



Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
der Technischen Universität München

Einfluss von Leichtbauwerkstoffen in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen auf das Verschleißverhalten

Martin Josef Hirsch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Die Dissertation wurde am 08.06.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.11.2012 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. Hartmut Hoffmann, gilt mein besonderer Dank für die Ermöglichung der freien Bearbeitung meiner Forschungsthemen am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen und das mir dabei allzeit entgegengebrachte Vertrauen. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München für das weitergehende Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Baier, Ordinarius des Lehrstuhls für Leichtbau für die Tätigkeit als Korreferent.

Allen Mitarbeitern und Studenten des Lehrstuhls danke ich für die freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung meiner Dissertation. Insbesondere Herr Dr.-Ing. Roland Golle und Herr Peter Demmel haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Sie standen mir stets mit wertvollen Anmerkungen und als Diskussionspartner unterstützend zur Seite.

Ganz besonders danke ich meiner Familie und meiner Ehefrau Sabrina, die durch ihre andauernde Förderung, ihre Geduld und ihren Rückhalt, meinen Werdegang ermöglicht haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

München, im November 2012

Martin Hirsch

Resümee

Von Stanzteilen für die Elektronikindustrie wie z. B. Steckkontakten oder Halbleiterträgern werden in der Regel jeweils mehrere Millionen Stück benötigt. Aus diesem Grund werden derartige Teile mit Hubfrequenzen bis zu 4000 Hüben pro Minute aus Blechen oder Metallfolien auf Hochleistungs-Schnellläuferpressen gefertigt. Aufgrund der hohen Hubfrequenzen kommt es bei jedem Hub zu Impulsanregungen des Werkzeugs beim Auftreffen des Niederhalters auf den Blechwerkstoff sowie zur Anregung einer Schwingung aufgrund des Schnittschlages zum Zeitpunkt des Durchbrechens des Blechwerkstoffes. In Zusammenhang mit der Stößelbewegung entsteht eine periodisch wiederkehrende Schwingung im Stanzwerkzeug. Während horizontale Bewegungen zu schädlichen Fehlstellungen zwischen Stempel und Matrize führen, erhöht sich durch vertikale Schwingungen der Verschleiß der Stempel, insbesondere im Mantelflächenbereich.

Ziel der Untersuchungen war es, diese Schwingungen durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen als Plattenwerkstoff im Kraftfluss der Schneidwerkzeuge zu minimieren. In einem entwickelten Versuchswerkzeug wurden Kopf- und Grundplatte in den metallischen Werkstoffvarianten Stahl, Aluminium und Magnesium sowie aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff eingesetzt. Zur Bestimmung des Einflusses dieser Werkstoffe mit unterschiedlichen Elastizitätsmodulen und Werkstoffdichten auf das Schwingungs- und Dämpfungsverhalten wurden Weg-, Kraft- und Beschleunigungssensoren im Werkzeug integriert. Die Schwingungssituation im Werkzeug konnte so durch Auswertung der Messergebnisse sowie der in den Praxisversuchen ermittelten Verschleißparameter untersucht werden. Begleitend wurde das System hinsichtlich der relevanten Eigenfrequenzen und Eigenformen in der Simulation betrachtet. Ein positiver Effekt beim Einsatz von Leichtbauwerkstoffen als Werkzeugplatten in einem schnelllaufenden Schneidwerkzeug konnte nachgewiesen werden.

Executive Summary

Several punched parts for the electronic industry, such as contact pins or leadframes for semiconductors are often produced with frequencies up to 4000 strokes per minute in high-speed stamping tools. Because of high gating velocities in the blanking tool there is a recurring acceleration at the moment, when the blank holder contacts the sheet metal and when the sheet cracks. This is also known as the impact shock during the blanking process. Through these impulses and through the cycle of the plunger movement a periodic oscillation arises in the tool. Horizontal vibrations can lead to an undefined position between punches and die-plate, while vertical movement leads to increased wear because of friction forces between the blanked surface and the lateral area of the punches.

Goal of the project was to minimize these oscillations in blanking tools by usage of the lightweight materials carbon fibre reinforced plastic, magnesium or aluminium instead of steel as plates in the flux of forces. An experimental blanking tool was developed to investigate the effect of these lightweight materials with different Young's moduli and densities on the oscillation behaviour. With integrated sensors for force, acceleration and distance the oscillation-effects were recorded during the blanking process. The wear of the punches was measured after practical endurance tests while using different plate materials. Additionally structural analyses were done to determine the eigenmodes and eigenfrequencies of the relevant parts in the tool.

A positive effect of the usage of lightweight materials in high-speed blanking tools could be substantiated with lower amplitudes of the oscillations during the cutting process and with a decrease of wear of the punches in practical tests.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	3
2.1	Einteilung von Schneidverfahren	3
2.2	Kräfte und Momente beim Scherschneiden	5
2.3	Einflussgrößen auf den Scherschneidprozess	9
2.4	Werkzeugverschleiß	10
2.4.1	Verschleißmechanismen beim Scherschneiden	10
2.4.2	Verschleißkenngrößen	11
2.5	Schnittflächenausprägung	13
2.6	Konstruktion und Auslegung von Schneidwerkzeugen	13
2.6.1	Werkzeuggestell	13
2.6.2	Minimal realisierbarer Lochdurchmesser	14
2.7	Messtechnik in Schneid- und Umformwerkzeugen	15
2.7.1	Dehnungsmessstreifen (DMS) in Kraftsensoren.....	16
2.7.2	Piezoelektrische Kraft- und Beschleunigungsmessung	16
2.7.3	Wegmessung mittels Wirbelströmen	17
2.8	Schwingungen	18
2.8.1	Schwingungssysteme mit einem Freiheitsgrad.....	18
2.8.2	Schwingungssysteme mit unendlich vielen Freiheitsgraden	22
2.8.3	Schwingungsanregung.....	23
2.8.4	Dämpfung	25
2.8.5	Schnittschlag und Schnittschlagdämpfung	27
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung	30
4	Versuchs- und Messeinrichtungen	31
4.1	Schnellläuferpresse	31
4.2	Bandvorschub	32
4.3	Haspel und Richtapparat	32
4.4	Butzenabsaugung.....	33
4.5	Profilmesseinrichtung	34
4.6	Universalprüfmaschine	35
4.7	Rasterelektronenmikroskop	35

5	Versuchswerkstoffe	36
5.1	Werkzeugplattenwerkstoffe	36
5.1.1	Stahl und Aluminiumlegierung als übliche Plattenwerkstoffe	36
5.1.2	Magnesiumlegierung und CFK als neuartige Plattenwerkstoffe.....	37
5.2	Stempelwerkstoffe	42
5.2.1	Schnellarbeitsstahl	42
5.2.2	Pulvermetallurgisch hergestellter Stahl	43
5.2.3	Hartmetall.....	43
5.2.4	Festigkeits- und Härtekenwerte der eingesetzten Stempelwerkstoffe.....	44
5.3	Blechwerkstoff	45
6	Versuchsplan	47
7	Versuchswerkzeug	48
7.1	Werkzeugkonzept.....	48
7.2	Werkzeugkonstruktion	48
7.2.1	Schneidstempelanordnung.....	48
7.2.2	Werkzeugaufbau	49
7.2.3	Varianten der Kopf- und Grundplatten.....	52
7.3	Messtechnik im Versuchswerkzeug.....	54
7.3.1	Kraftmessung.....	55
7.3.2	Beschleunigungsmessung	56
7.3.3	Wegmessung	57
7.3.4	Datenerfassung und Auswertung	57
8	Versuchsbeschreibung.....	59
8.1	Prozessparameter für die Schneidversuche	59
8.1.1	Stempeldurchmesser	59
8.1.2	Matrizengeometrie und Schneidspalt	59
8.1.3	Festlegung der Stempeleintauchtiefe und der Werkzeugschließhöhe.....	60
8.1.4	Niederhalterkraft	60
8.1.5	Plattenmassen	61
8.1.6	Geschwindigkeitsverlauf der Werkzeugbewegung	62
8.1.7	Schnittteilgeometrie.....	63

8.2	Durchführung der Schneidversuche.....	63
8.3	Auswertung der Prozess-Messergebnisse.....	64
8.4	Auswertung des Stempelverschleißes	65
8.5	Finite Elemente Simulationsprogramm	66
9	Versuchsergebnisse	68
9.1	Schwingungsformen der Werkzeugplatten.....	68
9.1.1	Schlagartige Belastung durch die Schnellläuferpresse	68
9.1.2	Schwingungsanregung und Abgleich mit Simulationsergebnissen	69
9.2	Eigenschwingungen des Werkzeugoberteils.....	71
9.3	Presseneigenschaften	74
9.3.1	Eintauchtiefenveränderung	74
9.3.2	Betrachtungen zum Nachlaufwinkel	77
9.3.3	Eigenfrequenz des Pressenstößels	78
9.4	Ergebnisse aus Schneidversuchen.....	79
9.4.1	Charakterisierung eines Pressenhubes anhand von Messergebnissen	79
9.4.2	Einfluss der Pressenhubfrequenz.....	84
9.4.3	Reproduzierbarkeit der Messergebnisse	88
9.4.4	Einfluss des Plattenwerkstoffs auf das Schwingungsverhalten.....	89
9.4.5	Verschleißverhalten unterschiedlicher Stempelwerkstoffe.....	93
9.4.6	Einfluss des Plattenwerkstoffes auf das Verschleißverhalten	97
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
11	Verzeichnisse.....	105
11.1	Abbildungsverzeichnis	105
11.2	Tabellenverzeichnis	109
11.3	Literaturverzeichnis	111
11.4	Normen und Richtlinien	122
12	Anhang.....	125

Verzeichnis der Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
A		Amplitude
A_m		Mittlere Amplitude
A_n		n. Amplitude einer Schwingung
b	Ns/m	Dämpfungskoeffizient
C_f	N/m	Federkonstante
C_s	-	Bezogener Schneidwiderstand
d	-	Verlustfaktor
d_f	-	Verlustfaktor des Faserwerkstoffes
d_m	-	Verlustfaktor des Matrixwerkstoffes
d_{Verbund}	-	Verlustfaktor des Werkstoffverbundes
d_{min}	mm	Minimaler Stempeldurchmesser
D	-	Lehr'sches Dämpfungsmaß
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E_{\parallel}	N/mm ²	Faserparalleler Elastizitätsmodul
E_{\perp}	N/mm ²	Fasersenkrechter Elastizitätsmodul
f	Hz	Frequenz
f_n	Hz	n. Eigenfrequenz
F	N	Kraft
F_H	N	Horizontalkraft
F_N	kN	Nennpresskraft
F_S	N	Schneidkraft
$F_{S_{\text{max}}}$	N	Maximale Schneidkraft
F_V	N	Vertikalkraft
h_B	mm	Bruchflächenhöhe
h_E	mm	Kanteneinzugshöhe
h_G	mm	Grathöhe
h_S	mm	Glattschnitthöhe
I_D	Ns	Dirac-Impuls
k	-	Amplitudenverhältnis

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
k_s	N/mm ²	Schneidwiderstand
l_s	mm	Länge der Schnittlinie
m	kg	Masse
M_A	Nm	Inneres Moment im Stanzstreifen
M_S	Nm	Inneres Moment im Schnittteil
Q	-	Güte
R	Ω	elektrischer Widerstand
ΔR	Ω	Widerstandsänderung
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze
s	mm	Blechdicke
$t_{\text{Stoß}}$	s	Wirkungsdauer eines Stoßes
T	s	Periodendauer
T_G	°C	Glasübergangstemperatur
u_s	mm	Schneidspalt
V_f	-	Volumenanteil des Faserwerkstoffes
x	m	Auslenkung
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung
β	°	Bruchflächenwinkel
δ	-	Abklingkoeffizient
Λ	-	Logarithmisches Dekrement
μ	-	Reibkoeffizient
π	-	Kreiszahl
ρ	t/m ³	Dichte
φ_0	-	Phasenverschiebung
σ	N/mm ²	Spannung
σ_{\parallel}	N/mm ²	Faserparallele Druckfestigkeit
σ_{\perp}	N/mm ²	Fasersenkrechte Druckfestigkeit
ω_0	1/s	Eigenkreisfrequenz eines Systems
ω_d	1/s	Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung

Mit dem Trend zur Miniaturisierung von Bauteilen sowie dem Ziel hoher Ausbringungen steigen die Genauigkeitsanforderungen an Presse und Werkzeug stark an. Fortschrittliche Fertigungsverfahren, die Möglichkeiten der FE-Simulation zur Bauteil- und Werkzeugauslegung sowie leistungsfähige Sensorik zur Prozessüberwachung machen trotz dieser Herausforderung eine wirtschaftliche Fertigung von hochwertigen Stanzteilen auch in Ländern mit hohem Lohnkostenanteil möglich.

Um im internationalen Wettbewerb weiterhin bestehen zu können, sind kontinuierliche Weiterentwicklungen mit der Absicht der Verringerung der Stückkosten sowie der weiteren Erhöhung der Bauteilqualität notwendig. Beide Ziele werden mit vorliegender Arbeit durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen verfolgt. Neben einer wissenschaftlichen Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Plattenwerkstoffen soll durch eine Optimierung der Schwingungseigenschaften der Werkzeugverschleiß minimiert und die Genauigkeit der produzierten Bauteile verbessert werden.

Während die Plattenwerkstoffe Stahl und Aluminiumlegierungen in industriellen Stanzwerkzeugen bereits verbreitet sind, werden neben diesen zwei neuartige Werkstoffe untersucht. Dabei handelt es sich um eine Legierung des metallischen Leichtbauwerkstoffes Magnesium und um einen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff. Die Bewertung der Prozessoptimierung durch den Einsatz dieser Plattenwerkstoffe in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen erfolgt dabei am Beispiel des Schneidvorganges sowohl mit Hilfe messtechnischer Untersuchungen während des Scherschneidvorganges als auch mit Verschleißmessungen an den Werkzeugaktivelementen nach Dauerhubversuchen.

