hin, dass der Stempel auf diesen Strecken nicht seine durch die gespeicherte elastische Energie bestimmte Endgeschwindigkeit erreicht. Diese lässt sich durch einen Energieansatz, in dem die potentielle Federenergie des Stempels und die kinetische Energie nach vollständiger Umwandlung der potentiellen Energie in diese gleichgesetzt werden, mittels Gleichung 8.1 abschätzen.

$$v_{\text{Stempel}} = \sqrt{\frac{F_{DB}^2 L}{E A m}} \quad (\text{Gleichung 8.1})$$

Mittels dieser Gleichung müsste der Stempel eine Endgeschwindigkeit von 9,6 µm/µs erreichen. Dimensionell betrachtet liegt dieses Ergebnis nahe an den gemessenen Geschwindigkeiten. Erklärungen für die Abweichung zwischen den Messergebnissen und der Abschätzung aus dem Energieansatz liegen in der Abweichung zwischen Modell und Realität. Im Modell wird eine Punktmasse an einer Feder betrachtet, die die gesamte Federenergie aufnimmt und in kinetische Energie umwandelt. Die physikalische Situation des Stempels weicht davon ab. Daher kann diese Berechnung nur als Abschätzung Verwendung finden.

Die Stößelgeschwindigkeit liegt nach Herstellerangaben bei der verwendeten BSTA 1250 bei einem Hub von 19 mm und einer Hubzahl von 100 Hüben/min unter 0,1 µm/µs. Die Stößelgeschwindigkeit hat damit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten des Schneidstempelkopfes.

Einfluss der Kopfform

Als kleiner Einschub soll hier noch die Möglichkeit der Dämpfung durch die geometrische Veränderung des Stempelkopfes diskutiert werden. Für bessere statische und dynamische Festigkeit werden Stempelköpfe oft mit weichen Übergängen zum Schaft versehen und angelassen, um ein zäheres Werkstoffverhalten zur Vermeidung von Kopfbrüchen einzustellen. Eine Veränderung des Stempelkopfes im Rahmen dieser Arbeit soll die Ausbreitungswellen durch nichtlineare Effekte im Stempelkopf abdämpfen und so zu einer Schwingungsreduzierung führen. Dazu wurden Schneidstempel mit den in Kapitel 5.3 beschriebenen Kopfformen mit $2/4$ -Brücken versehen und die entstandenen Signale mit der in Kapitel 7 beschriebenen Messtechnik aufgenommen. Abbildung 8.32 zeigt die Ausschwingssignale beim Schneiden der beiden untersuchten Blechwerkstoffe in Abhängigkeit des Schneidstempelkopfes. Um einen Einfluss der Kopfform zu untersuchen, wurden die Stempel mit $20\ \mu\text{m}$ Kopfspiel eingebaut.

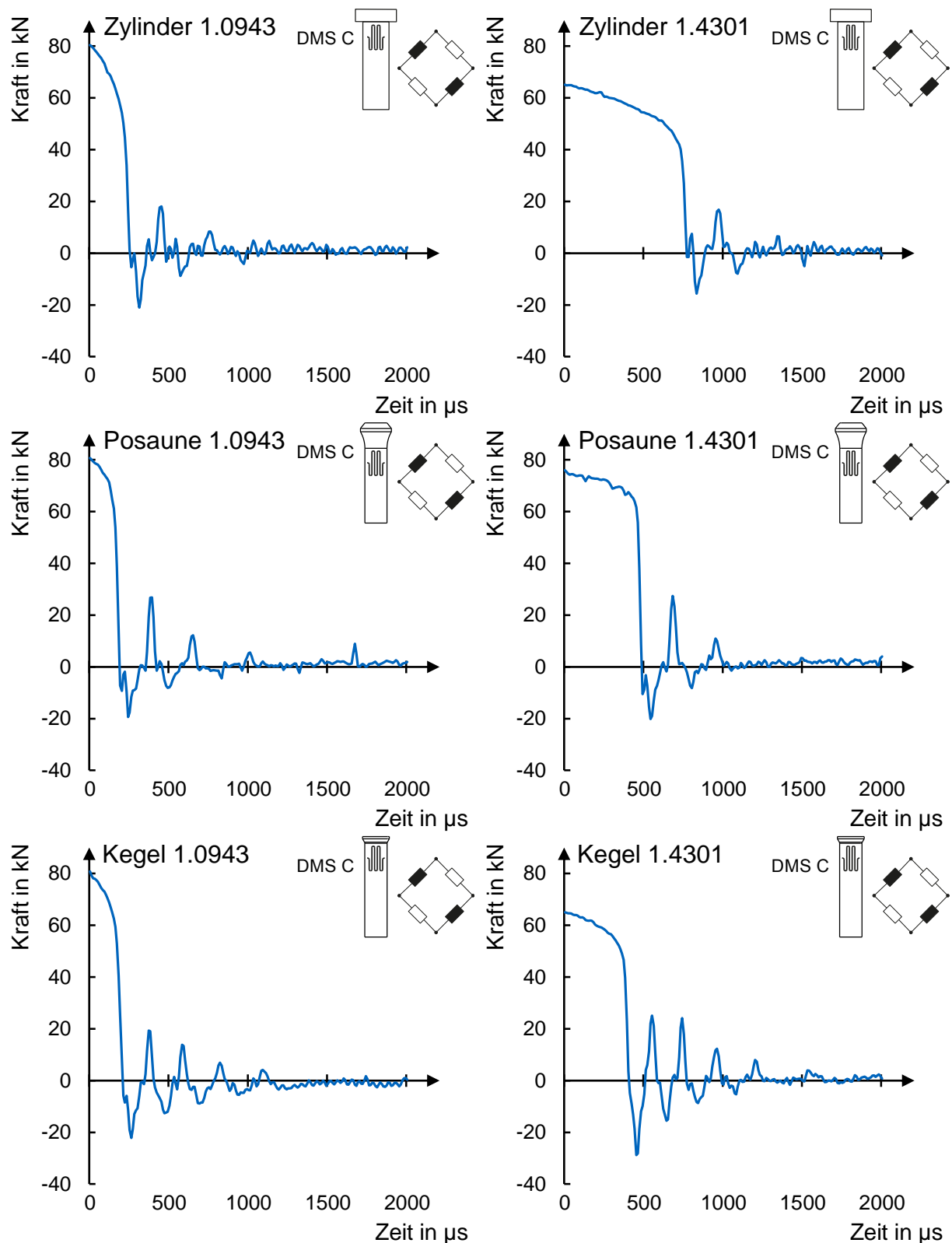


Abbildung 8.32: Ausschwingensignale in Abhängigkeit der Kopfform beim 1.0943 und 1.4301 Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Ersichtlich ist eine längere Schwingenzahl beim kegeligen Kopf im Vergleich zu den anderen untersuchten Köpfen. Einen Unterschied zwischen den Blechwerkstoffen ist nicht festzustellen. Abbildung 8.33 zeigt die Auswirkung der Kopfform auf das Lehr'sche Dämpfungsmaß.

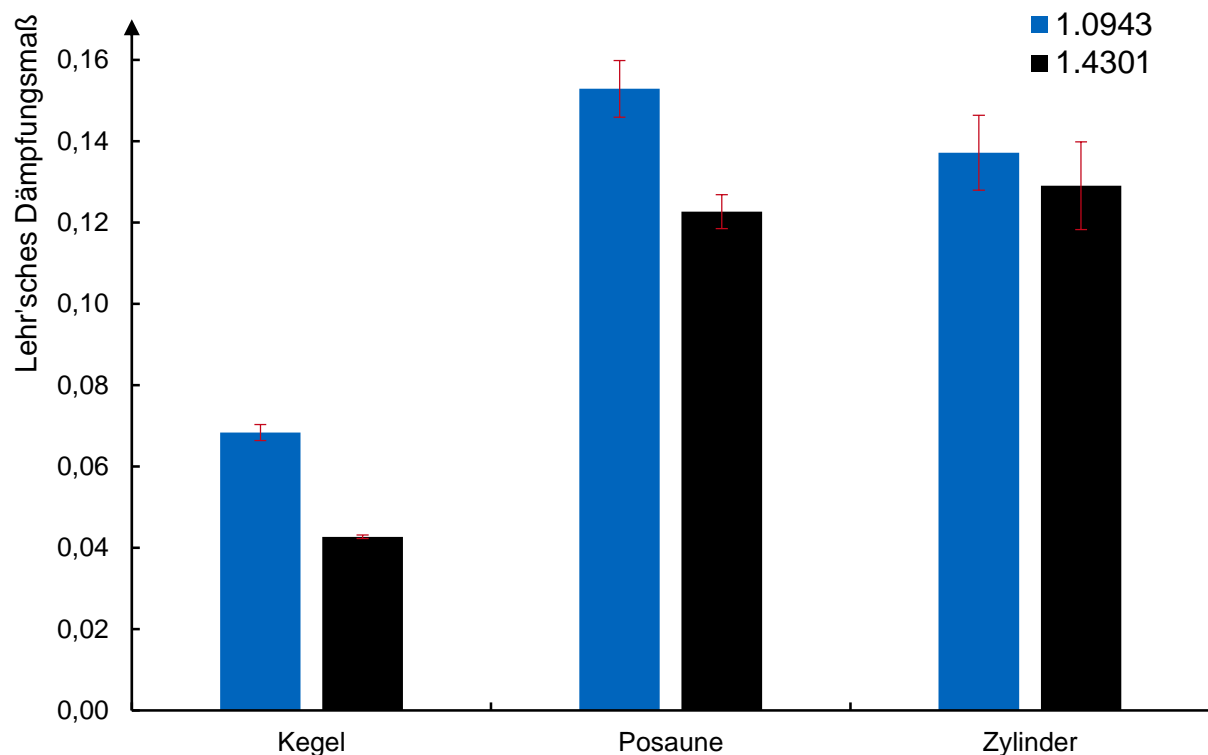


Abbildung 8.33: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Kopfform beim 1.0943 und 1.4301
Schneidparameter: L120 | R10 | S15 | K0

Die Stempelköpfe Posaune und Zylinder zeigen eine wesentlich höhere Dämpfung als der kegelige Kopf. Die Werkstoffdämpfung beim kegelligen Kopf ist vor allem durch die geringen Abmessungen des Kopfes herabgesetzt. Die größere Masse in den Köpfen der anderen Stempel kann wesentlich mehr Energie dissipieren. Ebenfalls ist durch die geringe Kontaktfläche beim kegelligen Kopf zur Halteplatte eine geringe Kontaktdämpfung zu erwarten. Der Vorteil des kegelligen Kopfes ist seine geringe Bauhöhe, die bei Platzproblemen in Stanzwerkzeugen vorteilhaft sein kann. Die Unterschiede zwischen den Blechwerkstoffen, die sich in der numerischen Auswertung zeigen, ist durch statistische Unschärfe zu erklären, da beide Blechwerkstoffe in der untersuchten Schneidparameterkonfiguration die gleiche Durchbruchkraft und Stanzgitterdämpfung zeigen. Ein Zusammenhang zwischen Kopfform und Blechwerkstoff besteht nicht.