Im Gegensatz zu einer möglichst steifen Ausführung von Werkzeugen zur Stanzteillfertigung sollen in den Untersuchungen die Vorteile des gezielten Einsatzes von Leichtbauwerkstoffen mit individuellen Steifigkeiten aufgezeigt werden. Im Vordergrund steht dabei nicht die Gewichtseinsparung im Werkzeug, sondern die Wahl optimaler Parameter für einen schwingungsarmen Produktionsprozess.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Einteilung von Schneidverfahren

Neben den Hauptgruppen Urformen, Umformen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaft ändern wird in [DIN8580] mit der Ordnungsnummer 3 das Fertigungsverfahren Trennen aufgeführt (Abbildung 2.1). In der Blechteilfertigung wird davon der Gruppe Zerteilen und hierin wiederum der Untergruppe Scherschneiden eine bedeutende wirtschaftliche Rolle zugeschrieben, da ein Großteil der in hoher Stückzahl gefertigten Bauteile mit diesem Trennverfahren aus Blechhalbzeug geschnitten werden. Nach [DIN8588] wird einhubiges Scherschneiden als Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen und der Schnitt entlang der gesamten Schnittlinie in einem Hub erfolgt, definiert.

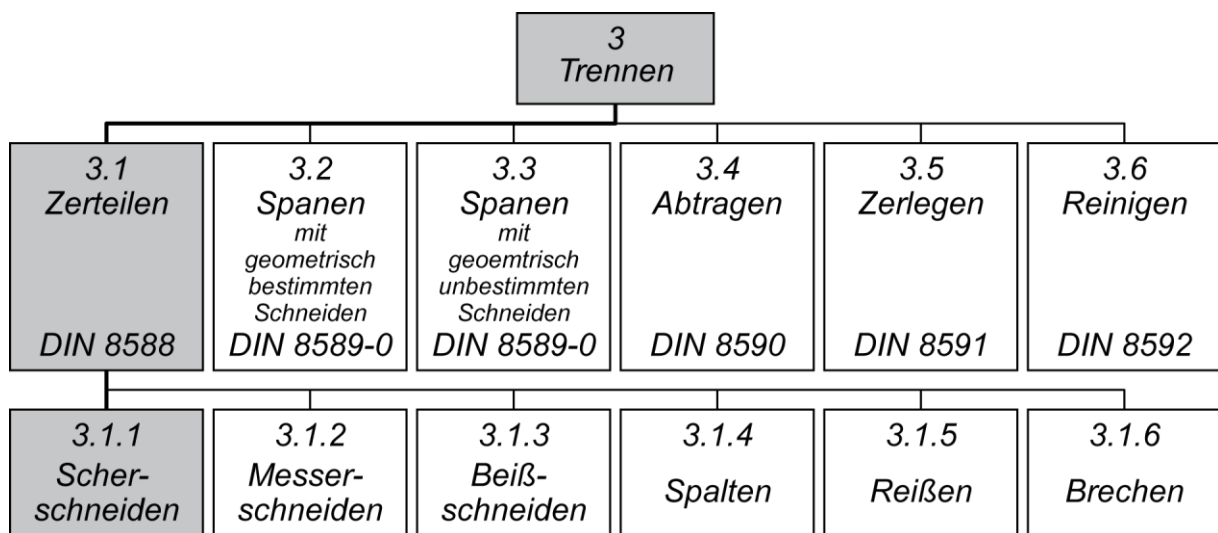


Abbildung 2.1: Einordnung der Untergruppe Scherschneiden in die Fertigungsverfahren nach [DIN8580]

Eine weitere Unterteilung der trennenden Fertigungsverfahren kann anhand der Schnittlinie erfolgen. In Abbildung 2.2 werden mit dem Ausschneiden (a) und Lochen (b) zwei Formen mit geschlossener Schnittlinie dargestellt, während in (c) das Abschneiden als Verfahren mit offener Schnittlinie abgebildet ist.

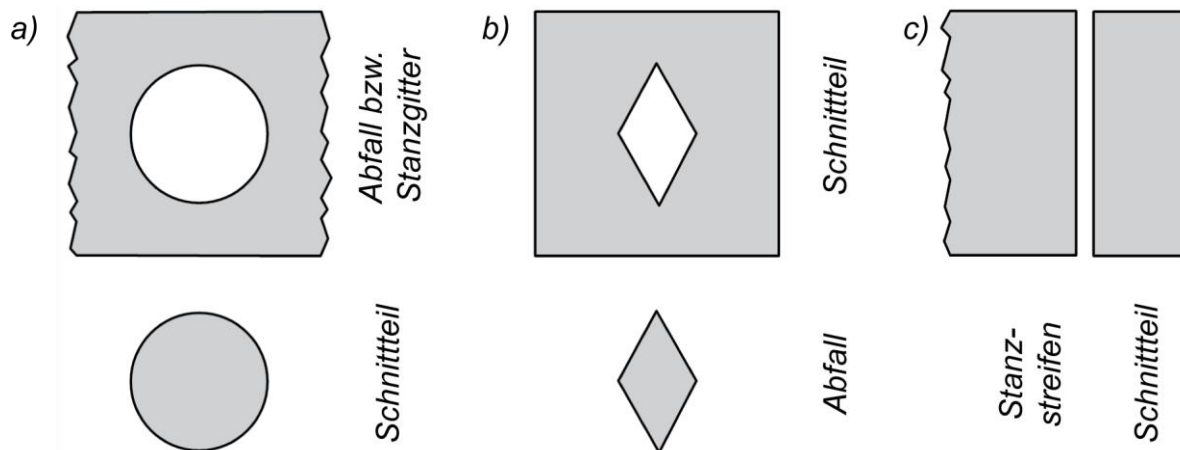


Abbildung 2.2: a) Ausschneiden, b) Lochen (geschlossener Schnitt), c) Abschneiden (offener Schnitt) [DIN8588]

Zur Beschreibung des Schneidvorganges werden in der Norm außerdem die Begriffe „drückend“ und „ziehend“ eingeführt, die sich aus der Bewegungsrichtung zwischen Schneidwerkzeug und Werkstück entweder senkrecht oder schräg zur Schneide bestimmen lassen. Während beim Messer- und Beißschneiden nur der vollkantige Schnitt mit einer Schneide, die von Beginn an in der vollen Länge der Schnittlinie wirkt, definiert ist, kann beim Scherschneiden auch kreuzend geschnitten werden. Beim kreuzenden Schnitt dringt die Schneide entlang der Schnittlinie erst allmählich in das Werkstück ein. [DIN8588]

Obwohl in der Werkstatttechnik häufig der Begriff „Stanzen“ für das Scherschneiden verwendet wird, soll er laut [DIN8588] nicht mehr als Synonym eingesetzt werden. Da der Begriff neben dem Scherschneiden auch Biege- und Umformverfahren mit einbezieht, umfasst er tatsächlich Verfahren über mehrere Hauptgruppen hinweg und eignet sich daher nicht zur eindeutigen Verfahrensbeschreibung. [HOFF10] hingegen erlaubt die Verwendung des weithin verbreiteten Begriffs „Stanzen“ für Kombinationen aus Schneiden und Umformen von Blechteilen, wenn keines der beiden Verfahren dominiert.

2.2 Kräfte und Momente beim Scherschneiden

Die für den Schneidvorgang notwendigen Kräfte müssen zur Werkzeugauslegung und zur Auswahl der Produktionspresse vorab abgeschätzt werden. Zur Berechnung der maximalen Schneidkraft für den vollkantigen drückenden Scherschneidvorgang werden in der Literatur und Praxis die in Formel 2.1 eingesetzten Parameter herangezogen [BRUD10], [DOEG10], [KLOC06], [LANG90], [SCHU96b].

$$F_{Smax} = l_s \cdot s \cdot k_s \quad (2.1)$$

$$\text{mit } k_s = c_s \cdot R_m \quad (2.2)$$

l_s	Länge der Schnittlinie [mm]
s	Blechdicke [mm]
k_s	Schneidwiderstand [N/mm ²]
c_s	bezogener Schneidwiderstand [-]
R_m	Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes [N/mm ²]

Der bezogene Schneidwiderstand c_s ist dabei von den Blechwerkstoffeigenschaften abhängig und bewegt sich nach [KLOC06] und [LANG90] für Fälle, in denen der Stempeldurchmesser mindestens dem Zweifachen der Blechdicke entspricht, üblicherweise in einem Intervall zwischen 0,6 und 0,95. Bei empirischen Ermittlungen dieses Parameters c_s ließen sich noch weitere Einflussparameter wie der eingestellte Schneidspalt, die Geometrie der Schnittlinie, die Schneidkantengeometrie bzw. der Verschleißzustand der Werkzeuge, die Oberflächengüte der Werkzeuge, die Schmierung oder die Prozesstemperatur ermitteln.

Die für den Trennvorgang notwendige Schneidkraft F_{Smax} setzt sich aus verschiedenen Kraftkomponenten zusammen, die während des Schneidvorganges zwischen Matrize, Blechwerkstoff und Stempel in der Scherschneidzone wirken (Abbildung 2.3). Den Hauptanteil der Schneidkraft F_{Smax} bildet die Vertikalkraft F_V , die am Schneidstempel angreift. Die höchsten Flächenpressungen auf der Stempelstirnfläche treten dabei in einem Bereich nahe der Schneidkante auf und fallen mit größer werdendem Abstand zur Schneidkante ab [BACH24], [TIMM56]. Biegemomente im Blechwerkstoff, die aufgrund des Schneidspaltes u_s zwischen Stempel und Matrize bzw. des horizontalen Abstandes der resultierenden Vertikalkräfte entstehen, können

sowohl beim Abschneiden als auch beim Ausschneiden ein Abheben des Bleches von der Stempelstirnfläche in einiger Entfernung von der Schneidkante bewirken. Horizontalkräfte F_H und F_H' zwischen Blechwerkstoff und den Mantelflächen der Werkzeugaktivelemente bewirken bei einer Gleitbewegung eine vom Reibungskoeffizienten μ abhängige Vertikalkraftkomponente, die einen weiteren Anteil der Schneidkraft darstellt. Die auf den Schneidstempel einwirkenden Kräfte greifen aufgrund des Kräftegleichgewichts in entgegengesetzter Richtung auch an der Schneidmatrize an.

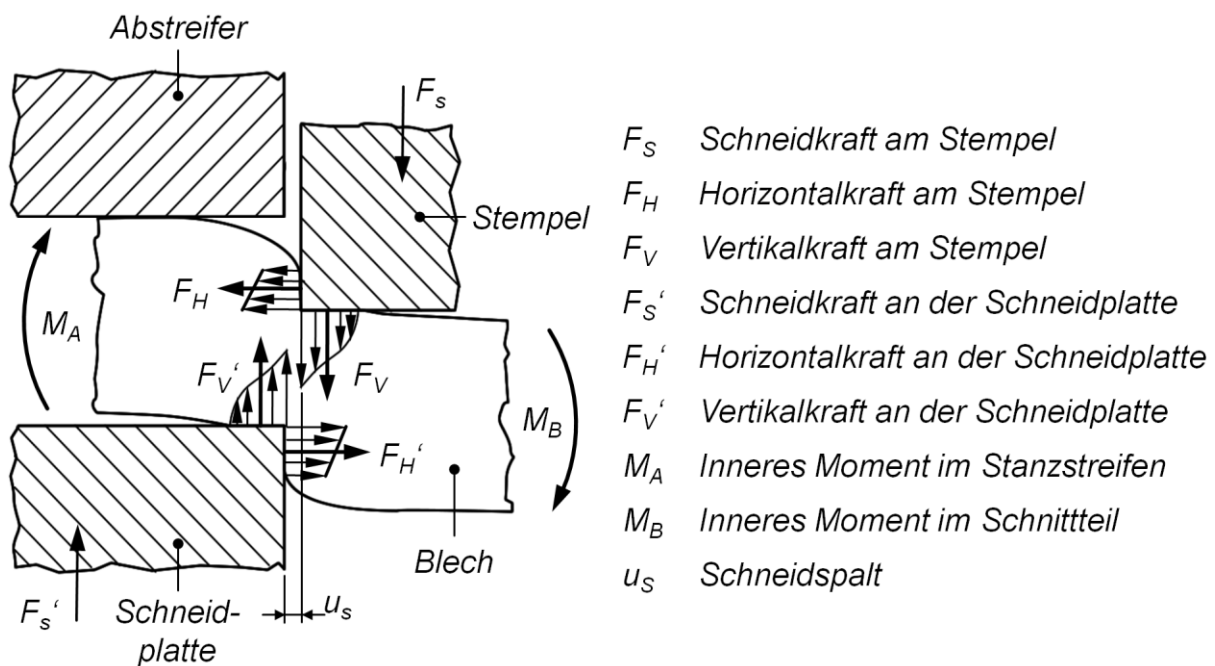


Abbildung 2.3: Schneidkraftkomponenten beim Scherschneiden nach [LANG90]

Anhand der Kurve des Schneidkraftverlaufes in Abbildung 2.4 während eines Pressenhubes einer Exzenterpresse kann ein (Aus-)Schneidvorgang in folgende 5 Phasen eingeteilt werden:

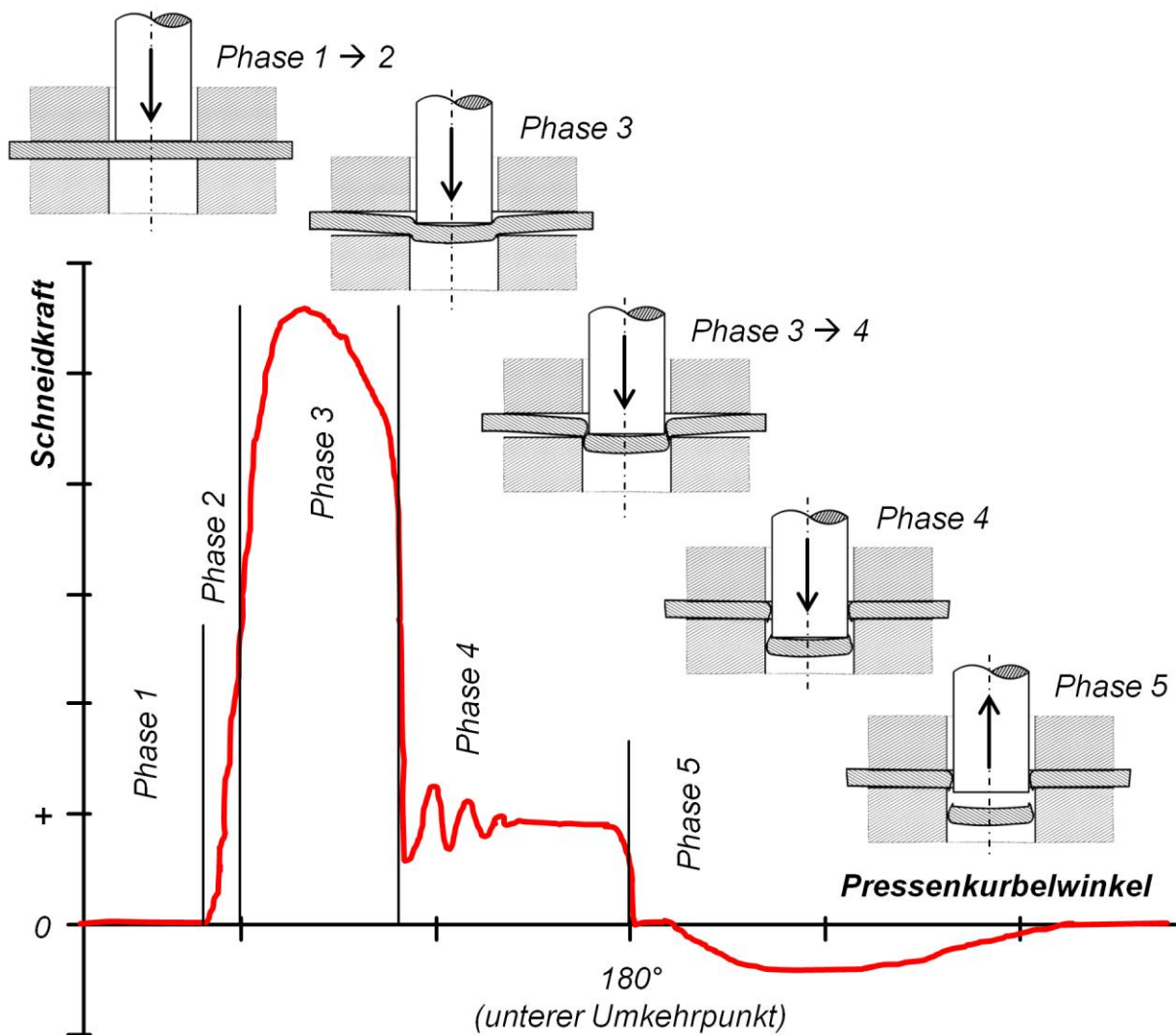


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Schneidkraftverlaufes beim Scherschneiden [CAMM86], [FUGG84], [HOFF73], [SCHU96b]

Phase 1:

In einem Kurbelwinkelbereich der Presse vor 180° trifft bei üblichen Schneidvorgängen der Niederhalter auf den Blechwerkstoff auf und klemmt diesen. Nach einer weiteren Stößelbewegung nach unten, während die Niederhalterfedern weiter vorgespannt werden, setzt auch der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff auf.

Phase 2:

Ab diesem Zeitpunkt wird das Schneidsystem aus Blechwerkstoff, Schneidwerkzeug und Presse elastisch vorgespannt, bis die Fließgrenze des Blechwerkstoffes

überschritten wird. In Abhängigkeit von der Blechdicke, von der Bauteilgeometrie und vom Schneidspalt führen die in Abbildung 2.3 bereits aufgeführten Biegemomente zu Durchbiegung von Schnittteil und Stanzstreifen. Bei ausreichender Niederhalterkraft wirkt diese den Biegemomenten im Blechstreifen entgegen, so dass die in Abbildung 2.4 übertrieben dargestellten Durchbiegungen lediglich im Schnittteil zu Verformungen führen.

Phase 3:

Während der plastischen Umformung des Blechwerkstoffes treten Effekte der Kaltverfestigung auf und die Schneidkraft steigt weiter an, bis sie bei F_{Smax} ihren Höchstwert erreicht. Aufgrund der zunehmenden Verringerung des verbleibenden Restquerschnittes sinkt ab diesem Zeitpunkt die Schneidkraftkurve wieder ab [ERDM04]. Nach Erreichen der Grenze des Umformvermögens setzt ausgehend von den Schneidkanten die Rissbildung ein, bis der Blechwerkstoff schlagartig durchbricht. Bei identischen Kantenradien an Stempel und Matrize beginnt der Anriss nach [TIMM56] auf der Matrizenseite vor dem Einreißen an der Stempelseite.

Phase 4:

Bei der Trennung des Schnittteils vom Stanzgitter wird die im System gespeicherte potentielle Energie schlagartig frei und das System kann zum Schwingen angeregt werden. In der schematischen Darstellung der Schneidkraft in Abbildung 2.4 ist diese Schwingung dargestellt. Aufgrund der elastischen Verformung des Bleches wirken Normalkräfte zwischen der Schnittfläche und den Mantelflächen von Stempel und Matrize. Die resultierenden Reibkräfte verhindern ein Absinken der Kraftkurve auf Null, solange sich der Stempel nach unten bewegt und das Schnittteil weiterschiebt.

Phase 5:

Beim Erreichen des unteren Umkehrpunktes liegt keine Kraft mehr am Stempel an bis der Rückhub erfolgt. Ab diesem Zeitpunkt treten nur noch Reibkräfte zwischen Stanzgitter und Stempelmantelfläche auf, die durch ein negatives Kraftsignal angezeigt werden. Der Betrag der Kraftamplitude im Rückhub ist aufgrund der wegfallenden Kraft zum Weiterschieben des Schnittteils in der Matrize kleiner als im Bereich vor dem unteren Umkehrpunkt. In der Literatur werden in Abhängigkeit des

Schneidsystems Werte für die Rückzugskräfte zwischen 1 und 40 % der maximalen Schneidkraft angegeben [KLOC06], [ROMA59], [SPUR85]. Wenn zur Vermeidung einer überbestimmten Stempelagerung eine schwimmende Stempelkopfbefestigung gewählt wird, ist im Schneidkraft-Kurbelwinkel-Diagramm direkt nach dem unteren Umkehrpunkt ein Kraftintervall mit Nullsignal vorzufinden.

2.3 Einflussgrößen auf den Scherschneidprozess

In Abbildung 2.5 sind Einflussgrößen auf den Scherschneidprozess zusammengefasst und in die Bereiche Werkzeugmaschine, Werkzeug, Blechwerkstoff und Schneidprozess gegliedert [HOOG99]. Obwohl schon vielfach experimentelle Untersuchungen mit dem vornehmlichen Ziel der Verschleißminimierung und der Ermittlung des Einflusses einzelner Parameter auf die Bauteilqualität durchgeführt wurden, besteht auf diesem Gebiet immer noch Forschungsbedarf.

<i>Einflussparameter beim Scherschneiden</i>			
<i>Werkzeugmaschine</i>	<i>Werkzeug</i>	<i>Blechwerkstoff</i>	<i>Schneidprozess</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Statisches Verhalten</i> ▪ <i>Dynamisches Verhalten</i> 	<p><u><i>Geometrie</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Schneidspalt</i> ▪ <i>Schnittlinie</i> ▪ <i>Schneidkanten-zustand</i> ▪ <i>Oberflächen-rauheit</i> <p><u><i>Werkstoff</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Verschleiß-festigkeit</i> ▪ <i>Bruchfestigkeit</i> 	<p><u><i>Geometrie</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Blechdicke</i> ▪ <i>Oberflächen-rauheit</i> <p><u><i>Werkstoff</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Gefügestruktur</i> ▪ <i>Legierungszu-sammensetzung</i> ▪ <i>Eigenspannungs-verhalten</i> ▪ <i>Mechanische Kennwerte</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Schmierstoff</i> ▪ <i>Schneidge-schwindigkeit</i> ▪ <i>Temperatur</i>

Abbildung 2.5: *Einflussparameter beim Scherschneiden nach [HOOG99]*

Aussagen über ideale Einstellungen können nach [SCHM88] immer nur für konkret untersuchte Versuchsbedingungen getroffen werden und nur bedingt auf andere

Systeme mit abweichenden Randbedingungen übertragen werden. Schneidparameter für ein Optimum zwischen konkurrierenden Zielen wie z. B. hohe Schnittflächenqualität bei geringem Werkzeugverschleiß lassen sich nicht allgemein vorhersagen.

2.4 Werkzeugverschleiß

In der inzwischen zurückgezogenen Norm DIN 50320 sowie dem darauf aufbauenden Arbeitsblatt 7 der Gesellschaft für Tribologie wird Verschleiß folgendermaßen definiert: *„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.“* [GFT7]

2.4.1 Verschleißmechanismen beim Scherschneiden

Verschleißrelevante Kontakte und Relativbewegungen treten beim Scherschneiden zwischen Schneidstempel und Blechwerkstoff sowie zwischen Matrize und Blechwerkstoff auf. Aufgrund innerer Reibvorgänge bei der elastischen und plastischen Deformation des Bleches ist auch eine Temperaturerhöhung in der Scherschneidzone beobachtbar [DEMM11]. Unter diesen Randbedingungen können die allgemeinen Hauptverschleißmechanismen auch auf den Scherschneidvorgang übertragen werden. Neben der reinen Form sind häufig Mischformen der nachfolgenden Mechanismen vorzufinden. [FLEI80], [GFT7], [LOIB03], [SOMM10]

Adhäsionsverschleiß

In einer ersten Stufe der Entstehung von Adhäsionsverschleiß bilden sich Haftverbindungen an den Oberflächen der Reibpartner aus (z. B. Kaltverschweißungen). Im weiteren Prozessverlauf werden die beiden Körper wieder voneinander separiert, wobei die Trennung auf der Seite des Werkstoffes mit geringerer Festigkeit in Bereichen abseits der ursprünglichen Grenzfläche geschieht. Beim Scherschneiden kann dieser Mechanismus zu einem Materialübertrag vom Blechwerkstoff auf die Werkzeugaktivelemente führen. Ablösungen von solchen Werkstoffpartikel im weiteren Prozessverlauf aufgrund der Reibbeanspruchung werden Flitter genannt [NÜRN10].

Abrasionsverschleiß

Abrasionsverschleiß beschreibt Materialabtrag, der durch furchende oder ritzende Beanspruchung die Oberfläche von Schneidstempel und –matrize verändert. Großen Einfluss auf diesen Verschleißmechanismus beim Scherschneiden haben die Werkstoffzusammensetzung und die Oberfläche des Bleches. So fördern Hartstoffe im Blechwerkstoff, wie auch ein hoher Siliziumgehalt in Elektroblechen oder Oxide auf der Oberfläche diese Verschleißform [FRAN90], [SCHN69].

Oberflächenzerrüttung

Eine oberflächennahe Festigkeitsabnahme und Rissbildung aufgrund von tribologischen Wechselbeanspruchungen der Reibpartner wird als Oberflächenzerrüttung bezeichnet. Als Folge sind Materialabtragungen z. B. in Form von Grübchenbildung feststellbar. [GFT7]

Tribochemische Reaktion

Beim Scherschneiden kann Verschleiß durch chemische Reaktionen zwischen den Reibpartnern Blechwerkstoff und Aktivelementen in Kombination mit Zwischenmedien wie Schmierstoff und dem Umgebungsmedium Luft auftreten. Vorherrschende erhöhte Temperaturen in der Kontaktzone erhöhen dabei die Reaktionsgeschwindigkeit des Prozesses. Die entstehenden Reaktionsschichten bzw. –partikel sind häufig spröde und können bei weiterer Relativbewegung leicht abgerieben werden. [SOMM10]

2.4.2 Verschleißkenngrößen

Entsprechend dem Ort der auftretenden Verschleißerscheinung werden bei Schneidaktivelementen im Allgemeinen drei Arten von Verschleiß unterschieden, die häufig auch in Kombination vorzufinden sind [LANG90]:

- Mantelflächenverschleiß
- Stirnflächenverschleiß
- Kolkverschleiß

In Abbildung 2.6 (a – c) sind am Beispiel von Rundstempeln die genannten Verschleißarten im Bereich um die Schneidkante exemplarisch dargestellt. Nach [LANG90] entstehen Stirn- und Kolkverschleiß insbesondere beim Schneiden von dünnen Blechen, bei denen hohe Flächenpressungen zwischen Stirnfläche und Blech auftreten. Kolkverschleiß entsteht nach [TOUS00] durch Temperaturspitzen, die zu örtlicher Aufschmelzung des Werkzeugwerkstoffes führen und aufgrund der Relativbewegung des Bleches Mikrozerspannungsvorgänge bewirken. Hartstoffpartikel in oder auf der Blechoberfläche verstärken dabei den Abrasionseffekt [SCHE80]. Während des Eintauchens und Rückziehens des Schneidstempels kommt es aufgrund der Normalspannungen zwischen den Mantelflächen der Werkzeugaktivelemente und dem Stanzgitter zu Mantelflächenverschleiß, der im Vergleich zu den anderen Verschleißarten insbesondere bei dickeren Blechen überwiegt.

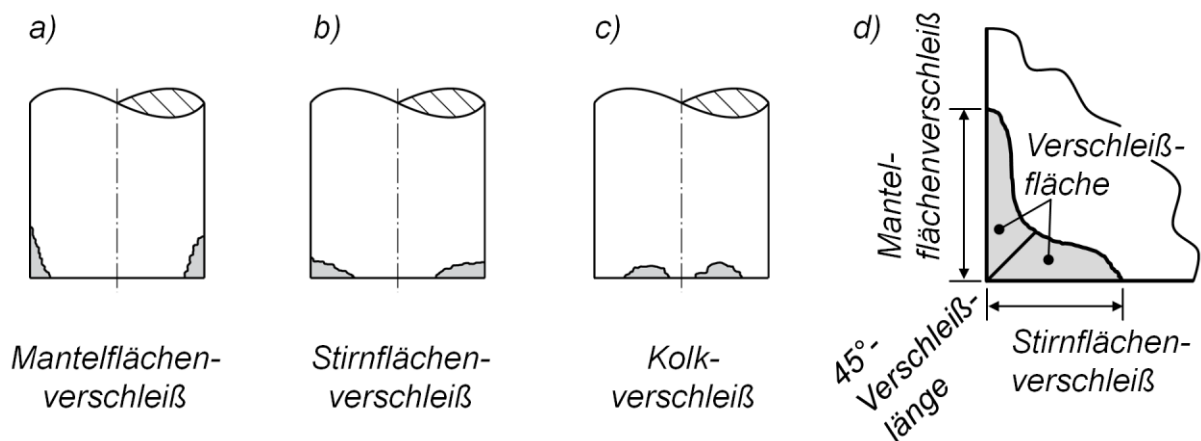


Abbildung 2.6: Formen des Verschleißes an runden Schneidstempeln (a – c)
Verschleißkenngrößen an einem Schneidstempel (d)

Sowohl die Verschleißuntersuchungen von [BORC76] als auch die industrielle Praxis zeigen, dass der Verschleiß am bewegten Aktivelement höher ist, als am feststehenden. In Abbildung 2.6 (d) sind schematisch vier Kenngrößen dargestellt, die den Verschleißzustand quantitativ bewertbar machen. Die Parameter Mantelflächen-, Stirnflächen- und 45°-Verschleißlänge stellen dabei eindimensionale Kenngrößen dar [DOEG10], [LANG90]. Der zweidimensionale Wert der Verschleißfläche, die durch die 45°-Verschleißlänge in zwei Anteile (Mantel- und Stirnfläche) unterteilt werden

kann, lässt sich mit einer Querschnittsfläche orthogonal zu einer Schneidkante bestimmen [TOUS00].