8.5.3 Simulativ ermittelte Stempelbewegung

Der kumulierte Relativweg der Schneidkante zum Stanzgitter ist messtechnisch nur mit unangemessen hohem Aufwand zu erfassen. Die oben diskutierten Messungen betreffen nur das Dehnungsverhalten des Stempels am Schaft unter dem Kopf. Die Gesamtbewegung des Stempels kann daraus nicht abgeleitet werden. Daher wird der Stempelweg durch eine Simulation der Stempelbewegungen während des Ausschwingvorgangs mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode ermittelt. Dazu ist eine Modellierung des Schneidsystems notwendig. Bei der Modellierung wurde allerdings ein reduziertes Schneidsystem verwendet, da die Einflüsse des Werkzeugs

und der Presse auf den Ausschwingvorgang des Stempels vernachlässigt werden können. Abbildung 8.34 zeigt das Simulationsmodell und die Spannungsverteilung am Stempelkopf beim ersten Auftreffen bei einem Kopfspiel von $100\ \mu\text{m}$.

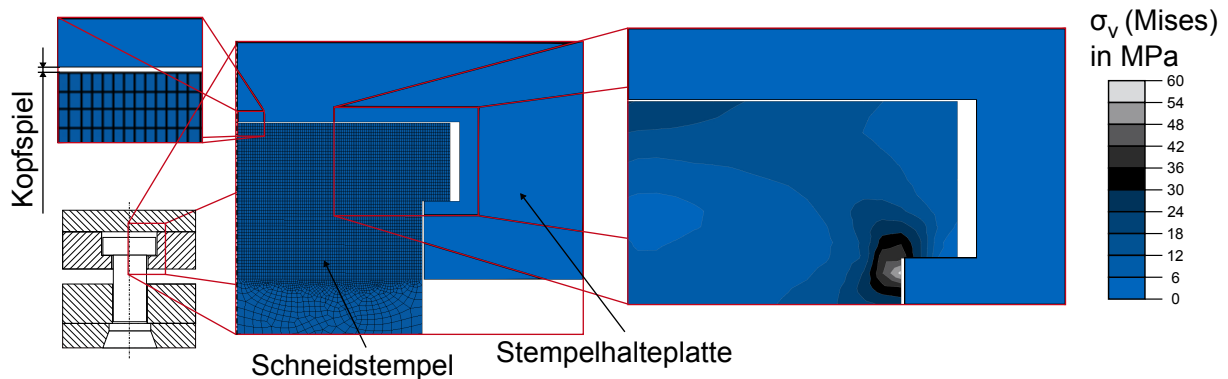


Abbildung 8.34: Modellierung des Simulationsmodells und Spannungen beim ersten Auftreffen auf die Halteplatte am Stempelkopf

Zur numerischen Bearbeitung des Modells wurde die Simulationssoftware Abaqus/CAE 6.12-3 der Firma Dassault Systems verwendet. Es wurde eine direkte Integrationsmethode gewählt. Eingestellt wurden als Rechenparameter für die Simulation Dynamic, Implicit und Moderate Dissipation. Die Parameter für das Simulationsmodell sind in Tabelle 8.6 aufgezählt.

Tabelle 8.6: Parameter für die simulative Untersuchung der Stempelschwingung

Parameter	Wert
Dichte in kg/m^3	8100
E-Modul in GPa	219
Poissonzahl	0,3
α -Dämpfung	0
β -Dämpfung	$1,5 \times 10^{-6}$
Kontaktdämpfung	23,3
in Ns/mm^3	
Dämpfungsfaktor	3×10^{-6}
in Ns/mm^3	
Haftreibungszahl	0,78
Gleitreibungszahl	0,42

Die Dichte, der E-Modul und die Poissonzahl sind die Kennwerte für den verwendeten Stempelwerkstoff. Die Reibungszahlen wurden aus der Literatur entnommen (Grote und Feldhusen, 2018, S. B15). Die Dämpfungsfaktoren wurden durch Kalibrierung des Simulationsmodells auf experimentell ermittelte Messungen festgelegt. Dazu wurden die Dämpfungsfaktoren iterativ angepasst, bis sich ein gleiches Ausschwingverhalten in der Simulation wie in der Realität ein-

stellte. Dies zeigt Abbildung 8.35 (rechts). In Abbildung 8.35 (links) ist die simulativ ermittelte absolute Schneidkantenverschiebung gegen das Stanzgitter in Abhängigkeit des Kopfspieles zu sehen.

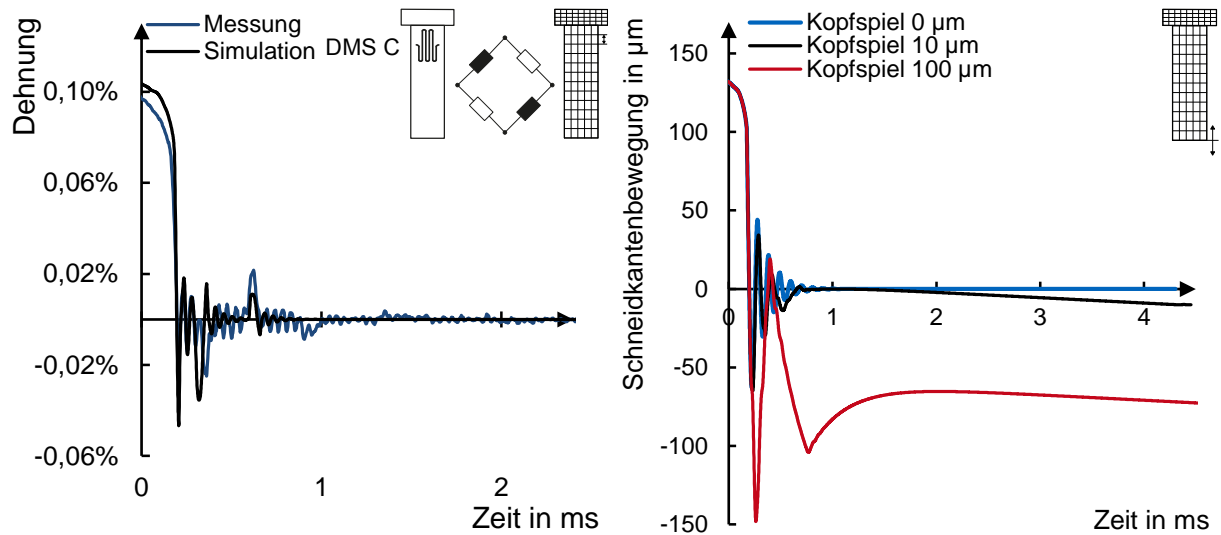


Abbildung 8.35: Dehnungsverläufe für Messung und Simulation bei 200 µm Kopfspiel (links). Schneidkantenverschiebungen für verschiedene Kopfspiele (rechts)
Schneidparameter: L120 | R10 | S15

Den größten Einfluss auf die Bewegung des Schneidstempels haben die Durchbruchkraft und die Länge des Stempels. Die Durchbruchkraft bestimmt die Energie, die der Stempel nach Durchbruch aufweist und die Länge beeinflusst die erste longitudinale Eigenfrequenz. Daher wurden drei verschiedene Konfigurationen simulativ untersucht. In Abbildung 8.36 ist die kumulierte Schneidkantenverschiebung in Abhängigkeit von Stempellängen, Durchbruchkraft und Kopfspiel zu sehen.

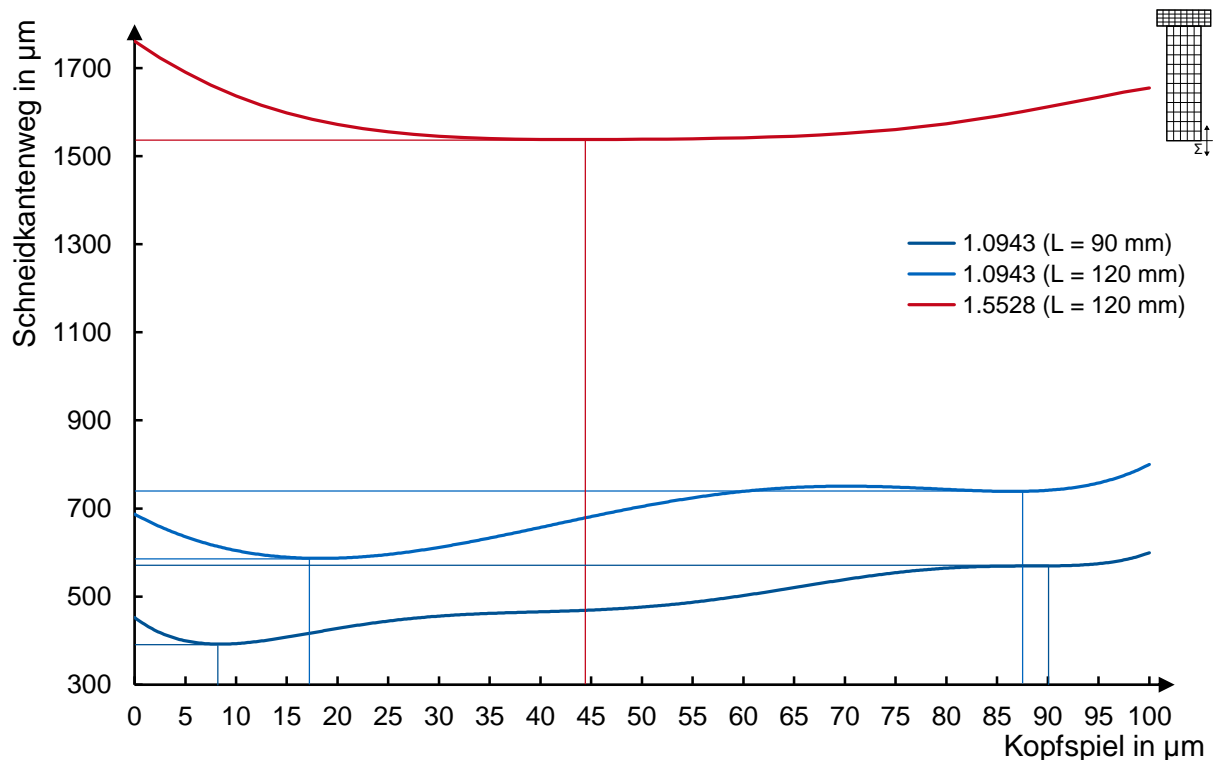


Abbildung 8.36: *kumulierte Schneidkantenwege aus der Simulation in Abhängigkeit des Kopfspiels und der Stempellänge*
 Schneidparameter: R10 | S15