2.5 Schnittflächenausprägung

Mit zunehmendem Verschleiß an den Schneidkanten von Schneidstempel und Matrize verändert sich in der Regel auch die Schnittflächenqualität, insbesondere der Parameter Grathöhe. In Abbildung 2.7 sind neben der Grathöhe weitere Kenngrößen in Blechdickenrichtung zur Schnittflächencharakterisierung nach [VDI2906-2] aufgeführt. Das Verhältnis zwischen Glattschnitthöhe und Bruchflächenhöhe wird maßgeblich vom im Werkzeug eingestellten Schneidspalt u_s bestimmt [HÖRM09].

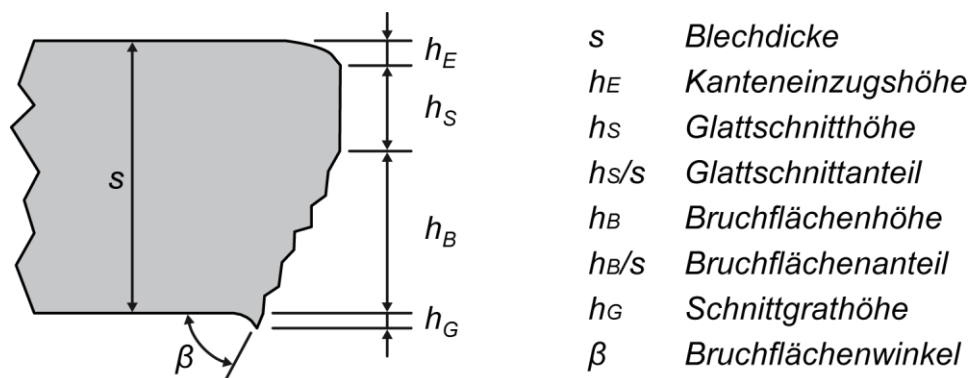


Abbildung 2.7: Ausgewählte Schnittflächenkenngrößen beim Scherschneiden [VDI2906-2]

2.6 Konstruktion und Auslegung von Schneidwerkzeugen

2.6.1 Werkzeuggestell

Bei der Konstruktion von Schneidwerkzeugen kann vielfach auf standardisierte Grundgestelle von Normalien-Anbietern zurückgegriffen werden. Als Plattenwerkstoffe werden von diesen in der Regel Gusseisen-, Stahl- und Aluminiumwerkstoffe angeboten. Während die Gussgestelle tendenziell für einfachere Werkzeuge eingesetzt werden, kann man bei den Werkstoffvarianten Aluminiumlegierung und Stahl zwischen unterschiedlichen Ausführungen bezüglich der Plattendicken wählen. Weiterhin kann die Anzahl der Führungssäulen (zwei oder vier Stück) sowie die Art der Führung (Gleit- oder Wälzführung) festgelegt werden. Abbildung 2.8 zeigt

schematisch ein standardmäßig angebotenes Grundgestell in einer Ausführung als 4-Säulengestell für Wälzführungen in massiver Bauart.

Während bei Gleitführungen ein minimaler Spalt zwischen Führungssäule und -buchse vorzufinden ist, sind Wälzführungen bauartbedingt spielfrei. Beim Einsatz von Kugeln als Wälzkörper können die höchsten Hubgeschwindigkeiten erreicht werden. Profilrollen zeichnen sich dagegen durch eine größere Kontaktfläche aus und können dadurch höhere Querkräfte aufnehmen. Als Nachteil gegenüber Kugelführungen kann neben den höheren Anschaffungskosten auch eine auf 40 m/min beschränkte Relativgeschwindigkeit aufgeführt werden [LIMB94].

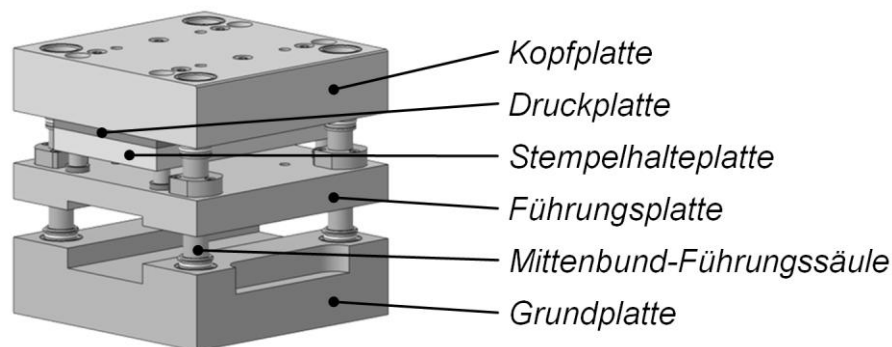


Abbildung 2.8: 4-Säulen-Werkzeuggestell in massiver Ausführung [STRA11]

2.6.2 Minimal realisierbarer Lochdurchmesser

Mit zunehmender Miniaturisierung von Bauteilen werden auch die Anforderungen an die produzierenden Werkzeuge höher. Beim Scherschneiden von kreisrunden Löchern stellt sich häufig die Frage, bis zu welchem minimalen Durchmesser d_{min} eine prozessstabile Bauteilfertigung realisierbar ist. Bereits von [HILB49] wurde versucht, diese Frage abhängig vom zu schneidenden Werkstoff mit einem minimalen Verhältnis zwischen Lochdurchmesser und Blechdicke (d_{min}/s) von 1 zu beantworten. In der [DIN24041] für Lochplatten werden minimale Durchmesser von 0,5 mm behandelt und für „gestanzte Löcher“ in Stahlblechen bis 500 N/mm² Zugfestigkeit eine maximale Blechdicke von 0,315 mm angegeben. Obwohl hierbei das Verhältnis d_{min}/s bei einem Wert von 1,59 liegt, werden in der Norm im Allgemeinen „schwierige Lochungen“ erst ab einem Verhältnis von unter eins

festgelegt. [MATU80] führt weitere Quellen mit unterschiedlichen Empfehlungen für den minimal realisierbaren Lochdurchmesser, auch unter Berücksichtigung der Stempelschaftbelastung, auf. Dass der minimale Lochdurchmesser d_{min} nicht kleiner als die zu schneidende Blechdicke ausgeführt werden soll, ist auch aus [OEHL93] zu entnehmen. Im Weiteren wird darin auch Formel 2.3 eingeführt, die neben der Blechdicke auch die Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes berücksichtigt [DFBO70], [OEHL93]. Für schnelllaufende Schneidwerkzeuge werden in der industriellen Praxis jedoch auch derzeit noch deutlich höhere Werte für den minimalen Stempeldurchmesser festgesetzt.

$$d_{min} = s \cdot \sqrt[3]{\frac{R_m}{343}} \quad (2.3)$$

s *Blechdicke [mm]*
 R_m *Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes [-]*
(Zahlenwert in [N/mm²] einheitenlos in Formeln einsetzen)

In der Normung sind sowohl für runde Schneidstempel mit durchgehendem Schaft [DIN9861-1] als auch für solche mit abgesetztem Schaft [DIN9861-2] minimale Werte von 0,5 mm in den Tabellen vorgegeben. In der Praxis können auch kleinere Durchmesser realisiert werden, weshalb sich auch in den Katalogen von Normalienanbietern minimale Durchmesser für Rundstempel mit abgesetztem Schaft von 0,1 mm finden [FIBR11]. Wissenschaftliche Untersuchungen von [JOO05] zeigten, dass bei dünnen Metallfolien beim Einsatz von Hartmetallstempeln mit dem Scherschneidverfahren auch minimale Durchmesser von 25 µm realisierbar sind.

2.7 Messtechnik in Schneid- und Umformwerkzeugen

Zur Überwachung der Bauteilproduktion werden in Stanzwerkzeugen häufig Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien eingesetzt. Da im Forschungsprojekt prozessspezifische Phänomene auch messtechnisch untersucht werden, soll in einem zum Verständnis notwendigen Maße auf die physikalischen Wirkprinzipien der eingesetzten Kraft-, Weg- und Beschleunigungssensoren eingegangen werden.

2.7.1 Dehnungsmessstreifen (DMS) in Kraftsensoren

Dehnungsmessstreifen (abgekürzt DMS) werden üblicherweise zur Erfassung von Dehnungen in Werkstoffen eingesetzt. Sie bestehen aus einem mäanderförmigen Messgitter und einer Trägerfolie, die die Verbindung zum Messobjekt darstellt. Bei Längung oder Stauchung des Objekts wird auch das Messgitter verformt, was sich auf Länge und Querschnitt des Drahtes auswirkt. Diese Geometrieänderungen führen zu einem veränderten elektrischen Widerstand, was mit hoher Präzision messtechnisch erfasst werden kann. In Abbildung 2.9 sind neben einem DMS im Ausgangszustand auch ein gedehnter Messstreifen mit erhöhtem und ein gestauchter Messstreifen mit reduziertem Widerstand dargestellt. [HOFF87]

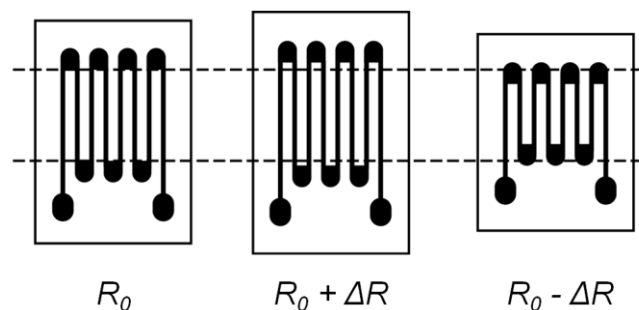


Abbildung 2.9: Dehnungsmessstreifen im Ausgangszustand (R_0), im gedehnten ($R_0 + \Delta R$) und gestauchten ($R_0 - \Delta R$) Zustand

Bringt man solche Dehnungsmessstreifen auf einen Grundkörper mit linearem Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf, kann bei Belastung des Körpers im elastischen Werkstoffbereich über die Längenänderung auf die wirkende Kraft geschlossen werden. Üblicherweise werden in Kraftsensoren auf DMS-Basis mehrere Messstreifen eingebracht und damit eine Wheatstonesche Brückenschaltung aufgebaut. Das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung kann ausgelesen und so die Belastung des Grundkörpers ermittelt werden.

2.7.2 Piezoelektrische Kraft- und Beschleunigungsmessung

Wirkt eine Kraft auf einen Piezo-Kristall wird das Kristallgitter verzerrt und es werden negativ geladene gegen positiv geladene Gitterpunkte verschoben. Durch gezielte

Kontaktierung können an den Kristalloberflächen die entstehenden Ladungsunterschiede abgegriffen und in ein stabiles elektrisches Signal übergeführt werden. Je nach Anordnung, Belastung und Kontaktierung der Kristalle unterscheidet man zwischen Longitudinal-, Transversal- und Schub- bzw. Schereffekt. In Kraft-, Drehmoment- und Beschleunigungssensoren wird häufig der Schub- bzw. Schereffekt ausgenutzt, um die mechanische Größe in ein elektrisches Signal überzuführen. In Abbildung 2.10 wird ein unbelasteter und schubbelasteter Kristall schematisch dargestellt und damit die Ladungsverschiebung aufgezeigt. Eine Scherbeanspruchung des Kristalls führt zu einer Verzerrung des Kristallgitters und somit zu einer Ladungsverschiebung hin zu den Ebenen der Krafteinleitung. Mittels eines Ladungsverstärkers und einer Auswerteelektronik wird die entstehende Ladungsverschiebung in ein messtechnisch stabiles Spannungssignal übergeführt, welches dann von üblichen Messkarten erfasst werden kann. [BILL02], [KURA99]

Während mit diesem Messprinzip Kräfte oder Momente direkt erfassbar sind, werden Beschleunigungen über auftretende Kräfte bei Beschleunigung eines Massenkörpers im Sensor messbar gemacht.

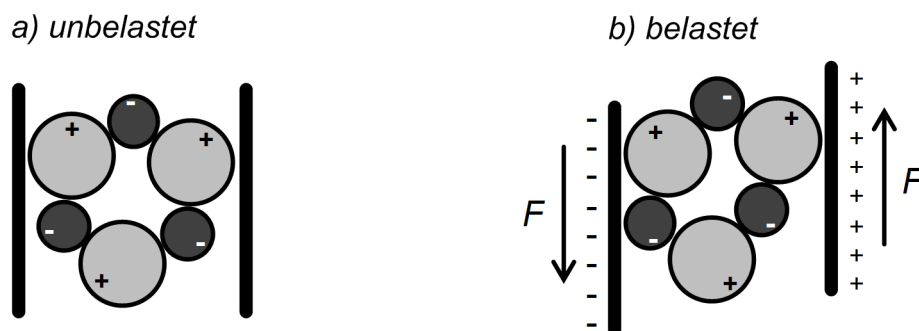


Abbildung 2.10: Piezoelektrischer Effekt im Quarz bei Schubbelastung [KIST11]

2.7.3 Wegmessung mittels Wirbelströmen

Abstandsänderungen können unter anderem mit Hilfe von Wirbelstromsensoren berührungslos und damit verschleißfrei erfasst werden. Über eine Spule im Sensorgehäuse wird bei diesen Sensoren ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld erzeugt. Die auftretenden magnetischen Feldlinien verlaufen über das

Sensorgehäuse, durch das umgebende Medium und das elektrisch leitende Messobjekt. In diesem Objekt entsteht nach der Lenz'schen Regel ein Magnetfeld, das dem erregenden Feld entgegenwirkt, so dass Wirbelstromverluste in der Erregerspule entstehen. Der Effekt nimmt mit größer werdendem Abstand zwischen Sensor und Messobjekt ab. Eine Auswerteelektronik, die entweder direkt am Sensorkopf oder extern in der Zuleitung positioniert sein kann, erfasst die auftretende Abstandsveränderung. Da die Feldlinien von nichtmetallischen Medien nicht beeinflusst werden, führt dies zu einer hohen Toleranz gegenüber Feuchtigkeit, Ölen und sonstigen Verschmutzungen. [HOEN11], [WITT11]

2.8 Schwingungen

2.8.1 Schwingungssysteme mit einem Freiheitsgrad

Schwingungsfähige Systeme, bei denen „Energie zwischen Energiereservoirs periodisch hin- und her bewegt“ werden kann, werden auch Oszillatoren genannt [HERI04]. Ein einfaches Beispiel für einen mechanischen Oszillator stellt das Federpendel dar, bei dem durch Auslenkung aus der Gleichgewichtslage potentielle Energie in das Schwingungssystem eingebracht werden kann. Durch die Feder wird die Masse zur Gleichgewichtslage hin beschleunigt und dabei die potentielle Energie in kinetische Energie und im Weiteren wieder in potentielle Federenergie übergeführt. Die Anzahl an periodischen Vorgängen je Zeiteinheit wird Frequenz f genannt, während die zeitliche Ausbreitung einer Schwingungsperiode üblicherweise mit dem Formelzeichen T für die Periodendauer abgekürzt wird. Zwischen den beiden Parametern besteht der Zusammenhang $T = f^{-1}$. Handelt es sich um eine freie, ungedämpfte Schwingung, oszilliert das System mit der Eigenfrequenz f_0 . Im Gegensatz zu periodisch angeregten Schwingungssystemen oszillieren freie Schwingungen aufgrund von einmaligen Anregungen.

Wirken äußere oder innere Kräfte der Schwingung entgegen, wird dabei dem System Energie entzogen, und die Amplituden A nehmen ab. Am Beispiel des einmal angeregten eindimensionalen Feder-Masse-Systems spricht man von einer gedämpften, freien Schwingung. Aufgrund des Energieverlustes im System ist die

Frequenz f_d der gedämpften Schwingung kleiner als die Eigenfrequenz f_0 des ungedämpften Systems. Beispiele für den Amplitudenverlauf harmonischer Schwingungen in einer freien ungedämpften und freien gedämpften Form sind in Abbildung 2.11 grafisch dargestellt. [DIN1311-1], [HERI04]

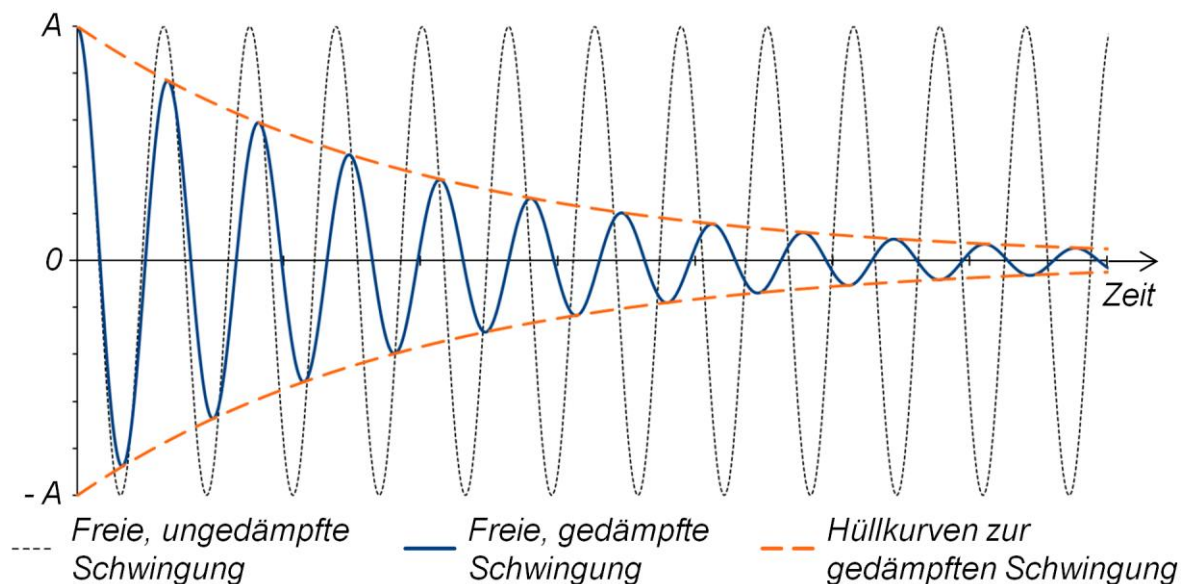


Abbildung 2.11: Beispiele für freie, gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen

Die Ermittlung von Gleichungen, die den zeitlichen Bewegungsverlauf von Schwingungen beschreiben, soll exemplarisch für einen ungedämpften und einen gedämpften Feder-Masse-Schwinger aufgezeigt werden. Als Dämpfungsmechanismus können unterschiedliche Fälle betrachtet werden. Die Coulombsche Dämpfung tritt als konstante Kraft entgegen der Bewegungsrichtung, z. B. bei Reibvorgängen in Erscheinung. Geschwindigkeitsproportionale Dämpfung tritt bei Kolben in Zylindern auf, wenn beim Fluidaustausch zwischen den Kammern laminare Strömungen vorherrschen. Aus diesem Grund wird diese Dämpfungsart auch viskos genannt. Dieser am häufigsten betrachtete Fall soll auch in diesem Kapitel als Berechnungsbeispiel dienen. Wird ein schwingendes System durch Luftwiderstand gedämpft, muss eine zum Quadrat der Geschwindigkeit proportionale Gegenkraft berücksichtigt werden. [WITT11]

Mit Hilfe von Abbildung 2.12 lassen sich über das Kräftegleichgewicht am Massenkörper die Differentialgleichungen 2.4 für den ungedämpften und 2.5 für den geschwindigkeitsproportional gedämpften Fall aufstellen.

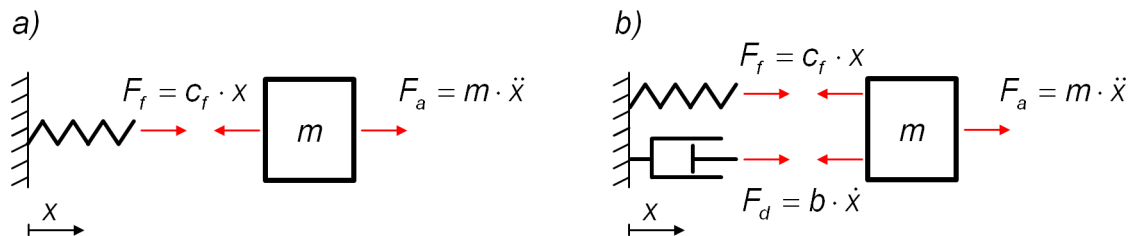


Abbildung 2.12: Kräftegleichgewicht am ungedämpften (a) und gedämpften (b) Feder-Masse-System

$$m \cdot \ddot{x} + c_f \cdot x = 0 \quad \text{für Fall (a)} \quad (2.4)$$

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c_f \cdot x = 0 \quad \text{für Fall (b)} \quad (2.5)$$

m	Masse des schwingenden Körpers [kg]
b	Dämpfungskoeffizient [Ns/m]
c_f	Federkonstante [N/m]
x, \dot{x} und \ddot{x}	Auslenkung x [m], Geschwindigkeit \dot{x} [m/s] und Beschleunigung \ddot{x} [m/s ²]

Eine Lösung der Differentialgleichung der ungedämpften Schwingung (Fall (a) bzw. Formel 2.4), wird in Formel 2.6 dargestellt. Mit einer maximalen Schwingungsamplitude A und einer Phasenverschiebung φ_0 lässt sich die Auslenkung des Systems zu jedem Zeitpunkt beschreiben. Zur vereinfachten Darstellung der Lösung wird üblicherweise die Eigenkreisfrequenz ω_0 als Parameter eingesetzt.

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \quad (2.6)$$

$$\text{mit } \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (2.7)$$

$$\text{und } \omega_0 = \sqrt{\frac{c_f}{m}} \quad (2.8)$$

$x(t)$	Auslenkung zum Zeitpunkt t [mm]
A	Schwingungsamplitude [mm]
ω_0	Eigenkreisfrequenz [s^{-1}]
φ_0	Phasenverschiebung [-]
f_0	Eigenfrequenz [Hz]

Bei der gedämpften Schwingung nach Fall (b) in Abbildung 2.12 sind in Abhängigkeit von der Dämpfungsintensität drei Lösungen für den Schwing-, Kriech- und aperiodischen Grenzfall bekannt. Formel 2.9 beschreibt die Lösung für den in vorliegender Arbeit relevanten Schwingfall. In die Berechnung gehen die Phasenverschiebung φ_0 und die Kreisfrequenz ω_d des gedämpften Systems als Parameter innerhalb der Kosinusfunktion ein, sowie die Anfangsamplitude A mit einem exponentiell abfallenden Faktor, der wiederum vom Abklingkoeffizienten δ beeinflusst wird. Mit Hilfe des Faktors A und der Exponentialfunktion mit Exponenten $-\delta$ lassen sich auch die Hüllkurven zur freien, gedämpften Schwingung (Abbildung 2.11) im positiven und negativen Amplitudenbereich mathematisch darstellen.

$$x(t) = A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cos(\omega_d \cdot t + \varphi_0) \quad (2.9)$$

$$\text{mit } \delta = \frac{b}{2 \cdot m} \quad (2.10)$$

$$\text{und } \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (2.11)$$

$$\text{bzw. } \omega_d = \sqrt{\frac{c_f}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad (2.12)$$

δ	Abklingkoeffizient [s^{-1}]
ω_d	Kreisfrequenz des gedämpften Schwingers [s^{-1}]

In Abhängigkeit der Anwendungsumgebung haben sich unterschiedliche Begrifflichkeiten und Kurzzeichen zur Beschreibung der viskosen Dämpfung etabliert. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird in Tabelle 2.1 eine Auswahl solcher Parameter gegenübergestellt. [DIN1311-1], [DRES06], [HERI04], [LEHR30]

Kurzzeichen	Kennwert	Formel	Einheit
b	Dämpfungskoeffizient bzw. -konstante	-	[Ns/m]
δ	Abklingkoeffizient bzw. -konstante	$\delta = b / 2 m$	[s ⁻¹]
D	Dämpfungsgrad bzw. Lehr'sches Dämpfungsmaß	$D = \delta / \omega_0$	[-]
d	Verlustfaktor bzw. Verlustwinkel	$d = 2 D$	[-]
Q	Güte	$Q = d^{-1}$	[-]
k	Amplitudenverhältnis	$k = A_i / A_{i+1}$	[-]
Λ	Logarithmisches Dekrement	$\Lambda = \ln(k)$	[-]

Tabelle 2.1: Kenngrößen zur Beschreibung von Dämpfungseffekten

2.8.2 Schwingungssysteme mit unendlich vielen Freiheitsgraden

Während in Kapitel 2.8.1 am Beispiel des Feder-Masse-Systems die Masse als Starrkörper angesehen wird, weisen reale Bauteile eine Elastizität auf. Elastische Körper können als Kontinuum betrachtet werden oder zur Modellbildung in unendlich viele diskrete Elemente mit den jeweiligen Freiheitsgraden zerlegt werden. Schwingungssysteme mit unendlich vielen Freiheitsgraden werden daher auch kontinuierliche Schwinger genannt. Analog zum Feder-Masse-System ist das Schwingungsverhalten realer Körper von deren Massenverteilung sowie den lokalen Steifigkeiten geprägt. Durch die Eigenformen und die dazugehörigen Frequenzen lassen sich schwingende elastische Systeme beschreiben. [GROS11], [PFEI92]

Während bei einfachen Strukturen noch analytische Methoden zielführend sind, lassen sich die Lösungen vieler realer Schwingungssysteme nur durch Näherungsverfahren ermitteln. Komplexe Systeme werden üblicherweise mit Finite Elemente

Methoden (FEM) untersucht, um mögliche kritische Eigenfrequenzen und Eigenformen zu ermitteln.

Als Beispiel für einen einfach zu beschreibenden kontinuierlichen Schwinger kann ein einseitig eingespannter Balken, wie er in Abbildung 2.13 dargestellt ist, dienen. Neben den ersten drei Eigenfrequenzen für Schwingungen in z-Richtung sind auch die Verhältnisse der Eigenfrequenzen zwischen den Eigenformen aufgetragen [GROS11].