Es zeigt sich bei den kumulierten Schneidkantenwegen während des simulierten Ausschwingvorgangs für alle untersuchten Varianten ein ähnliches qualitatives Verhalten. Die Konfiguration mit Kopfspiel gleich Null (fest eingespannt) weist gegenüber der Variante mit einem Kopfspiel größer Null immer einen höheren Schneidkantenweg auf. Der Schneidkantenweg erreicht sodann ein Minimum beim jeweiligen optimalen Kopfspiel und steigt danach wieder an. Dieses Minimum verschiebt sich je nach Konfiguration sowohl in der Höhe (kumulierter Weg) als auch in der Breite (optimales Kopfspiel). So verringert sich der kumulierte Stempelweg von $447\ \mu\text{m}$ auf $397\ \mu\text{m}$ bei dem Blechwerkstoff 1.0943 und einer Stempellänge von 90 mm bei einem Kopfspiel von ca. $10\ \mu\text{m}$ gegenüber der Festeinspannung. Bei einer Stempellänge von 120 mm von $701\ \mu\text{m}$ auf $584\ \mu\text{m}$ bei einem Kopfspiel von ca. $20\ \mu\text{m}$. Und beim Werkstoff 1.5528 von $1755\ \mu\text{m}$ auf $1540\ \mu\text{m}$ bei einer Stempellänge von 120 mm und einem Kopfspiel von ca. $45\ \mu\text{m}$.

Der Einfluss der Stempellänge zeigt sich einerseits durch ein Verschieben des optimalen Kopfspiels zu kleineren Werten bei einem kürzeren Stempel und zu einer generellen Verringerung des kumulierten Schneidkantenwegs. Eine Verkürzung des Stempels führt zu einer höheren ersten longitudinalen Eigenfrequenz nach (Gleichung 2.24). Gleichzeitig erhöht sich die Federkonstante nach (Gleichung 2.11). Der Stempel wird steifer in Longitudinalrichtung, speichert also bei gleicher Belastung weniger potentielle Energie als ein längerer Stempel. Diese Veränderung der schwingungstechnischen Kennwerte des Stempels führt zu dem beobachteten Effekt. Durch die verringerte potentielle Energie des Stempels ist die Fluggeschwindigkeit und die Amplitude der

Schwingung herabgesetzt. Dies führt zu der beobachteten Verringerung des Schneidkantenwegs. Durch die Erhöhung der Eigenfrequenz nimmt ein kurzer Stempel im Vergleich zum langen Stempel früher den gleichen Eigenzustand ein. Der Dämpfungseffekt durch die Auftreffvorgänge des Stempels an Halteplatte und Druckplatte ist maßgeblich durch den Eigenzustand des Stempels während des Kontaktvorgangs beeinflusst. Ein Analogon bildet der Vorgang des Anschubsens einer Kinderschaukel. Wenn die Schaukel sich auf dem höchsten hinteren Totpunkt befindet, wirkt ein Anschubsen in Bewegungsrichtung der Schaukel energiezuführend. Ein Anschubsen auf dem höchsten vorderen Totpunkt entgegen der Bewegungsrichtung wirkt dagegen energiemindernd. Einem Schneidstempel, der sich also gerade in der Extension befindet, wird, wenn er auf die Halteplatte auftrifft, Energie zugeführt, da der Auftreffstoß und die Bewegungsrichtung der Kopffläche in gleicher Richtung erfolgen. Bei einem Auftreffen des Stempels auf die Halteplatte in der Kontraktion wird Energie abgebaut, da die Bewegungsrichtung der Kopffläche und die Richtung des Auftreffimpulses entgegengesetzt sind. Es existieren also Schwingungszustände eines Stempels, in denen ein Auftreffen auf die Halteplatte dämpfend wirkt. Diese Zustände werden bei höherer Eigenfrequenz früher erreicht. Ebenfalls ist die Fluggeschwindigkeit bei einem kürzeren Stempel herabgesetzt, da, wie oben schon erwähnt, die potentielle Energie des Stempels bei Durchbruch geringer ist. Der kurze Stempel erreicht somit den optimalen Schwingungszustand für das Auftreffen früher als ein langer Stempel und befindet sich dabei auch noch wegen der niedrigeren Geschwindigkeit näher an der Druckplatte. Dies führt letztlich zu einer Verringerung des optimalen Kopfspieles.

Eine höhere Durchbruchkraft bewirkt eine Verschiebung des Minimums zu höheren kumulierten Schneidkantenwegen und zu höheren Kopfspielen im Vergleich zu einer niedrigeren Durchbruchkraft bei sonst gleichen Parametern. Durch die erhöhte Kraft und damit die größere Stauchung bei Durchbruch ist die potentielle Energie des Stempels höher als bei einer niedrigeren Kraft (*Gleichung 2.12*). Dies führt zu einer höheren Amplitude und zu einer höheren Fluggeschwindigkeit des Stempels. Die höhere Amplitude führt zu einer generellen Erhöhung des Schneidkantenwegs. Die Verschiebung des Minimums des Schneidkantenwegs hin zu höheren Kopfspielen liegt hier wiederum im Zusammenspiel von Fluggeschwindigkeit und Schwingungszustand. Stempel gleicher Länge haben auch bei Anregung mit unterschiedlichen Durchbruchkräften gleiche Eigenfrequenzen. Sie erreichen also beide gleichzeitig den optimalen Schwingungszustand für ein Auftreffen auf der Halteplatte. Da der Stempel mit der höheren Durchbruchkraft allerdings eine höhere Fluggeschwindigkeit aufweist, befindet sich dieser im Vergleich zum Stempel mit einer niedrigeren Durchbruchkraft bei Erreichen des optimalen Schwingungszustands weiter von der Druckplatte entfernt. Das optimale Kopfspiel erhöht sich also.

Niedrige Durchbruchkräfte und kurze Stempel führen insgesamt zu einer Verringerung des Schneidkantenwegs. Ein an die Stempellänge und Durchbruchkraft angepasstes Kopfspiel führt zu einem niedrigeren Schneidkantenweg als eine Festeinspannung.

8.6 Diskussion

Die Schnittflächen zeigen sowohl in der Entstehung als auch im Erscheinungsbild keine Abweichungen zu den nach Stand der Technik zu erwartenden Ergebnissen. Der Sekundärglattschnitt, der bei kleineren Schneidspalten bei Schnittflächen des 1.0943 sichtbar ist war nicht beabsichtigt, ist aber kein außerordentliches Phänomen und kann bei entsprechenden Parameterkonfigurationen entstehen.

Mittels des Messaufbaus mit der DMS-Vollbrücke ist auch eine Schneidkraftmessung möglich. Die Einflüsse des Blechwerkstoffs und der Schneidparameter unterscheiden sich nicht zu anderen Methoden der Schneidkraftmessung. Unterschiede ergeben sich in der Messposition. Messpositionen nahe an der Stempelschneidkante liefern im dynamischen Bereich durch verschiedene nichtlineare Effekte ein Überschwingverhalten. Dies wirkt sich allerdings nicht auf die Messung der Durchbruchkraft aus, da diese Messung gerade im sehr kurzen Moment des Übergangs vom statischen in das dynamische Kraftregime erfolgt. Gut erkennbar ist an den Messungen auch das mechanische Verhalten in Bezug auf die Stempelkraft des Blechwerkstoffs beim Übergang vom statischen in den dynamischen Bereich.

Experimentell wurden drei Blechwerkstoffe (1.0943, 1.4301 und 1.5528) und drei Schneidspalte (5, 10 und 15 %) variiert. Die maximalen Schneidkräfte wurden nach klassischer Methode ermittelt und hängen hauptsächlich von der Zugfestigkeit der Blechwerkstoffe ab. Bei ansteigendem Schneidspalt von 5 auf 15 % nimmt die maximale Schneidkraft um einige Prozent ab (1.4301: -2,3 %, 1.5528: -2,5 %).

Die Messung der Durchbruchkraft mittels des in Kapitel 4 erklärten Messkonzepts zeigte belastbare und präzise Ergebnisse. Die Messungen können den Entlastungsvorgang während des Ausschwingens eines zylindrischen Lochstempels erfassen. Mittels Auswertung dieses Vorgangs ist es möglich den Durchbruchzeitpunkt und die Durchbruchkraft innerhalb der Präzision des verwendeten Messverstärkers zu bestimmen.

Für die Bestimmung der Durchbruchkraft nach dieser Methode muss allerdings ein ausgeprägtes Bruchverhalten des Blechwerkstoffs vorliegen, der eine Schwingungsanregung des Stempels verursacht. Liegt dieses Verhalten etwa auf Grund von Schneidparametern oder Werkstoff nicht vor, kann keine Durchbruchkraft gemessen werden.

Über die Zusammenhänge zwischen der Höhe der Durchbruchkraft und sonstiger Werkstoffkennwerte oder Schneidparameter kann ausgesagt werden, dass die Durchbruchkraft maßgeblich durch die Schneidparameter und den Blechwerkstoff bestimmt wird. Ebenfalls nimmt die Durchbruchkraft in den vorliegenden Experimenten bei steigendem Schneidspalt zu. So beträgt die Zunahme beim 1.4301 89 % und beim 1.5528 19,5 % bei einen ansteigendem Schneidspalt von 5 auf 15 %. Dies erklärt sich überwiegend durch die Verkleinerung des Glattschnitts bei größeren Schneidspalten. Sonstige Zusammenhänge sind schwer auszumachen. Dies zeigt auch die

Übereinstimmung der Durchbruchkräfte von 1.0943 und 1.4301 bei ansonsten unterschiedlichen Werkstoffkennwerten.

Die Stempelbewegung und das longitudinale Schwingverhalten während des Ausschwingvorgangs nach dem Schnittschlag wurden mittels $2/4$ -DMS-Brückenschaltung mit Messgitterrichtung in Stempelachse in der Nähe des Stempelkopfes gemessen. Maßgebliche Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten des Stempels nach Durchbruch sind die Schneidparameter bzw. die Durchbruchkraft, die Länge, die Kopfform und das Kopfspiel des Stempels.

Die Durchbruchkraft regt die Schwingung an und ist damit maßgeblich für die Stempelbewegung im Sinne von zugeführter Schwingungsenergie. Auswirkungen der Variation der Schwingungsenergie auf die Ausprägung der Schwingung sind vor allem Amplitude und Schwingungsdauer.