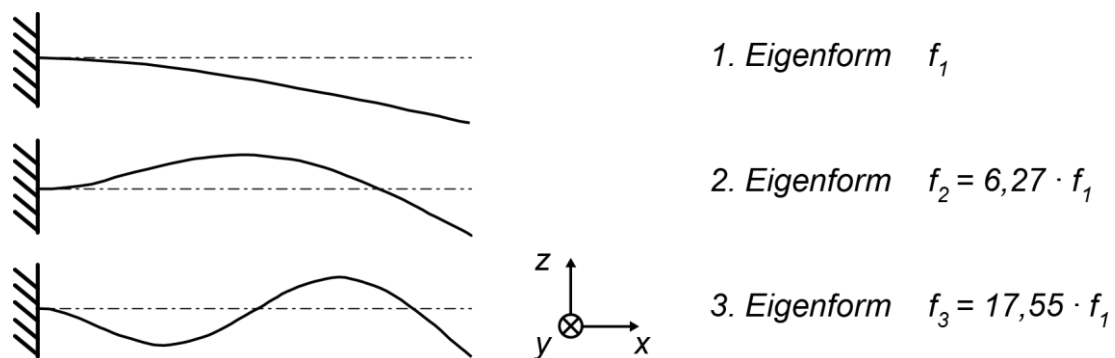


Abbildung 2.13: Eigenformen eines einseitig eingespannten Biegebalkens

2.8.3 Schwingungsanregung

Schwingungsfähigen Systemen kann durch einmalige Auslenkungen oder durch Stoßvorgänge Energie zugeführt werden, so dass Schwingungen angeregt werden. Geschieht die Schwingungsanregung einmalig und wird das System bis zum Abklingen der Schwingung sich selbst überlassen, werden die entstehenden Schwingungen frei genannt. Im Falle der periodischen Anregung werden sie als erzwungene Schwingung beschrieben. [HERI04]

[HOLL07] unterscheidet bei der harmonischen Anregung von erzwungenen Schwingungen an Strukturen zwischen Kraftanregung der Masse, Fußpunktanregung über Federn und Dämpfer, Fliehkraftanregung sowie der Anregung durch

Beschleunigungskräfte. In diesen Fällen werden die anregenden Kräfte in der Bewegungsdifferentialgleichung des Systems berücksichtigt und im Anschluss daran eine Lösung ermittelt. Bei transienten¹ Anregungen handelt es sich im Gegensatz zu harmonischen Vorgängen um während eines kleinen Zeitbereiches im System herbeigeführte Zustandsänderungen. Häufig handelt es sich dabei um stoßartige Belastungen, die auf das Schwingungssystem einwirken. Eine solche Stoßbelastung liegt bei kleiner Wirkungsdauer $t_{\text{Stoß}}$ des Kraftverlaufes im Vergleich zur Periodendauer T der angeregten Schwingung vor ($t_{\text{Stoß}} \ll T$). Die Charakteristik des anregenden Kraftverlaufes kann dabei z. B. halbsinusförmig, exponentiell oder auch oszillatorisch sein. Einen Grenzfall stellt der in Formel 2.13 beschriebene Dirac-Impuls I_D dar, bei dem die Einwirkungsdauer gegen Null geht. [BROC70], [DRES06], [HOLL07]

$$I_D = \lim_{t_{\text{Stoß}} \rightarrow 0} \int_{-t_{\text{Stoß}}/2}^{+t_{\text{Stoß}}/2} F(t) dt \quad (2.13)$$

Solche Stoßvorgänge können durch das System selbst in Form von Eigenanregung, wie z. B. den Schneidvorgängen in Stanzwerkzeugen oder durch Fremdanregung mittels Vibratoren oder Hämmern erfolgen. Die Form des Kraftverlaufes von Impulshämmern, wie sie zur gezielten Schwingungsanregung von Systemen zur Modalanalyse eingesetzt werden, wird unter anderem durch die Materialkombination, die Steifigkeit, die Schlaggeschwindigkeit, die Masse, die Prozessoberfläche, sowie den Aufschlagwinkel und die Geschwindigkeit beeinflusst [RUHM10]. Der zeitliche Verlauf der einwirkenden Kraft hat wiederum Einfluss auf die anregbaren maximalen Eigenfrequenzen des Systems. Abbildung 2.14 zeigt ein Beispiel für Kraftverläufe bei Hammeranregung mit Stahl-, Kunststoff- und Gummischlagspitze sowie die damit anregbaren Frequenzbereiche.

¹ lat. transire: vorübergehen

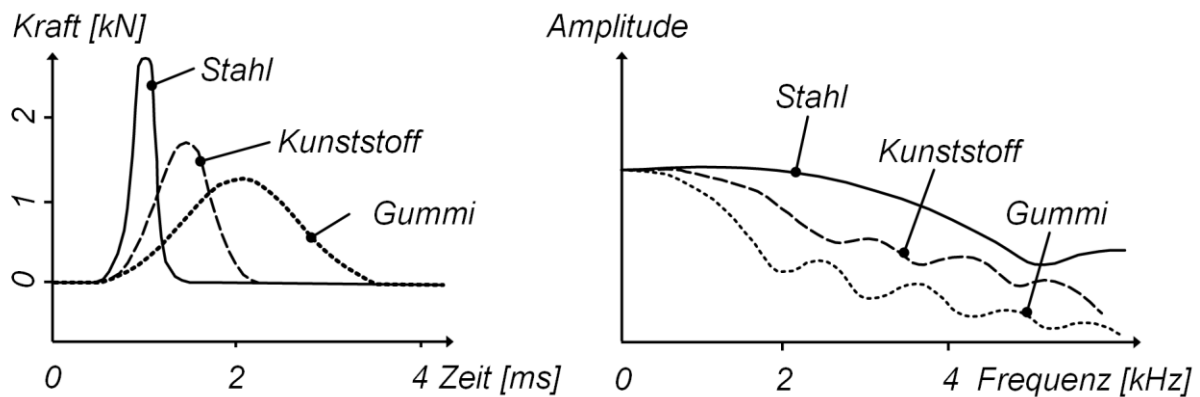


Abbildung 2.14: Exemplarische Kraftverläufe und angeregte Frequenzen bei verschiedenen Stoßpartnern [RUHM10]

2.8.4 Dämpfung

Obwohl Schwingungen zum Teil für die Funktion von Geräten notwendig sind, wie z. B. in Uhren oder bei Musikinstrumenten, sind sie vielfach auch unerwünscht, wenn sie sich negativ auf die Funktion oder die Haltbarkeit von Systemen auswirken. Bereits bei der Produktgestaltung sollte daher darauf geachtet werden, dass die Entstehung von Schwingungen vermieden wird, dass entstandene Schwingungen sich nicht auf andere Bauteilbereiche ausbreiten können, oder dass deren Amplituden durch Dämpfung begrenzt werden.

In [VDI3830-1] wird Dämpfung in mechanischen Systemen als „irreversible Umwandlung mechanischer Energie in andere Energieformen“ bei „zeitabhängigen Vorgängen“ definiert. In einem Großteil der Fälle wird dabei mechanische in thermische Energie umgewandelt. Ob dabei von innerer oder äußerer Dämpfung zu sprechen ist, ist abhängig von der Lage der Dämpfungskräfte in Relation zur gezogenen Systemgrenze. Beispiele für Dämpfungseffekte können folgender Aufzählung entnommen werden [VDI3830-1]:

- Reibung zwischen bewegten Bauteilen
- Reibung in Fügestellen
- Reibung mit dem Umgebungsmedium
- (Körper-)Schallabstrahlung
- Umwandlung mechanischer in elektrische Energie (z. B. Piezoelektrischer Effekt) ohne Rückführung
- Werkstoffdämpfung aufgrund von innerer Reibung

Aufgrund des Bezugs zur vorliegenden Arbeit soll an dieser Stelle nur auf die Werkstoffdämpfung näher eingegangen werden. Sie wird im Allgemeinen auch mit innerer Reibung, unvollkommener Elastizität oder mechanischer Hysterese bezeichnet [PIER10]. Obwohl für viele Anwendungen feste Körper mit elastischen Materialgesetzen modelliert werden, ist dies „*in der Natur streng bei keinem Stoff erfüllt*“ [BECK63], und so zeigen auch Experimente vielfach Abweichungen. Erkennbar sind solche Vorgänge bei statischen Belastungen von Körpern am Kriechen bzw. am Abfall der Spannung nach einem Dehnungssprung. Bei zyklischer Belastung ist inelastisches Bauteilverhalten durch den Energieverlust im System oder anhand der Form der Hysteresekurve ermittelbar. Bei statischer Hysterese ist nach [OTT81] die Höhe der Dämpfung kaum von der Frequenz beeinflusst. Ein Großteil des Energieverlustes in homogenen Werkstoffen ist dabei nach [LAZA68] auf plastische Deformationen zurückzuführen. Die plastischen Vorgänge beziehen sich dabei auf atomare, molekulare, kristalline und interkristalline Umordnungen im Werkstoff und werden zusammenfassend als Erholungs- und Relaxationsvorgänge beschrieben. Im metallischen Werkstoffgefüge wirkt sich dies unter anderem durch plastisches Gleiten, lokale plastische Verformung, Kristallplastizität oder Versetzungsbewegung aus. [LAZA68], [PIER10], [VDI3830-2]

Besonders hohe Dämpfungseffekte können im Allgemeinen mit polymeren oder geschichteten Werkstoffen erreicht werden. Aber auch in metallischen Werkstoffen

ist Dissipation², der Entzug von Energie aus dem mechanischen System infolge von Reibung nachweisbar, wenngleich hier die Verlustfaktoren tausendfach geringer sein können [MÖSE10].

2.8.5 Schnittschlag und Schnittschlagdämpfung

In Kapitel 2.2 wurden mit Hilfe von Abbildung 2.4 die Phasen des Schneidvorganges dargestellt. In Phase 3 wirkt die zum Trennen des Blechwerkstoffes notwendige maximale Kraft, die sich von der Blechebene nach unten über die Schneidmatrize und die Werkzeuggrundplatte in den Pressentisch überträgt. Nach oben hin befinden sich die Elemente Schneidstempel, Werkzeugoberteil, Pressenstößel sowie der komplette Stößelantrieb im Kraftfluss. Über den Pressenrahmen wird dann der Kraftverlauf zum Pressentisch hin geschlossen. In Abhängigkeit der elastischen Kennwerte der Bauteile im Kraftfluss wird das System dabei elastisch vorgespannt und potentielle Energie gespeichert, die dann beim Durchbrechen des Blechwerkstoffes im Übergang von Phase 3 auf Phase 4 schlagartig frei wird. Durch die schlagartige Belastung wird die Maschine in einem breiten Frequenzband angeregt [WIEM04]. Wie es die Kraftverlaufskurve in Abbildung 2.4 schematisch andeutet, treten in dieser Phase Vertikalschwingungen auf, die sich mit der regulären Stößelbewegung überlagern. Ein Nachweis der auftretenden Stößelbewegungen mit optischen Messmethoden erfolgte z. B. im Forschungsprojekt von [BEHR11]. Das Phänomen ist allgemein als Schnittschlag bekannt und es wird versucht, die negativen Auswirkungen auf den Schneidprozess durch verschiedene Ansätze der Schnittschlagdämpfung zu minimieren [DOEG10], [KÜHL03], [MÜLL10], [SCHU96b], [SPUR85].

[HILD70] versucht in Untersuchungen durch pressenseitige Veränderungen die Schallemission aufgrund des Schnittschlages zu minimieren. Eine Massenerhöhung der „Pressenbodenplatte“ sowie der Einbau „elastischer Zwischenlagen“ führen aber

² lat. dispergere: zerstreuen

zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Um die plötzliche Entlastung der Presse zu verhindern, werden stattdessen Reibelemente sowie das Aufbringen von Gegenkräften zwischen Pressentisch und –stößel während des Durchbruchs des Blechwerkstoffes vorgeschlagen. Die Möglichkeiten durch Veränderung der Presseneigenschaften den Eintauchvorgang der Schneidstempel in das Stanzgitter im Sinne des Werkzeugverschleißes positiv zu beeinflussen wurden auch von [HOFF73] untersucht. Ein wesentliches Ergebnis ist der Vorschlag, die Steifigkeit der Presse sowohl bei Druck-, als auch bei Zugbelastung am Pressenstößel zu erhöhen. Auch die Minimierung von Spielen zwischen den im Kraftfluss befindlichen Bauteilen sollte angestrebt werden, um den Reibweg der Schneidstempel im Stanzgitter während der Schnittschlagphase zu verringern. Zur Vermeidung von schädlichen Schwingungseinflüssen aus einer Presse wurde daher bei wissenschaftlichen Untersuchungen von [DOEG80] anstatt einer mechanischen Presse eine hydraulische Schnellhubeinheit entwickelt und eingesetzt. Durch zwischenzeitliche Fortschritte in der Werkstoff- und Fertigungstechnik, sowie bei der Auslegungsberechnung konnten die pressenseitigen Schwachstellen aber deutlich verringert werden.

Neben den von [HILD70] erwähnten festen Reibkörpern, die eine Stößeloszillation verhindern sollen, werden von [MATI80] auch Systeme vorgestellt, die auf Basis des hydraulischen Wirkprinzips dem Schneidprozess eine Kraft entgegensetzen und so eine schlagartige Pressenentlastung verhindern. Des Weiteren werden mechanische Anschläge erwähnt, die die schädlichen Auswirkungen der Stößelschwingungen von den Schneidaktivelementen fernhalten. Intensive Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der passiven und aktiven Schnittschlagdämpfung sind in [DOEG01] und [BEHR05] dokumentiert. In [DOEG01] konnte das Prinzip des Reibungsdämpfers erfolgreich für ein Schneidsystem umgesetzt werden. Ein Praxiseinsatz in anderen Pressen sowie mit anderen Schneidwerkzeugen ist damit aber nicht möglich, da bei Veränderungen am dynamischen System aufwändige Abstimmarbeiten am Dämpfer notwendig wären. Im Forschungsvorhaben von [BEHR05] wurde ein aktives Schnittschlagdämpfungssystem entwickelt, mit welchem über einen hydraulisch gesteuerten Aktuator die Schwingungen minimiert werden können. In Praxisversuchen konnte auch ein positiver Effekt auf den Schneidstempelverschleiß nachgewie-

sen werden. Auch von [HOFE07] wird ein hydraulisches System zur aktiven Schnittschlagdämpfung eines Pressenherstellers vorgestellt. Aktuelle Patentschriften mit Lösungsvorschlägen zur Schnittschlagminimierung belegen, dass die Problematik noch nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte [MART10], [MÜLL10].

Bei den in der Literatur erwähnten Dämpfungssystemen sind allerdings die erfolgreichen Einsätze nur bis zu Pressenhubfrequenzen von 200 Hüben pro Minute belegt, so dass weitere Anstrengungen im schnelllaufenden Bereich notwendig erscheinen. Auch die Verwendung von Servotechnologie als Pressenantrieb lässt auf eine Abmilderung der Schnittschlagproblematik hoffen, da die sprunghafte Kraftveränderung beim Durchbrechen des Blechwerkstoffes erkannt und über den Antrieb direkt gegengesteuert werden kann. Sowohl in [GRUN10] als auch [SIEM10] werden solche Verbesserungen für Servo-Spindelpressen nachgewiesen. Aber auch bei servobetriebenen Kurbelpressen kann durch Gegensteuerung der Schnittschlag gemildert werden [BRP08]. Die maximalen Hubfrequenzen der servobetriebenen Pressen liegen aber wie die der aktiven und passiven Dämpfungssysteme noch deutlich unter denen von mechanischen Schnellläuferpressen.

Werkzeugseitig werden in der Literatur hauptsächlich schneidkraftreduzierende Maßnahmen zur Minimierung der potentiellen Federenergie vorgeschlagen. [LANG90] führt hierzu den zeitlich verschobenen Eingriff der Schneidkanten bei Werkzeugen mit mehreren Schneidstempeln oder den Anschliff der Schneidaktiv-elemente auf, was nach [DIN8588] zu einem kreuzend, ziehenden Schnitt führt. In [HIRS09] wird aufgrund der Schnittschlagproblematik eine Werkzeugbauart mit möglichst geringer Schneidstempellänge empfohlen. Da die Schneidstempel im Vergleich zu den im Kraftfluss befindlichen Werkzeug- und Pressenkomponenten häufig den geringsten Querschnitt aufweisen, kann der gestauchte Weg bei Schneidkraftbelastung mit kurzen Stempeln klein gehalten werden.

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Nachfrage nach filigranen Stanzteilen liegt im Bereich von vielen Milliarden Stück pro Jahr und zeigt einen kontinuierlichen Anstieg. Dies liegt vor allem an der Miniaturisierung von Baugruppen sowie an weiter steigendem Bedarf an elektronischen Bauteilen wie Stecker, Kontaktstifte und Grundträger für Halbleiter. Um die Anforderungen höchste Bauteilqualität bei gleichzeitig kostengünstiger Fertigung erfüllen zu können, müssen die bestehenden Prozesse ständig optimiert werden und Ideen für neuartige Fertigungs- und Werkzeugkonzepte in die Betrachtungen einbezogen werden.

Ein Ansatz zur Verschleißreduzierung an den Werkzeugen und zur Erhöhung der Bauteilqualität liegt in der Minimierung von auftretenden Schwingungen während des Herstellungsprozesses. Sowohl bei Umform- als auch bei Schneidoperationen bewirken horizontale Schwingungen einen Lageversatz zwischen Ober- und Unterwerkzeug, so dass die Geometrie der produzierten Bauteile negativ beeinflusst werden kann. Vertikalschwingungen zwischen den Aktivelementen im Werkzeug führen bei Eingriff in den Blechwerkstoff zu einer Verlängerung der Reibwege und somit zu erhöhtem Werkzeugverschleiß. Mit steigender Hubfrequenz der Pressen steigen die Bewegungsgeschwindigkeit in den Werkzeugen und die übertragene Energie bei den auftretenden Stoßbelastungen an.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Amplituden der durch die Stoßbelastungen hervorgerufenen Schwingungen in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen zu minimieren. Dazu werden die dynamischen Eigenschaften der Werkzeuge durch den Einsatz alternativer Plattenwerkstoffe verändert und die Auswirkung auf den Werkzeugverschleiß untersucht, um Empfehlungen für schwingungsarme Werkzeuge ableiten zu können.

Zur Erreichung des Ziels ist die Konstruktion eines schnelllaufenden Versuchswerkzeuges sowie die Auswahl und Integration geeigneter Messtechnik notwendig. Damit sollen die Veränderungen im Prozess ermittelt und die Ergebnisse mit Hilfe von Verschleißmessungen nach Dauerhubversuchen verifiziert werden.

4 Versuchs- und Messeinrichtungen

4.1 Schnellläuferpresse

Die Schneidversuche zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Werkzeugplattenwerkstoffe auf das Schwingungsverhalten von schnelllaufenden Stanzwerkzeugen wurden auf einer einfach wirkenden mechanischen Hochleistungspressen vom Typ BSTA 25BL, Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz, durchgeführt. Der Stößel wird bei dieser Presse durch vier Führungssäulen mit minimalen Toleranzen in Blechlaufebene geführt. Durch eine Konstruktion aus Hebeln, Führungselementen und Ausgleichsmassen werden Vibrationen aufgrund rotatorischer und vertikaler Massenbeschleunigung bestmöglich ausgeglichen. Die Nennpresskraft der Presse beträgt 250 kN bei einer stufenlos variierbaren Hubfrequenz im Dauerhubbetrieb zwischen 100 und 1425 Hüben pro Minute. Für Einzelhübe kann im Modus Testhub bei begrenztem Arbeitsvermögen die Hubfrequenz auch auf 25 Hübe pro Minute reduziert werden. Weitere technische Daten der Presse sind in Tabelle 4.1 dargestellt. [BRUD10]

Merkmal	Zahlenwert	Einheit
<i>Nennkraft</i>	250	kN
<i>Hubfrequenz (Dauerhub)</i>	100 bis 1425	Hübe/min
<i>Hubhöhe</i>	13, 16, 19, 25, 32, 38	mm
<i>Stößelverstellweg</i>	51	mm
<i>Aufspannplattenfläche</i>	530 x 640	mm ²
<i>Stößelfläche</i>	360 x 530	mm ²
<i>Werkzeugeinbauhöhe</i>	225,5 bis 288,9	mm

Tabelle 4.1: Technische Daten der Schnellläuferpresse BSTA 25BL [BRUD10]

Angetrieben wird die Presse durch eine Exzenterwelle in Kombination mit einem Mehrlenkersystem. Bei der umgesetzten Ausführung weicht der Stößelgeschwindigkeitsverlauf nur minimal vom kinematischen Verhalten reiner

Exzenterantriebe ab. Eine hohe Maschinensteifigkeit in Vertikalrichtung wird durch eine symmetrische Kraftableitung über vier Lastpfade erreicht, wobei der Mechanismus zur Stößelverstellung, welcher sich kritisch auf die Maschinensteifigkeit auswirkt, nur mit jeweils 20 % der Prozesskraft belastet wird [EBNE11].

4.2 Bandvorschub

Der Bandvorschub vom Typ Bruderer BBV 190 / 85H ist einlaufseitig an die Presse angeflanscht und wird durch die Hauptwelle des Stanzautomaten über eine Gelenkwelle winkelsynchron zum Pressenhub angetrieben. Oszillierende Walzensegmente realisieren die Vorschubbewegung und Klemmleisten halten das Band während des restlichen Pressenhubes auf Position. Die Vorschublänge kann dabei stufenlos eingestellt werden. Die technischen Daten des mechanischen Bandvorschubapparates sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. [BRUD10]

<i>Merkmal</i>	<i>Zahlenwert</i>	<i>Einheit</i>
<i>Vorschublänge</i>	<i>0 bis 85</i>	<i>mm</i>
<i>Walzenbreite</i>	<i>70</i>	<i>mm</i>
<i>Banddurchlassbreite</i>	<i>160</i>	<i>mm</i>
<i>Maximale Banddicke</i>	<i>4</i>	<i>mm</i>
<i>Vorschubwinkel</i>	<i>180</i>	<i>°</i>
<i>Vorschubphasenlage</i>	<i>270 – 90</i>	<i>°</i>

Tabelle 4.2: Technische Daten des Vorschubapparates Bruderer BBV 190/85H [BRUD10]

4.3 Haspel und Richtapparat

Die Bereitstellung des Blechbandmaterials wird über eine Haspel vom Typ SA H 3 Z des Herstellers Hommel mit horizontaler Rotationsachse des Coils und einen Richtapparat vom Typ R/IIA der Firma OBRU realisiert. Über eine Tastarmregelung wird die Förderung bedarfsgerecht an- und abgeschaltet sowie bei auftretenden Problemen ein Not-Aus-Signal an die Pressensteuerung gesendet. Entsprechend der

Vorschubgeschwindigkeit der Presse wird hiermit automatisiert Bandmaterial bereitgestellt.

4.4 Butzenabsaugung

Im Bereich unterhalb der Matrize im Werkzeug wird mit Hilfe eines Seitenkanalverdichters mit vorgeschaltetem Filtertopf und Butzenabscheider Unterdruck erzeugt (Abbildung 4.1). Der Seitenkanalverdichter SV 5.250/2-150 der Firma Becker GmbH & Co, Wuppertal, mit einer Leistung von 2,0 kW saugt die entstehenden Butzen ab, die sich dann im Butzenabscheider sammeln. Ein Hochwandern der Butzen wird durch die Sogwirkung erschwert und durch das Sammeln der filigranen, elektrisch leitenden Bauteile in einem verschlossenen Behältnis kann verhindert werden, dass diese ungewollt in Führungen von Werkzeug und Presse gelangen oder in den umliegenden elektronischen Systemen Pressensteuerung, Messtechnik und Messrechner Kurzschlüsse verursachen.

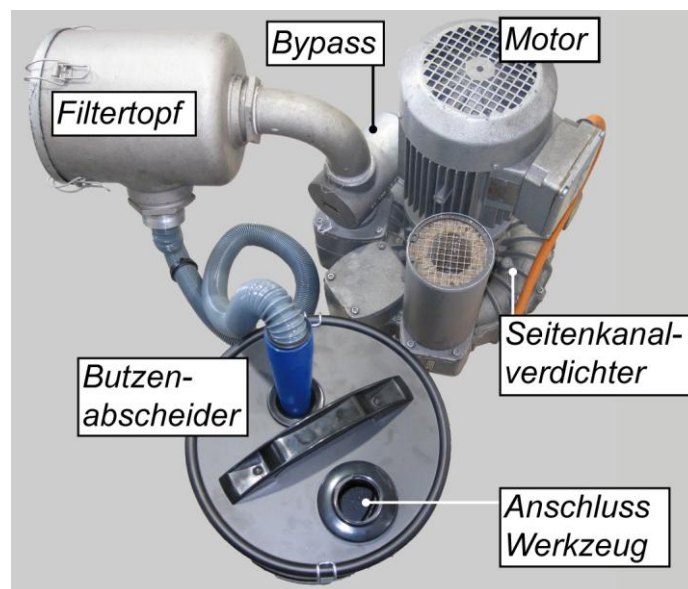


Abbildung 4.1: Seitenkanalverdichter mit Luftfilter und Butzenabscheider

Während eines Pressenhubes wird der Absaugtrakt zeitweise mit dem noch ungeschnittenen Blechstreifen verschlossen. Um den Seitenkanalverdichter vor Überhitzung im Dauerbetrieb zu schützen, ist unmittelbar nach dem Filtertopf ein

Bypass eingebaut. Technische Daten der Vakuumpumpe können Tabelle 4.3 entnommen werden.

Merkmal	Zahlenwert	Einheit
<i>Motorleistung</i>	<i>2,0</i>	<i>kW</i>
<i>Max. Drehzahl</i>	<i>2800</i>	<i>min⁻¹</i>
<i>Volumenstrom</i>	<i>bis zu 140</i>	<i>m³/h</i>
<i>Saugdruck</i>	<i>bis zu -400</i>	<i>mbar</i>

Tabelle 4.3: Technische Daten Seitenkanalverdichter

4.5 Profilmesseinrichtung

Zur Vermessung der Schneidkantengeometrie der Stempel bei verschiedenen Verschleißzuständen wird eine Profilmesseinrichtung der Firma Mahr GmbH, Göttingen verwendet. Nach dem Prinzip des Tastschnittverfahrens [DIN4287] wird entlang einer Linie die Oberflächenkontur von Bauteilen ermittelt. Das lineare Vorschubsystem PCV 200 bewegt dazu einen Messtaster mit einer Tastarmlänge von 350 mm über das jeweilige Messobjekt. Steuerung und Auswertung der Prüfungen werden mit einem PC und der Software MarWin XC 20 realisiert [MAHR04]. Bei den Untersuchungen kam eine Kegeltastspitze mit einer Gesamthöhe von 33 mm und einem Kopfradius von 25 µm zum Einsatz. Trotz einer nicht unwesentlichen Veränderung des Kontaktpunktes zwischen Tastspitze und dem zu vermessenden Bauteil [FUGG84] bei kleinen Radien können „*herausragende Profilelemente bis hin zu einer perfekten Spitze*“ aufgrund der Anwendung eines herstellereigenen Auswertalgorithmus erfasst werden [REIT11]. In Tabelle 4.4 sind weitere technische Daten der Vorschubeinheit für die Profilmessung zusammengefasst.

<i>Merkmal</i>	<i>Zahlenwert</i>	<i>Einheit</i>
<i>Messbereich</i>	<i>50</i>	<i>mm</i>
<i>Geradheitsabweichung</i>	<i>< 0,5</i>	<i>μm/mm</i>
<i>Rechtwinkligkeitsabweichung</i>	<i>< 2</i>	<i>' (Winkelminuten)</i>
<i>Auflösung in x-Richtung</i>	<i>1,0</i>	<i>μm</i>
<i>Auflösung in z-Richtung</i>	<i>0,38</i>	<i>μm</i>

Tabelle 4.4: Technische Daten des Vorschubgerätes PCV 200 [MAHR04]

4.6 Universalprüfmaschine

Zur Überprüfung der Blechwerkstoffkennwerte sowie zur Absicherung der gemessenen Kraftsignale im Versuchswerkzeug werden vergleichende Messungen in einer Universal Zug-Druck-Prüfmaschine vom Typ 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH, Ulm durchgeführt. Der im System angesteuerte Kraftmessaufnehmer kann Zug- und Druckkräfte bis 20 kN erfassen. Nach [DIN7500-1] erfüllt die eingesetzte Messdose im Bereich zwischen 40 N und 20 kN die Genauigkeitsklasse 0,5. Die Universalprüfmaschine wird mit einem PC mit zugehöriger Prüfsoftware testXpert II der Firma Zwick gesteuert. [ZWIC07]

4.7 Rasterelektronenmikroskop

Für qualitative Untersuchungen der Schneidstempel wird ein Rasterelektronenmikroskop (REM) vom Typ AMR 1200B der Firma Leitz AMR GmbH, Wetzlar eingesetzt. Die Bilddaten werden dabei an einen PC übertragen und können dann digital abgespeichert werden. Mit dem vorhandenen Gerät sind Vergrößerungen zwischen 4- und 200.000-fach möglich. [LEIT78]

5 Versuchswerkstoffe

5.1 Werkzeugplattenwerkstoffe

Zur Untersuchung der Möglichkeiten der Optimierung des Schwingungs- und Dämpfungsverhaltens in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen werden in einem Versuchswerkzeug Kopf- und Grundplatten aus drei metallischen Werkstoffen und einem faserverstärkten Kunststoff eingesetzt.

5.1.1 Stahl und Aluminiumlegierung als übliche Plattenwerkstoffe

Als Referenzwerkstoff wird ein unlegierter Vergütungsstahl C45, wie er auch in der industriellen Praxis häufig eingesetzt wird, als Plattenwerkstoff untersucht. Aluminiumlegierungen sind ebenfalls als Plattenwerkstoff in Stanzwerkzeugen verbreitet und werden als metallischer Leichtbauwerkstoff im Versuchsplan berücksichtigt. Bei der eingesetzten Aluminiumlegierung handelt es sich um eine Sondergüte der Legierung EN AW-7022 mit dem Handelsnamen Certal[®] des Unternehmens ALCAN Valais. Gegenüber den Mindestanforderungen an die mechanischen Kennwerte nach [DIN485-2] weist diese Sonderlegierung nach [CERT11] über 30 % höhere Werte für Streckgrenze und Zugfestigkeit auf. Sowohl Säulengestelle aus Stahl als auch aus Aluminiumlegierungen werden von Normalienanbietern standardisiert bereitgestellt. Ein Vergleich ausgewählter Kennwerte sowie eine Übersicht an Werkstoffbezeichnungen für den eingesetzten Stahl- und Aluminiumplattenwerkstoff ist mit Tabelle 5.1 möglich. Im Weiteren werden für die aufgeführten Legierungen auch vereinfacht die Begriffe Stahl oder Aluminium verwendet.