Die Schneidparameter ermöglichen zuvorderst einen ausgeprägten Bruch oder verhindern diesen und machen somit eine schwingende Bewegung des Stempels unmöglich. Falls ein Bruch zustande kommt wirken die entsprechenden Schneidparameter durch die Ausprägung der Schnittfläche durch Reibung auf das Dämpfungsverhalten. So vergrößert sich üblicherweise der Glattschnitt bei Verkleinerung des Schneidspalts und der Lochdurchmesser verengt sich bei vergrößertem Schneidkantenradius. Dies führt durch Vergrößerung der Reibfläche oder der Reibkraft zwischen Stempelmantelfläche und Lochung zu einer Erhöhung der Dämpfung und damit zu einem schnelleren Abklingen der Schwingung.

Konstruktive Elemente wie Länge, Kopfform und Kopfspiel wirken sich auf das Bewegungsverhalten des Stempels durch verschiedene Effekte aus. Diese sind teilweise experimentell, teilweise simulativ bestimmbar. Die Eigenfrequenzen und das Eigenschwingverhalten des Stempels sind experimentell und simulativ und das Gesamtbewegungsverhalten simulativ bestimmt worden.

Bei einer Einkonstruktion des Stempels ohne Kopfspiel federt der Stempel mit einer harmonisch gedämpften Schwingung aus. Falls der Stempel ein vertikales Kopfspiel hat schwingt der Stempel nach Durchbruch um seinen Massenschwerpunkt und bewegt sich gleichzeitig aufgrund der Federenergie innerhalb des Kopfspiels vertikal. Bei Auftreffen auf die Stempelhalteplatte wirken Stoß- und Reibungskräfte, die bewirken, dass Energie dissipiert wird und der Stempel wieder von der Halteplatte abgestoßen wird und zwischen der Druckplatte und Halteplatte hin- und her gestoßen wird bis er durch totalen Energieverlust zur Ruhe kommt.

Änderungen der Kopfform bewirken hier ein unterschiedliches Reibungsverhalten in den Stoßvorgängen und führen zu anderen Dämpfungswerten. So wirken Stempel mit Posaunenhals- oder zylindrischem Kopf dämpfender als Stempel mit Kegelpopf.

Simulativ am einfachsten zu modellieren ist der Stempel mit zylindrischem Kopf. Variationen des Kopfspiels ergaben hier unterschiedliche Gesamtwege an der Stempelkante. Als vorteilhaft für die Minimierung der Gesamtwege und damit des Reibwegs erwiesen sich geringe Kopfspiele im Größenordnungsbereich von $10\ \mu\text{m}$. Damit lassen sich Reibwegminimierungen von ca. 16 % erzielen.

Änderungen der Stempellänge verändern die Eigenfrequenz des Stempels und den Energieeintrag durch die Federenergie. Bei veränderter Eigenfrequenz ändert sich das Abstimmverhalten zwischen Stempelschwingung und Stempelbewegung im Kopfspiel in der Art, dass der Stempel Stöße bei anderen Zuständen während der Eigenschwingung erfährt und damit eine veränderte Energiedissipation im Stoß stattfindet. Dies führt zu verschobenen wegminimalen Kopfspielen, was aber durch eine Simulation gut zu erfassen ist.

8.7 Einfluss von Durchbruchkraft und Stempelbewegung auf den Mantelflächenverschleiß

Die Mechanismen, die zur Schwingung des Schneidstempels führen und die Bewegung des Stempels während des Ausschwingvorgangs wurden in den oberen Kapiteln ausführlich diskutiert. Ein industrieller Anwendungsfall der gewonnen Erkenntnisse ist die Optimierung der Stempelbewegung zur Verminderung von Verschleiß und damit Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Der Zusammenhang zwischen Stempelbewegung und Verschleiß am Schneidstempel kann nur durch Verschleißuntersuchungen hergestellt werden. Dazu wurde das in Kapitel 5.2 beschriebene Dauerhubwerkzeug benutzt. Dieses wurde mit drei Schneidstempeln der Länge 90 mm bestückt, die jeweils mit drei verschiedenen Kopfspielen in Höhe von $0\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ versehen waren. Als Versuchswerkstoff wurde der 1.0943 verwendet. Dieser sollte durch seine eingelagerten Martensitinseln einen abrasiven Verschleiß am Stempel erzeugen. Zusätzlich wurden die Stempel mit einer Härte von lediglich 50 HRC gehärtet, um einerseits plastische Deformationen gerade noch zu verhindern und andererseits den abrasiven Verschleißwiderstand stark zu senken. Intervallweise durchgeführte taktile Messungen der Stempelkante zeigten keine Veränderung der Kontur der Stempelkante. Ebenfalls zeigten sich keine signifikanten Veränderungen der Schnittflächenkenngrößen. In Abbildung 8.37 ist das entstandene Verschleißbild an den Schneidstempeln nach 100.000 Hüben dargestellt.

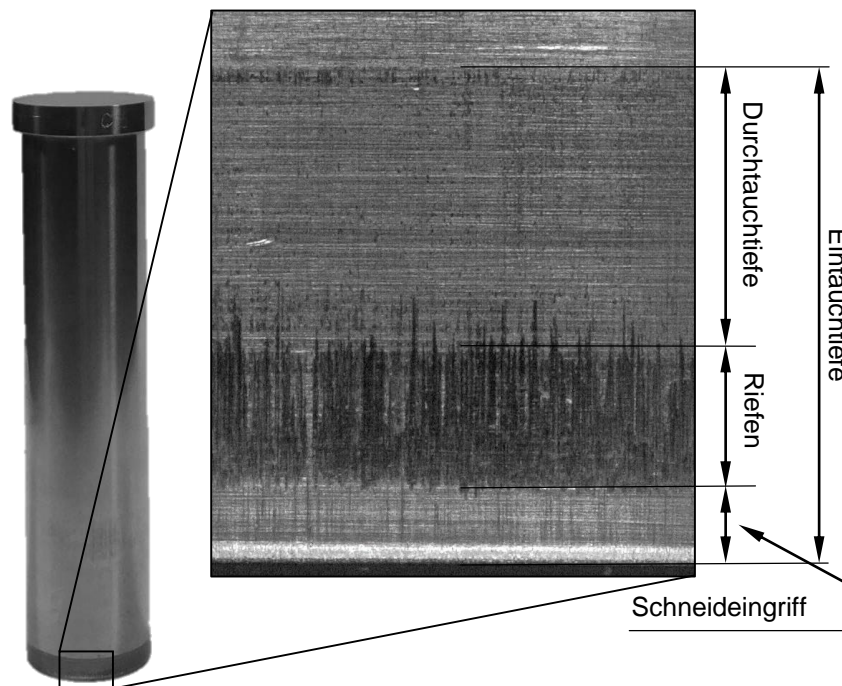


Abbildung 8.37: Verschleißbild am Stempel nach 100.000 Hüben
Schneidparameter: L90 | R100 | S15

Vergrößert dargestellt ist der Bereich der Mantelfläche, der während des Schneidvorgangs in Kontakt mit dem Stanzgitter kommt. Zu erkennen ist ausgehend von der Schneidkante zunächst der Stempelingriff, dessen Höhe mit dem Glattschnitt am Stanzgitter übereinstimmt. An diesen anschließend ist eine Riefenbildung zu erkennen. Nach den Riefen folgt ein relativ unbeschädigter Bereich bis zur Sichtkante, die die Eintauchtiefe des Stempels markiert.

Diese drei Bereiche entstehen in unterschiedlichen Phasen des Scherschneidvorgangs. Der glatte Bereich des Schneideingriffs bewirkt die Bildung des Glattschnitts. Nach Bildung des Glattschnitts erfolgt der Bruch und der Ausschwingvorgang. Dabei schwingt das gesamte Schneidsystem mit seinen Eigenfrequenzen. Der Stempel führt ebenfalls eine Eigenschwingung aus und bewegt sich innerhalb des Kopfspiels auf und ab. Während der Stempelschwingung findet eine Querkontraktion des Stempels statt, welche zu einer Verdickung und Verdünnung des Stempels führt. Ebenso schwingt das Blech, dessen elastische Energie durch den Durchbruch frei wird und das Stanzgitter sowie den Butzen in Schwingungen versetzt. Während dieses Ausschwingens entstehen die Riefen durch Reibungsvorgänge zwischen Stanzgitter und Stempelmantelfläche. Die harten Martensitbestandteile des 1.0943 dringen dabei in den Stempel ein und schädigen die Oberfläche während des Ausschwingvorgangs. Wenn die Lochung nach innen schwingt, also den Durchmesser verkleinert und der Stempel gerade seinen Durchmesser vergrößert, entstehen große lokale Flächenpressungen, die diese Riefen ermöglichen. Nach Abklingen der Schwingung hat der Stempel seinen unbelasteten Durchmesser angenommen und das Blech schmiegt sich nur noch leicht an den Stempel an. Dieser wird durch den Stößel weiter in das Blech gedrückt. Wenn der Stößel den unteren Totpunkt erreicht hat, fährt er wieder nach oben. Der Stempel

bleibt dabei so lange stecken, bis der Stößel den Wert des Kopfspieles durchfahren hat stecken und wird danach aus dem Blech gezogen. Während des Rückzugs können sich die erkennbaren unterschiedlichen Zonen nicht bilden, da sich während des Rückzugs keine Veränderungen im System ergeben und somit auch keine mehrstufiges Schadensbild entstehen kann.

In Abbildung 8.38 sind die entstandenen Riefenbilder an den Stempeln in Abhängigkeit der einzelnen Kopfspiele zu sehen.

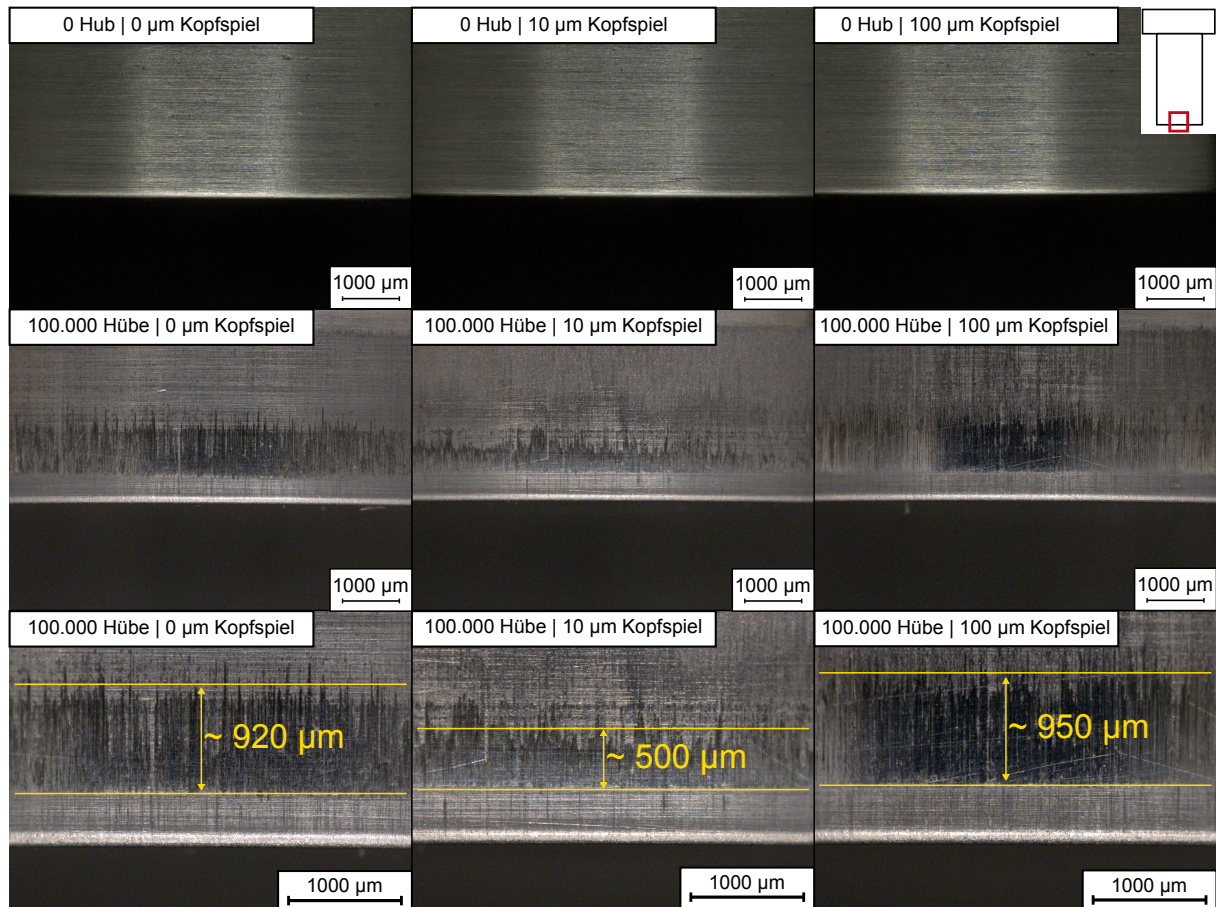


Abbildung 8.38: Riefenbildung an der Stempelmantelfläche bei 0 Hub und 100.000 Hübten
Schneidparameter: L90 | R100 | S15

Alle drei Stempel zeigen ein ähnliches Bild. Schneideingriff, Riefenbildung und Sichtkante sind erkennbar. Die Länge der Riefen weicht allerdings voneinander ab. Die optisch erkennbare durchschnittliche Riefenlänge kann durch das minimale Kopfspiel von 10 µm von ca. 920 µm bei einer Festeinspannung auf ca. 500 µm abgesenkt werden. Dies würde im industriellen Einsatz bedeuten, dass der Stempel ungefähr doppelt so oft nachgesetzt werden kann bis eine Minimallänge erreicht ist. Diese minimale konstruktive Optimierung kann somit eine Ersparnis von 50 % im Hinblick auf die Schneidstempel bewirken.

8.8 Zielerreichung

Das Ziel der Arbeit war die messtechnische Erfassung der Durchbruchkraft beim Lochen von metallischen Werkstoffen mittels Scherschneiden sowie die Ermittlung des durch die Durchbruchkraft bestimmten Verhaltens des Schneidsystems. Für eine bessere Strukturierung teilte sich das Ziel der Arbeit in drei Teilziele auf.

Zunächst war es notwendig, ein Messverfahren zur Ermittlung der Durchbruchkraft zu entwickeln. Dieses Verfahren ist in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Das Verfahren ist mit handelsüblicher Messtechnik mit einem relativ geringen Aufwand umsetzbar. Damit wurde das erste Teilziel erreicht. Die Präzision der Kraftmessung ist mit der verwendeten elektronischen Messtechnik und deren Messfrequenz verbunden. Grundsätzlich sind auch optische oder akustische Messverfahren zur Bestimmung der Entlastungswelle denkbar. Diese wurden aber aufgrund der Kosten im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt.

Die Durchbruchkraft wurde im Rahmen dieser Arbeit beim Lochen mittels zylindrischem Lochstempel erfasst. Grundsätzlich kann die Durchbruchkraft auch beim Abschneiden bestimmt werden. Dazu sind zunächst Kenntnisse über das physikalische Schwingungsverhalten des verwendeten Obermessers notwendig, um dann entsprechende Sensorik zur Messung der Entlastungswelle anbringen zu können.

Zweites Teilziel bildete die Untersuchung der Bewegung des zylindrischen Schneidstempels und die Abhängigkeiten der Bewegung von konstruktiven Randbedingungen, wie Stempellänge oder Kopfspiel während des Schnittschlags. Dazu wurden umfangreiche experimentelle und simulative Untersuchungen vorgenommen. Die Stempelschwingungen in longitudinaler Richtung konnten mittels DMS erfasst werden. Durch Simulationen konnte die gesamte Stempelbewegung innerhalb des Kopfspiels ebenfalls ermittelt werden. Damit wurde das zweite Teilziel umfänglich erreicht.

Die Untersuchung des Einflusses der Stempelbewegung, beziehungsweise der Durchbruchkraft auf den Verschleiß am Schneidstempel war drittes Teilziel. Dazu wurde aus den in der Simulation untersuchten Parametern ein kleiner Parametersatz ausgewählt, um vor allem verschiedene Kopfspiele und deren Einfluss auf den Stempelverschleiß zu untersuchen. Die in der Simulation untersuchten Einflüsse des Kopfspiels auf die Stempelbewegung während des Schnittschlags und dessen Einfluss auf den Stempelverschleiß konnte dadurch nachgewiesen werden.

Die Untersuchung des Stempelverschleißes während des Schnittschlags diente auch als Validierung der Messung der Durchbruchkraft, die als vorrangiger Eingangsparameter der Simulation mit der das Kopfspiel für die Verschleißreduzierung ermittelt wurde, wirkte. Die Konsistenz der Riefenlängen und der im Rahmen der Simulation ermittelten Stempelwege wäre bei fehlerhafter Messung der Durchbruchkraft so nicht zu erkennen wie es der Fall ist.

9 Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen befassten sich mit der Durchbruchkraft beim Scherschneiden. Grundlage der Untersuchungen war das Lochen von Metallwerkstoffen in Feinblechform. Die Durchbruchkraft ist eine wichtige Prozesskraft während des Scherschneidprozesses, die den Übergang vom statischen Belastungsregime auf die Systemkomponenten in den dynamischen Bereich markiert. Untersuchungen, die sich mit den dynamischen Effekten des Scherschneidens befassen müssen für präzise Aussagen auf die Durchbruchkraft als Anregungskraft rekurrieren. Daher schafft die Möglichkeit, die Durchbruchkraft beim Scherschneiden experimentell zu bestimmen Grundlagen für ein besseres Prozessverständnis und für die technologische Verbesserung des Scherschneidprozesses.

Zunächst wurde der Stand der Erkenntnisse zur Durchbruchkraft beim Scherschneiden und allen damit verbundenen Themengebieten dargestellt. Daraus ergab sich, dass für das Scherschneiden keine Methodik zur Bestimmung der Durchbruchkraft vorhanden ist. Auf Grundlage dieser Beobachtung ergaben sich die Ziele, aufgeteilt in drei Teilziele für diese Arbeit.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden die in den Kapiteln 5, 6 und 7 benutzten Versuchsanlagen, Werkstoffe und Messtechnik genutzt.

Das erste Teilziel war die Entwicklung einer neuartigen Methode zur präzisen Bestimmung der Durchbruchkraft. Diese Methode bedient sich der schwingungstechnischen Effekte, die der Stempel bei der ersten Entlastung aus dem gestauchten Dehnungszustand während des Schneidprozesses erfährt. Die Entlastungswelle durchläuft den Stempel und mittels zwei Messstellen, die in einer geeigneten Weise angebracht sind, lassen sich die Durchbruchkraft und die Durchbruchzeit präzise bestimmen.

Im ersten Teilziel inkludiert war die tatsächliche Messung der Durchbruchkraft im Schneidprozess an ausgewählten Werkstoffen und mit passenden Schneidparametern. Die in den Experimenten gemessene Durchbruchkraft liegt bis zu 70 % unter der maximalen Schneidkraft, die wesentlich einfacher zu bestimmen ist, aber nicht als Eingangsgröße für Untersuchungen des Ausschwingverhaltens benutzt werden darf. Ebenfalls zeigt die Durchbruchkraft starke Sensitivität auf die Veränderung der Schneidparameter. Im Gegensatz zur maximalen Schneidkraft, die sich um maximal 2,5 % ändert, ändert sich die Durchbruchkraft um bis zu 89 %.

Ein sowie industriell als auch wissenschaftlich beachtenswertes Phänomen ist die Stempelbewegung eines zylindrischen Lochstempels während des Ausschwingvorgangs. Die Messung und Analyse dieser Bewegung war zweites Teilziel. Ein zylindrischer Lochstempel bewegt sich, wenn er mit einem vertikalen Kopfspiel versehen wird, während des Ausschwingens im Kopfspiel und schwingt gleichzeitig um seinen Massenschwerpunkt. Die Bewegung des Stempels wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Die Länge und das Material des Stempels bestimmen seine Eigenfrequenz. Untersucht wurde auch der Einfluss der Schneidparameter, die den Glattschnitt und den Lochdurchmesser steuern, der Einfluss der Kopfform und der Einfluss des Kopfspiels.

Längere Stempel haben niedrigere Eigenfrequenzen. Sie schwingen daher langsamer als kurze Stempel mit hohen Eigenfrequenzen. Diese wirkt sich vor allem aus, wenn die Stempelschwingung zusammen mit der Gesamtbewegung des Stempels im Kopfspiel betrachtet wird.

Mit der Durchbruchkraft ist der Stempel bei Durchbruch gestaucht und das bestimmt die im Stempel gespeicherte Federenergie. Insofern übt die Durchbruchkraft einen starken Einfluss auf die Bewegung des Stempels aus. Höhere Durchbruchkräfte führen zu höheren Gesamtreibwegen an der Stempelkante.

Die durch die Schneidparameter beeinflusste Lochgeometrie wirkt dämpfend auf das Ausschlagen des Schneidstempels. Bei entsprechender Einstellung kann eine Schwingung nahezu vollständig verhindert werden, was allerdings auch zu sehr hohem Stempelverschleiß während des Schneidens und zu veränderten Schnittflächengeometrien führt.

Die Kopfform führt zu anderen Reibungsverhältnissen in der Stempelspannung und kann Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften nehmen. So sind Stempel mit Posaunenhals oder zylindrischem Kopf stärker gedämpft als Stempel mit kegeligem Kopf.

Der Einfluss des Kopfspiels auf die Stempelbewegung hat im Zusammenspiel mit der Stempellänge, also der Eigenfrequenz des Stempels, den größten Beitrag. Experimentell lässt sich die Stempelbewegung nur mit großem Aufwand erfassen. Es geben sich durch Applikation von DMS allerdings Erkenntnisse über das Eigenschwingverhalten und Anhaltspunkte für die Stöße an Stempelhalte- oder Druckplatte. Vollständig lässt sich das Stempelbewegungsverhalten allerdings simulieren. Je nach Durchbruchkraft, Stempellänge und Kopfspiel ist eine veränderte Stempelbewegung mit unterschiedlichen Gesamtreibwegen an der Stempelkante festzustellen.

In allen simulativen Untersuchungen zum Gesamtreibweg sind Erhöhungen des Kopfspiels vorteilhaft im Vergleich zur Festeinspannung. Bei Erhöhungen des Kopfspiels vergrößert sich zwar der vertikal mögliche Weg des Stempels, durch die Änderung der Eigenfrequenz des freien Stempels und der Stoßvorgänge beim hin- und herfliegen zwischen Stempeldruck- und Halteplatte aber ist die Amplitude geringer und die Schwingung wird schneller abgedämpft. So ist eine Verminderung des Gesamtreibwegs in Höhe von ca. 16 % erzielbar.

Die Stempelbewegung während des Ausschwingvorgangs verursacht Mantelflächenverschleiß. Die Untersuchung dieses Verschleißes war drittes Teilziel der Arbeit. Dazu wurden drei Schneidstempel mit unterschiedlichen Kopfspielen ($0\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$) mit 100.000 Hüben belastet. Hier zeigte sich eine Verbesserung in der Riefenlänge an der Stempelmantelfläche um ca. 50 % bei einem Kopfspiel von $10\mu\text{m}$ im Vergleich zur Festeinspannung. Dies ermöglicht doppelt so viele Nachsetzoperationen bei einem Schneidstempel und verbessert so die Wirtschaftlichkeit des Scherschneidens.

Die präzise Ermittlung der Durchbruchkraft bietet vielseitige Ansätze zur Optimierung des Schneidprozesses und der damit verbundenen Phänomene. Im Schneidprozess können, wie gezeigt Schwingungen und Bewegungen analysiert und optimiert werden und somit der Verschleiß

gesenkt werden. Auch können Simulationen des Schneidprozesses vor allem im Bereich des Bruchverhaltens mit dem Wissen über die genaue Durchbruchkraft verbessert werden. Auch für eine verbesserte akustische Auslegung von Pressen und Werkzeugen ist es unabdingbar die Durchbruchkraft als Anregungskraft genau zu quantifizieren.

Wegen der hohen Sensitivität der Durchbruchkraft auf veränderte Schneidparameter, die zum Beispiel durch Variation der Restblechdicke bei Bruch einen starken Einfluss auf die Brucheigenschaften ausüben, ist diese Prozesskraft für viele industriell relevante Anwendungen nutzbar. So können bei weiter entwickelter Sensorik Bruchkräfte im Stempel direkt im industriellen Stanzprozess gemessen werden und damit indirekt auf die Verschleißzustände des Schneidstempels geschlossen werden. Messungen solcher Art versprechen vor allem in einem Industrie 4.0 Umfeld, in dem durch künstliche Intelligenz Datenauswertungen erfolgen und damit beispielsweise vorausschauende Wartung betrieben wird, ökonomische und technologische Optimierungen des Schneidprozesses.

A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8588 und DIN 8588.....	3
Abbildung 2.2:	schematische Darstellung von Lochen, Abschneiden und Ausschneiden nach DIN 8588	5
Abbildung 2.3:	schematische Darstellung der Kombinationen von vollkantig, kreuzend, drückend und ziehend schneiden nach DIN 8588	6
Abbildung 2.4:	schematische Darstellung eines Werkzeugs zum Lochen, Typischer Schneidkraft-Zeit Verlauf beim Scherschneiden	6
Abbildung 2.5:	realer Kurbelweg einer mechanischen Presse während des Schneidvorgangs.....	8
Abbildung 2.6:	Kräfte und Momente beim Lochen.....	10
Abbildung 2.7:	Wichtige Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906	12
Abbildung 2.8:	Verschleißmechanismen und Verschleißkenngrößen beim Scherschneiden	13
Abbildung 2.9:	Piezoelektrischer Effekt und Signalfluss einer piezoelektrischen Messkette mit Ladungsverstärker.....	15
Abbildung 2.10:	Applikation und Aufbau eines Folien-DMS	16
Abbildung 2.11:	Schaltplan für eine Vollbrücke und Applikation bei einachsigen Zug/Druck.....	17
Abbildung 2.12:	Einteilung von Schwingungen nach DIN 1311-1	20
Abbildung 2.13:	Skizze eines Einmassenschwingers, Mehrmassenschwingers und Kontinuumsschwingers.....	20
Abbildung 2.14:	Signalverlauf einer freien, transienten Schwingung.....	23
Abbildung 2.15:	Zerlegung einer periodischen Schwingung in Harmonische nach DIN 1311-1	24
Abbildung 2.16:	Wellenreflektionen im Stab und Resonanzbedingung	26
Abbildung 2.17:	Bruchkriterien nach DIN EN ISO 6892-1	28
Abbildung 3.1:	Struktur der Arbeit	33
Abbildung 4.1:	Phasen und mechanische Zustände des Schneidsystems.....	36
Abbildung 4.2:	Dehnungswelle mit qualitativen Dehnungen an zwei Zonen in einem Schneidstempel beim Ausschwingen	38

Abbildung 4.3:	Qualitatives Signal-Zeit-Diagramm beim Lochen. Qualitative Kraftsignale zweier Messstellen an einem Schneidstempel um den Bruchzeitpunkt.....	39
Abbildung 5.1:	Querschnitt des Einzelhubwerkzeugs.....	42
Abbildung 5.2:	Querschnitt des Dauerhubwerkzeugs	43
Abbildung 5.3:	verwendete Stempelkopfformen	45
Abbildung 6.1:	Gefügebildernach Ätzung von 1.0934, 1.4301 und 1.5528	48
Abbildung 6.2:	Spannungs-Dehnungs-Diagramme der untersuchten Werkstoffe	49
Abbildung 6.3:	Gefügebildernach Ätzung von 1.3343 und 1.2379.....	51
Abbildung 7.1:	Werkzeug mit Positionen der DMS-Brücken und Aussparung in der Führung	53
Abbildung 7.2:	Montagehilfe für die Montage des Stempels mit Vollbrückenschaltungen	54
Abbildung 7.3:	Piktogramme für Kennzeichnung des verwendeten Messkonzepts.....	55
Abbildung 7.4:	Messkette für Erfassung von Signalen aus dem Piezokraftsensor und aus Brückenschaltungen für DMS	55
Abbildung 7.5:	Vorgehen zur Kalibrierung des Piezokraftsensors und der Brückenschaltung	56
Abbildung 7.6:	Vorgehen zur quasidynamischen Kalibrierung der Vollbrückenschaltung im dynamischen Bereich.....	57
Abbildung 8.1:	Zusammenfassung der Versuchsplanung.....	59
Abbildung 8.2:	Beeinflusste Randzonen am Butzen der drei Blechwerkstoffe.....	61
Abbildung 8.3:	Vorgehen zur Erzeugung von Anschnitten.....	62
Abbildung 8.4:	Anschnittfolge in Schritten von 200 µm für den Werkstoff 1.0934	64
Abbildung 8.5:	Anschnittfolge in Schritten von 200 µm für den Werkstoff 1.4301	66
Abbildung 8.6:	Anschnittfolge in Schritten von 100 µm für den Werkstoff 1.5528	68
Abbildung 8.7:	Rissbeginn an der Matrizenkante bei den drei untersuchten Blechwerkstoffen	69
Abbildung 8.8:	Frontalansichten der Schnittflächen für die Versuchsreihe Durchbruchkraft	69
Abbildung 8.9:	Schliffbilder der Schnittflächen der Versuchsreihe Durchbruchkraft	71
Abbildung 8.10:	Schnittflächenkenngrößen der Versuchsreihe Durchbruchkraft	72
Abbildung 8.11:	Schnittflächenkenngrößen der Versuchsreihe Stempelschwingungen	73

Abbildung 8.12: Lochdurchmesser in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943 und 1.4301	74
Abbildung 8.13: Schneidkraft-Zeit-Kurven von Messstelle DMS A in Abhängigkeit der Blechwerkstoffe. Ausschwingssignale der Messstelle DMS A in Abhängigkeit der Blechwerkstoffe	75
Abbildung 8.14: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Messposition beim Schneiden von 1.0943	76
Abbildung 8.15: Ausschwingssignale der Messstelle DMS A in Abhängigkeit des Schneidspalts für die untersuchten Blechwerkstoffe	77
Abbildung 8.16: Bestimmung der maximalen Schneidkraft bei zeit- oder wegabhängiger Messung	78
Abbildung 8.17: Ausschwingverhalten und Bruchverhalten beim Lochen von 1.0943	80
Abbildung 8.18: Ausschwingverhalten und Bruchverhalten beim Lochen von 1.4301	81
Abbildung 8.19: Ausschwingverhalten und Bruchverhalten beim Lochen von 1.5528	82
Abbildung 8.20: Auswertungsmethodik der Messdaten zur Ermittlung der Durchbruchkraft	82
Abbildung 8.21: Maximale Schneid- und Durchbruchkräfte in Abhängigkeit von Werkstoff und Schneidspalt	84
Abbildung 8.22: Ausschwingssignale am Stempel beim Lochen von 1.0943 und 1.4301 ...	87
Abbildung 8.23: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943	89
Abbildung 8.24: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.4301	90
Abbildung 8.25: Vorgehensweise zur Bestimmung des logarithmischen Dekrements	91
Abbildung 8.26: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung beim 1.0943 und 1.4301	92
Abbildung 8.27: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.0943	94
Abbildung 8.28: Ausschwingssignale in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.4301	96
Abbildung 8.29: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Schneidkantenverrundung und des Kopfspiels beim 1.0943 und 1.4301	97
Abbildung 8.30: Kraftsignal am Stempelkopf beim Ausschwingen mit 100 μm Kopfspiel beim Schneiden des 1.0943	98

Abbildung 8.31: Kraftsignal am Stempelkopf beim Ausschwingen mit 200 μm Kopfspiel beim Schneiden des 1.0943	99
Abbildung 8.32: Ausschwingensignale in Abhängigkeit der Kopfform beim 1.0943 und 1.4301	101
Abbildung 8.33: Dämpfungsfaktoren in Abhängigkeit der Kopfform beim 1.0943 und 1.4301	102
Abbildung 8.34: Modellierung des Simulationsmodells und Spannungen beim ersten Aufreffen auf die Halteplatte am Stempelkopf	103
Abbildung 8.35: Dehnungsverläufe für Messung und Simulation bei 200 μm Kopfspiel. Schneidkantenverschiebungen für verschiedene Kopfspele	104
Abbildung 8.36: kumulierte Schneidkantenwege aus der Simulation in Abhängigkeit des Kopfspeils und der Stempellänge	105
Abbildung 8.37: Verschleißbild am Stempel nach 100.000 Hübem	110
Abbildung 8.38: Riefenbildung an der Stempelmantelfläche bei 0 Hub und 100.000 Hübem	111

B Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Wichtige Parameter beim Scherschneiden.....	14
Tabelle 4.1:	Modell und Realität beim Messen der Durchbruchkraft	39
Tabelle 5.1:	Technische Daten der Bruderer BSTA 1250-181	41
Tabelle 5.2:	Technische Daten der Bestandteile des Keyence VHX 2000	45
Tabelle 5.3:	Technische Daten der Wenzel LH87	46
Tabelle 5.4:	Technische Daten der Zwick Typ 1484/DUPS-M	46
Tabelle 5.5:	Technische Daten des Mahr MarSurf XCR20	46
Tabelle 6.1:	Chemische Zusammensetzung der Blechwerkstoffe	47
Tabelle 6.2:	Mechanische Kennwerte des 1.0943	49
Tabelle 6.3:	Mechanische Kennwerte des 1.4301	49
Tabelle 6.4:	Mechanische Kennwerte des 1.5528	50
Tabelle 6.5:	Physikalische Eigenschaften des 1.3343	50
Tabelle 6.6:	Chemische Zusammensetzung des 1.3343 und des 1.2379.....	51
Tabelle 8.1:	Berechnete maximale Oberflächenspannungen beim Lochen	62
Tabelle 8.2:	Berechnete maximal zu erwartende Schneidkräfte	79
Tabelle 8.3:	Werkstoffkennwerte und Schnittflächenkenngrößen von 1.0943 und 1.4301 im Vergleich	85
Tabelle 8.4:	Eigenfrequenzen in Hertz des zylindrischen Stempels	86
Tabelle 8.5:	Simulierte Eigenfrequenzen in Hertz der Stempel in Abhängigkeit der Kopfform (Frei)	86
Tabelle 8.6:	Parameter für die simulative Untersuchung der Stempelschwingung	103

C Literaturverzeichnis

- BACH, E. L. (1924). *Die Spannungen unter einem kreisrunden Stempel*. Dissertation. Technische Hochschule Karlsruhe.
- BAHRAMI, A., H. M. WILLAMSON, J. C. LAI (1998). Control of shear cutting noise: Effect of blade profile. In: *Applied Acoustics* **54.1**, 45–58.
- BARGEL, H.-J., G. SCHULZE (Hrsg.) (2018). *Werkstoffkunde*. Springer Vieweg Berlin.
- BEHRENS, B.-A., R. KRIMM, T. HASSELBUSCH (2017). *Dämpfung der Stößelschwingungen beim Scherschneiden mittels piezoelektrischer Aktoren*. URL: https://www.umformtechnik.net/binary_data/3282621_whitepaper-ifum-d-mpfung-2017-03-13-utf.pdf (besucht am 22.08.2019).
- BEHRENS, B.-A., R. KRIMM, S. HILSCHER (2014). *Neue Methoden zur Vermeidung der Schwingungen des Pressenkörpers und des Pressenstößels beim Scherschneiden*. URL: https://www.umformtechnik.net/binary_data/3159572_neue-methoden-zur-vermeidung-der-schwingungen.pdf (besucht am 22.08.2019).
- BEHRENS, B.-A., R. KRIMM, E. REITHMEIER, A. PAHLKE (2010). *EFB-Forschungsbericht Nr. 309: Flächenintegrierende Kraftmessung an Stufenpressen*. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) Hannover.
- BILL, B. (2003). *Messen mit Kristallen - Grundlagen und Anwendungen der piezoelektrischen Messtechnik*. Verlag Moderne Industrie Landsberg am Lech.
- BÖHME, W., M. LUKE, J. G. BLAUDEL, D.-Z. SUN, I. ROHR, W. HARWICK (2007). *Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation, FAT-Schriftenreihe 211*. Verband der Automobilindustrie (VDA) Frankfurt.
- BONFIG, K. W. (1995). *Technische Druck- und Kraftmessung*. expert verlag Renningen-Malmsheim.
- BREITLING, J., B. PFEIFFER, T. ALTAN, K. SIEGERT (1997). Process control in blanking. In: *Journal of Materials Processing Technology* **71.1**, 187–192.
- CHAROENSUK, K., S. PANICH, V. UTHAISANGSUK (2017). Damage initiation and fracture loci for advanced high strength steel sheets taking into account anisotropic behaviour. In: *Journal of Materials Processing Technology* **248**, 218–235.
- CZICHOS, H., K.-H. HABIG (2015). *Tribologie-Handbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- DAHL, W., R. KOPP, O. PAWELSKI, R. PANKERT (1993). *Umformtechnik Plastomechanik und Werkstoffkunde*. Springer Verlag Berlin.
- DEMMELE, P. M. (2014). *In-situ Temperaturmessung beim Scherschneiden*. Dissertation. Technische Universität München.
- DEMTRÖDER, W. (2018). *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer Berlin Heidelberg.
- DOBRINSKI, P., G. KRAKAU, A. VOGEL (2010). *Physik für Ingenieure*. Vieweg + Teubner Wiesbaden.
- DOEGE, E., B.-A. BEHRENS (2010). *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer Vieweg Berlin.

- DRESIG, H., F. HOLZWEISSIG (2016). *Maschinendynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- EDEL, K.-O. (2015). *Einführung in die bruchmechanische Schadensbeurteilung*. Springer Berlin Heidelberg.
- EVERS, W., G. SCHADING (2006). Dynamische Eigenschaften von Kraftaufnehmern bei Aufpralltests (Dynamic Properties of Force Sensors at Impact Tests). In: *tm – Technisches Messen* **73**.12, 2.
- FRITSCH, C. (2002). *Einfluss der Prozessparameter auf das Feinschneiden von Aluminiumlegierungen*. Dissertation. Technische Universität München.
- FRITZ, A. H. (2018). *Fertigungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg.
- GHIOTTI, A., P. REGAZZO, S. BRUSCHI, P. F. BARIANI (2010). Reduction of vibrations in blanking by MR dampers. In: *CIRP Annals* **59**.1, 275–278.
- GRAND VIEW RESEARCH (2019). URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-stamping-market> (besucht am 22. 11. 2019).
- GROSS, D., T. SEELIG (2016). *Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. Springer Berlin Heidelberg.
- GROTE, K.-H., J. FELDHUSEN (2018). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Berlin Heidelberg.
- HAUPT, H. (2003). *Ein auf der Schallemissionsanalyse basierendes Verfahren zur Risserkennung in Umformprozessen*. Dissertation. Universität Paderborn.
- HILDEBRAND, R. (1970). *Untersuchungen über das geräuscharme Schneiden von Elektroblech in einer Vier-Säulen-Exzenterpresse*. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- HILDERING, S., M. MICHALSKI, U. ENGEL, M. MERKLEIN (2015). Tool Load Sensitivity Against Multidimensional Process Influences in Microblanking of Thin Metal Foils With Silicon Punches. In: *Volume 1: Processing*. ASME.
- HIRSCH, M. (2012). *Einfluss von Leichtbauwerkstoffen in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen auf das Verschleißverhalten*. Dissertation. Technische Universität München.
- HIRSCH, M., P. DEMMEL, R. GOLLE, H. HOFFMANN (2011). Light Metal in High-Speed Stamping Tools. In: *Key Engineering Materials* **473**, 259–266.
- HOFFMANN, H. (1973). *Untersuchungen über den Einfluß des statischen und dynamischen Verhaltens einer Presse in vertikaler Richtung auf den Eintauchvorgang beim Schneiden*. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- HOFFMANN, H., G. SPUR, R. NEUGEBAUER (2012). *Handbuch Umformen*. Carl Hanser Fachbuchverlag München.
- HOFFMANN, K. (2015). *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH Darmstadt.
- HOOGEN, M. (1999). *Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeinblechen*. Dissertation. Technische Universität München.
- HÖRMANN, F. (2008). *Einfluss der Prozessparameter auf einstufige Scherschneidverfahren zum Ausschneiden mit endkonturnaher Form*. Dissertation. Technische Universität München.

- HORNBOGEN, E., H. WARLIMONT (2015). *Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. Springer Vieweg Berlin Heidelberg.
- HSM STAHL- UND METALLHANDEL GMBH (2019). Werkstoffdatenblatt 1.3343 / HS6-5-2C. URL: https://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user_upload/datenblatt/HSM_Datenblatt_1.3343.pdf (besucht am 23.08.2019).
- JÄGER, H., R. MASTEL, M. KNAEBEL (2016). *Technische Schwingungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KASPARBAUER, M. (1999). *Optimierte Bestimmung der Prozeßkräfte beim Feinschneiden*. Dissertation. Technische Universität München.
- KEIL, S. (2017). *Dehnungsmessstreifen*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KLOCKE, F. (2017). *Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*. Springer Berlin Heidelberg.
- KNAPP, J., E. ALTMANN, J. NIEMANN, K.-D. WERNER (1998). Measurement of shock events by means of strain gauges and accelerometers. In: *Measurement* **24.2**, 87–96.
- KOBUSCH, M., T. BRUNS, R. KUMME (2008). Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern. In: *PTB-Mitteilungen* **118.3**, 152–157.
- KOLBE, M., W. HELLWIG (2018). *Spanlose Fertigung Stanzen: Stanzteile · Feinstanzteile · Hochleistungsstanzwerkzeuge · Hochleistungs- und Feinstanzpressen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KOLLMANN, T., H. SCHMIDT (2016). *Deutschland 4.0*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KOLLMANT, W., P. O'LEARY, M. HARKER, T. KLUNSNER, S. ECK (2018). Force and acoustic emission measurements for condition monitoring of fine blanking tools. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Houston: IEEE.
- KOSS, L. L. (1981). Modified formula for the prediction of noise from a punch press. In: *Journal of Sound and Vibration* **78.4**, 594–597.
- LAI, J. C., C. SPEAKMAN, H. M. WILLIAMSON (1999). Control of shear cutting noise—effectiveness of enclosures. In: *Applied Acoustics* **58.1**, 69–84.
- LANGE, K. (Hrsg.) (1990). *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 3: Blechbearbeitung*. Springer Berlin Heidelberg.
- LEISTNER, E., E. WECK (1983). *Metallographische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren Teil II: Farbätzmittel nach Beraha und ihre Abwandlungen*. Deutscher Verlag für Schweißtechnik Düsseldorf.
- LOIBL, D. (2003). *Standzeit und Teilequalität beim Lochen von Feinblechen mit keramischen Schneidstempeln*. Dissertation. Technische Universität München.
- M. OTSU, C. YAMAGATA, K. OSAKADA (2003). Reduction of Blanking Noise by Controlling Press Motion. In: *CIRP Annals* **52.1**, 245–248. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607605769>.
- MAGNUS, K., K. POPP, W. SEXTRO (2016). *Schwingungen: Grundlagen, Modelle, Beispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- MAIR, J. (2016). *Dynamische Belastungen von Lochstempeln beim Scherschneiden*. Dissertation. Technische Universität München.

- MARTINS, P., A. G. ATKINS (2013). Revisiting the empirical relation for the maximum shearing force using plasticity and ductile fracture mechanics. In: *Journal of Materials Processing Technology* **213**.9, 1516–1522.
- MATUSZEWSKI, H. (1980). *Untersuchung der Größe der Schnitt- und Rückzugskraft und des Größenverhältnisses zueinander als Funktion von verschiedenen Parametern beim Lochen von Blechen*. Westdeutscher Verlag Opladen.
- MÖSER, M. (2010). *Messtechnik der Akustik*. Springer Berlin Heidelberg.
- MURAKAWA, M., J. MO, Y. WAKATSUKI, N. KOGA (2001). Investigation of blanking noise reduction using a hydraulic inertia damper. In: *Journal of Materials Processing Technology* **112**.2-3, 205–213.
- NEUGEBAUER, R., J. FISCHER (2000). *EFB-Forschungsbericht Nr. 146: Vorstudie zur Erkennung von Ausbrüchen an Stempel- und Matrizenkanten von Schneidwerkzeugen mittels Kraft- und Schallemissionsmessungen*. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) Hannover.
- NEUMAYER, F. F., W. VOLK (2018). *EFB-Forschungsbericht Nr. 490: Erhöhung der Werkzeugstandzeit durch Anpassung des Kopfspiels von Lochstempeln an die Durchbruchkraft*. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) Hannover.
- NOTHHAFT, K. (2014). *Scherschneiden höchstfester Blechwerkstoffe im offenen Schnitt*. Dissertation. Technische Universität München.
- REDECKER, M. K. J. (2009). *Erweiterte Ermittlung der Umformeigenschaften von Magnesiumfeinblechen*. Dissertation. Technische Universität München.
- REULEAUX, F. (1861). *Der Constructeur. Ein Handbuch zum Gebrauch beim Maschinen-Entwerfen*. Friedrich Vieweg und Sohn Braunschweig.
- RICHARD, H. A., M. SANDER (2012). *Ermüdungsrisse*. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden.
- RICHARDS, E. J., G. J. STIMPSON (1985). On the prediction of impact noise, Part IX: The noise from punch presses. In: *Journal of Sound and Vibration* **103**.1, 43–81.
- ROMANOWSKI, W. (1959). *Handbuch der Stanzereitechnik*. Verlag Technik Berlin.
- ROOS, E., K. MAILE, M. SEIDENFUSS (2017). *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer Vieweg Berlin.
- RÖSLER, J., H. HARDERS, M. BÄKER (2012). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Springer Vieweg Wiesbaden.
- SCHMELZER, M. (2007). Identifikation linear viskoelastischer Werkstoffparameter. In: *VDI-Berichte* 2003, 41–53.
- SCHOSSIG, M. (2011). *Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen: Quasistatische und dynamische Untersuchungen*. Vieweg+Teubner Wiesbaden.
- SCHULER GMBH (Hrsg.) (1996). *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- SCHÜRR, H. (1981). Scherschneiden von Blech mit elektronisch-hydraulischer Schnittschlagdämpfung. In: *wt -Zeitschrift für industrielle Fertigung* **71**.2, 71–75.
- SIEGERT, K. (2015). *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Springer Berlin Heidelberg.

SOMMER, K., R. HEINZ, J. SCHÖFER (2018). *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

TETELMAN, A. S., A. J. MCEVILY (1971). *Bruchverhalten technischer Werkstoffe*. Verlag Stahleisen Düsseldorf.

TOUSSAINT, A. (2000). *Einfluss des Werkzeugverschleisses auf die Teilequalität beim Scherschneiden von Elektroblechen*. Dissertation. Technische Universität München.

VAN BASSHUYSEN, R., F. SCHÄFER (2017). *Handbuch Verbrennungsmotor*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

VOESTALPINE STEEL DIVISION (2019). phs-ultraform Datenblatt. URL: <https://www.voestalpine.com/stahl/content/download/4714/file/phs-ultraform-voestalpine-DE-20180828.pdf> (besucht am 23.08.2019).

WADI, I., R. BALENDRA (1999). An intelligent approach to monitor and control the blanking process. In: *Advances in Engineering Software* **30.2**, 85–92.

WECK, M., M. KRELL, E. DOEGE, M. DERENTHAL (2002). Optimierung des dynamischen Verhaltens von Schnellläuferpressen. In: *VDI-Berichte* 1736.

WEISSBACH, W., M. DAHMS, C. JAROSCHEK (2015). *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

D Normenverzeichnis

DIN 1311-1 (2000). *Schwingungen und schwingungsfähige Systeme: Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 1311-2 (2002). *Schwingungen und schwingungsfähige Systeme: Teil 2: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 50125 (2016). *Prüfung metallischer Werkstoffe: Zugproben*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 5118 (2017). *Werkzeuge der Stanztechnik: Schneidstempel mit Posaunenhals*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 8580 (2003). *Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 8588 (2013). *Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 9844 (1975). *Runde Schneidstempel mit zylindrischem Kopf*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 9861-1 (1992). *Runde Schneidstempel mit durchgehendem Schaft bis 20 mm Schneiddurchmesser*. Beuth Verlag Berlin.

DIN 9869-2 (1969). *Begriffe für Werkzeuge der Stanztechnik Schneidwerkzeuge*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN 10088-3 (2014). *Nichtrostende Stähle – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN 10346 (2015). *Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen: Technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN 1330-9 (2017). *Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN 14410 (2003). *Klebebänder: Messung der Bruchkraft und der Reißdehnung Deutsche Fassung EN 14410:2003*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN ISO 148-1 (2017). *Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN ISO 1924-2 (2009). *Papier und Pappe – Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung – Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min)*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN ISO 3379 (2015). *Leder: Bestimmung der Narbendehnfähigkeit und -bruchkraft (Lastometer-Methode) (ISO 3379:2015); Deutsche Fassung EN ISO 3379:2015*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN ISO 4957 (2001). *Werkzeugstähle*. Beuth Verlag Berlin.

DIN EN ISO 6892-1 (2017). *Metallische Werkstoffe – Zugversuch: Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016*. Beuth Verlag Berlin.

DIN ISO 15754 (2010). *Papier und Pappe: Bestimmung der Bruchkraft in z-Richtung- (ISO 15754:2009)*. Beuth Verlag Berlin.

DIN ISO 6265 (2013). *Alpinski: Bestimmung der Verformungskraft und der Bruchkraft (ISO 6265:2013)*. Beuth Verlag Berlin.

DIN ISO 7797 (1986). *Langlaufski: Bestimmen der Bruchkraft und der Durchbiegung beim Bruch mit quasistatischer Beanspruchung - Identisch mit ISO 7797:1985*. Beuth Verlag Berlin.

DIN ISO 8020 (2003). *Werkzeuge der Stanztechnik Schneidstempel mit zylindrischem Kopf und glattem oder abgesetztem Schaft*. Beuth Verlag Berlin.

DIN V ENV 13005 (1999). *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Beuth Verlag Berlin.

GFT ARBEITSBLATT 7 (2002). *Tribologie. Definitionen, Begriffe, Prüfung*. Gesellschaft für Tribologie.

VDI-RICHTLINIE 2906 (1994). *Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall Scherschneiden*. Beuth Verlag Berlin.

VDI-RICHTLINIE 3368 (1982). *Schneidspalt-, Schneidstempel- und Schneidplattenmaße für Schneidwerkzeuge der Stanztechnik*. Beuth Verlag Berlin.

VDI-RICHTLINIE 3374 (2004). *Schneidstempel mit Bund: mit und ohne Abdruckstift, Einsatzhülsen, Stempelhalteplatten und Druckplatten, Polyurethanabstreifer und Halter für Polyurethanabstreifer in Stanzerei-Großwerkzeugen*. Beuth Verlag Berlin.

VDI-RICHTLINIE 3752 (1993). *Emissionskennwerte technischer Schallquellen: Werkzeugmaschinen - Pressen zum Schneiden von Blech (Schneidpressen)*. Beuth Verlag Berlin.

VDI-RICHTLINIE 3830 (2004). *Werkstoff- und Bauteildämpfung: Dämpfung von Baugruppen*. Beuth Verlag Berlin.

Studienarbeiten

Die nachfolgend aufgeführten Studienarbeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München angefertigt.

Die Aufgabenstellung und Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung von Franz Ferdinand Neumayer. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil mit in diese Arbeit eingeflossen.

Matthias Dietrich	Konzept und Konstruktion eines Versuchsstands zur schneidkantennahen hochfrequenten Schneidkraftmessung beim Scherschneiden
Ferdinand Große-Dunker	Umkonstruktion eines Schneidwerkzeugs für Verschleißuntersuchungen im Dauerhubbetrieb
Moritz Göhring	Hochfrequente Kraftmessung an Schneidstempeln
Carolina Diess	Vergleichbarkeit von Zugversuchen bezüglich Probengröße und Messverfahren
Michael Butzhammer	Simulative Optimierung des Kopfspiels von Lochstempeln beim Scherschneiden unter Berücksichtigung von Werkzeugschwingungen zur Erhöhung der Stempelstandzeit
Ferdinand Große-Dunker	Einflüsse auf das Dämpfungsverhalten von Schneidstempeln beim Scherschneiden