Werkstoff- bezeichnungen	Dichte ρ [t/m³]	Streckgrenze $R_{p0.2}$ [N/mm²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]
Stahl – C45 – 1.0503	ca. 7,85	≥ 305	≥ 580	ca. 210.000
Al – Certal [®] – 3.4345	2,76	490 – 495	545 – 555	ca. 72.000

Tabelle 5.1: Werkstoffkenndaten der eingesetzten Stahl- und Aluminiumplattenwerkstoffe nach [DIN10083-2] und [CERT11]

5.1.2 Magnesiumlegierung und CFK als neuartige Plattenwerkstoffe

Magnesiumlegierung

Ein Einsatz von Magnesiumplatten in Stanzwerkzeugen ist bisher nicht bekannt, obwohl der Werkstoff gegenüber Aluminium einen weiteren Gewichtsvorteil verspricht und die Streckgrenze bzw. Druckfestigkeit des Werkstoffes für einen Großteil der Belastungsfälle ausreichend ist. In der vorliegenden Arbeit wird das Potential von Magnesium als Plattenwerkstoff in einem schnelllaufenden Schneidwerkzeug untersucht. Beim ausgewählten Magnesiumwerkstoff handelt sich um eine kommerziell verfügbare Knetlegierung AZ31B mit einem Anteil von drei Gewichtsprozent Aluminium und einem Gewichtsprozent Zink, deren Bezeichnung und Zusammensetzung nach [ASTMB90/B90M] genormt ist. Die beiden Legierungszusätze erhöhen die Zugfestigkeit des Magnesiumgrundwerkstoffes und bewirken eine Kornverfeinerung im Gefüge [BACH05], [KLEI02]. Zusätzlich hat Aluminium einen positiven Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit, da die bei Reinformmagnesium auftretenden porösen Oxidschichten durch einen Aluminiumanteil von über zwei Gewichtsprozent stabilisiert werden [BACH05]. Eine Übersicht über die Legierungszusammensetzung des eingesetzten Magnesiumwerkstoffes, im Weiteren auch vereinfacht Magnesium genannt, gibt Tabelle 5.2.

<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Ca</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Mg</i>
2,5 – 3,5	0,2 – 1,0	0,6 – 1,4	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,005	≤ 0,005	≤ 0,1	Rest

Tabelle 5.2: Chemische Zusammensetzung des Magnesiumwerkstoffes AZ31B in Gewichts-% nach [ASTMB90/B90M]

Neben Unterschieden in Dichte und Elastizitätsmodul im Vergleich zu Stahl- und Aluminiumwerkstoffen wird bei Magnesiumwerkstoffen häufig ein stark erhöhtes Dämpfungsvermögen erwähnt [CHEN10], [GÖKE03], [HU10], [KAMM00]. Während die Dämpfungskennwerte von hochreinem Magnesium im Bereich von weichen Polymeren liegen, können geringste Verunreinigungen, der Grad der Umformung, die Korngröße oder die Textur den spezifischen Dämpfungsindex deutlich senken

[KAMM00]. Es wird angenommen, dass das Dämpfungsvermögen von Magnesiumlegierungen maßgeblich von den Versetzungsbewegungen beeinflusst wird [GRAN56]. Fremdatome, Ausscheidungen, Korngrenzen oder Versetzungsknoten in den Basalebene der Elementarzellen von Magnesium mit hexagonal dichtester Packung (hdp) können diese Bewegungen behindern [CHEN10], [KOEH50]. Für die Untersuchungen ist ein hohes Dämpfungsvermögen beim Einsatz als Plattenwerkstoff wünschenswert. Neben diesem wird in Hinblick auf die Akzeptanz in der industriellen Praxis die Thematik Verfügbarkeit als Plattenwerkstoff, Möglichkeiten der spanenden Bearbeitung und Oxidationsbeständigkeit bei der Auswahl ebenfalls berücksichtigt. Nach Angaben des Herstellers Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH, Salzgitter, können mit dem eingesetzten Plattenwerkstoff AZ31B die Anforderungen hohe Festigkeit bei Raumtemperatur, hohe Duktilität, gute Bearbeitbarkeit und Schweißbarkeit sowie „*ein extrem hohes Dämpfungsvermögen weit oberhalb des Aluminiums*“ in einem Werkstoff vereint werden [SZMT08]. Ausgewählte Kennwerte sowie alternative Werkstoffbezeichnungen für den eingesetzten Magnesiumplattenwerkstoff können Tabelle 5.3 entnommen werden.

Werkstoff- bezeichnungen	Dichte ρ [t/m³]	Streckgrenze $R_{p0.2}$ [N/mm²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]
Mg – AZ31B – 3.5312	1,78	130 – 160	240 – 260	45.000

Tabelle 5.3: Werkstoffkenndaten der eingesetzten Magnesiumlegierung nach [SZMT08]

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Als weiterer neuartiger Werkzeugplattenwerkstoff wird kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff in einem schnelllaufenden Schneidwerkzeug untersucht. Die eingesetzten Platten werden vom Normalienanbieter Agathon AG, Solothurn, Schweiz bezogen, der die positiven Eigenschaften geringe Masse, gute Schwingungsdämpfung und geringe Wärmeausdehnung dieses Werkstoffes aufführt [AGAT09].

Ein Einsatz des Werkstoffes in der industriellen Praxis als Platten in Werkzeugen für Schnellläuferpressen ist bisher nicht dokumentiert. Bei Aufbauten mit pneumatischen

Antrieben zur Herstellung von Lochplatten (vgl. [DIN24041]) im Scherschneidverfahren zeigen die Platten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff aufgrund der hohen Steifigkeit bei geringer Masse Vorteile bezüglich der maximalen Schwingungshöhe gegenüber einem Aufbau aus Stahlplatten [AGAT09].

Neben der geringen Dichte ρ , die nach [MOSE92] in Abhängigkeit des Faseranteils zwischen 1,25 und 1,75 t/m³ betragen kann, wird ein mit Kohlenstofffasern verstärkter Kunststoff häufig auch mit guten Dämpfungseigenschaften beschrieben [EHRE06], [HALD93]. Während die polymeren Matrixwerkstoffe im Allgemeinen einen hohen Dämpfungskennwert aufweisen [MÖSE10], nimmt dieser Wert mit zunehmendem Faseranteil im Verbundwerkstoff ab. Dies liegt darin begründet, dass ein Großteil der Spannungen im Bauteil über die Verstärkungsfasern übertragen wird, die selbst über einen geringeren Verlustfaktor verfügen [JENN73]. Bei hochbeanspruchten Strukturbauteilen hat sich ein Faservolumenanteil V_f von 60 % als Standardwert etabliert, wobei nach [SCHÜ07] hierfür eine Obergrenze bei etwa 65 % liegt, da ab diesem Wert eine vollständige Benetzung und Verklebung der Fasern durch den Matrixwerkstoff nicht mehr sichergestellt ist.

Da eine zerstörungsfreie Bestimmung des Faseranteils der eingesetzten Plattenvariante nicht möglich ist, kann auf den Faseranteil nur mit Hilfe einer Patentanmeldung des Plattenherstellers geschlossen werden. In [SEML11] werden hierin drei Beispiele für Ausführungsformen genannt, die allesamt „*ein duroplastisches Matrixsystem, nämlich Epoxidharz*“ und „*Carbongewebe mit quasiisotropem Aufbau*“ aufweisen, wobei „*der so gebildete Faserverbundwerkstoff einen Fasergehalt von 56 Gewichts-% aufweist*“. In Abbildung 5.1 ist in einer Seitenansicht der Grundplatte der schichtweise Aufbau in Plattendickenrichtung dargestellt. Symmetrisch zur Plattenmitte weisen sowohl die eingesetzte Grund- als auch Kopfplatte einen Aufbau aus unterschiedlichen Gelegen auf. Anhand der Schnittfläche ist erkennbar, dass sowohl Schichten aus gewebten Verstärkungsfasern (z. B. an den Oberflächen und in der Plattenmitte) als auch uniaxiale und multiaxiale Gelege beim Plattenaufbau eingesetzt wurden. Bei Betrachtung der Plattenoberseite ist eine Schleifbearbeitung

zur Realisierung geforderter Toleranzen in Bezug auf die Oberflächenparallelität erkennbar.

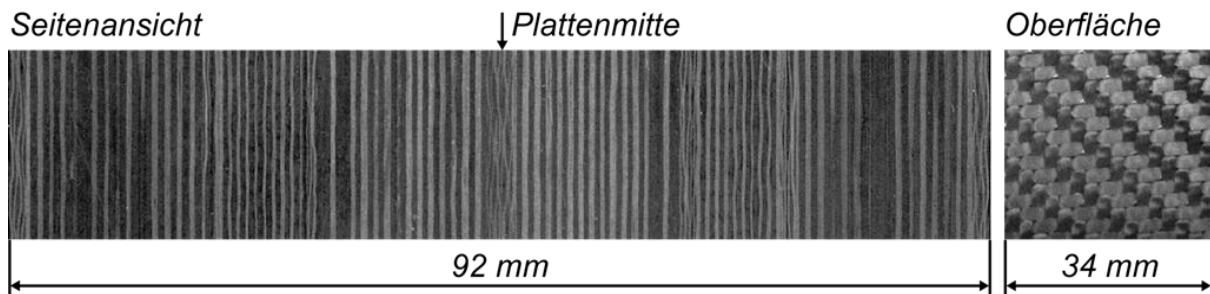


Abbildung 5.1: Ansichten der Grundplatte aus faserverstärktem Kunststoff

Bei idealisiertem Faser-Matrix-Kontakt lässt sich das Dämpfungsvermögen von Werkstoffen nach der Mischungsregel (auch „rule of mixture“) berechnen [NIEL94]. Angewandt auf den Verlustfaktor $d_{Verbund}$ ergibt sich Formel 5.1, in der die Verlustfaktoren von Faser- und Matrixwerkstoff mit einer Gewichtung entsprechend deren Faservolumenanteil eingehen. Die Bestimmung der Volumenanteile von Fasern und Harz wird hierzu in [DIN2564] beschrieben. Da der Dämpfungseffekt in der Verstärkungsfaser im Allgemeinen sehr gering ist, wird der Dämpfungsterm für den Faserwerkstoff häufig vernachlässigt [DONG93].

$$d_{Verbund} = V_f \cdot d_f + (1 - V_f) \cdot d_m \quad (5.1)$$

$d_{Verbund}$	Verlustfaktor des Werkstoffverbundes [-]
d_f	Verlustfaktor des Faserwerkstoffes [-]
d_m	Verlustfaktor des Matrixwerkstoffes [-]
V_f	Volumenanteil des Faserwerkstoffes [-]

In der Realität kann aber auch bei geringem Faservolumenanteil V_f nicht von idealen Faser-Matrix-Kontaktflächen ausgegangen werden, so dass neben den viskoelastischen Eigenschaften des Matrixwerkstoffes auch Grenzflächenreibung zwischen Harz, Fasern und Füllstoffpartikeln einen wesentlichen Anteil zum Dämpfungsvermögen beitragen [DONG93], [EHRE06]. Zur Abschätzung der Dämpfungseigenschaften während der Bauteillegung sind bereits Ansätze zur numerischen Berechnung vorhanden [PERV92]. Ein Beispiel für die Abhängigkeit der

Dämpfung von der Faserorientierung ist im Anhang (Kapitel 12.1) mit einem polaren Dämpfungsdiagramm für ein bidirektional verstärktes CFK-Versuchsmaterial gegeben.

Hystereseverluste bei Spannungs-Dehnungsbelastungen sind hauptsächlich für Dämpfungseffekte in Metallen und Werkstoffverbänden verantwortlich und sind bei üblichen Arbeitsbedingungen unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G der Polymermatrix unabhängig von der Frequenz der Belastungen [ADAM03]. Die Einsatztemperatur der verwendeten kohlenstofffaserverstärkten Plattenwerkstoffe wird im Produktdatenblatt mit bis zu 150°C angegeben [AGAT09]. Zusammenfassende Produkteigenschaften der eingesetzten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatten nach Herstellerangabe finden sich in Tabelle 5.4. Es wird angenommen, dass sich der angegebene Zahlenwert von 135.000 N/mm² für den Elastizitätsmodul bei Zugbelastung auf Plattenaufbauten mit unidirektionaler Orientierung der Verstärkungsfaser bezieht. Bei quasiisotropem Aufbau, wie er bei der eingesetzten Platte vorzufinden ist, ist ein deutlich reduzierter Wert anzunehmen.

Dichte	Zugfestigkeit	E-Modul bei Zugbelastung	Betriebs-temperatur
1,65 t/m ³	1.600 N/mm ²	135.000 N/mm ²	≤ 150°C

Tabelle 5.4: Werkstoffkenndaten der eingesetzten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatten (Herstellerangaben) [AGAT09]

Da eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung zur Ermittlung weiterer Kennwerte der eingesetzten CFK-Platten nicht möglich ist, werden in Tabelle 5.5 ausgewählte Kennwerte für typische CFK-Verbundwerkstoffe am Beispiel einer unidirektional faserverstärkten Einzelschicht aus der Literatur als Richtwert aufgetragen. Die realen Kennwerte von quasiisotrop verstärkten Verbundwerkstoffen liegen in der Regel zwischen den Zahlenwerten von senkrechter (\perp) und paralleler (\parallel) Beanspruchungsrichtung.

Merkmal	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
<i>Faserparalleler Elastizitätsmodul</i>	$E_{ }$	140.000	N/mm ²
<i>Fasersenkrechter Elastizitätsmodul</i>	E_{\perp}	12.000	N/mm ²
<i>Faserparallele Druckfestigkeit</i>	$\sigma_{ }$	1.400	N/mm ²
<i>Fasersenkrechte Druckfestigkeit</i>	σ_{\perp}	200	N/mm ²

Tabelle 5.5: Mechanische Kennwerte für unidirektional kohlenstofffaserverstärkte Einzelschichten (Literaturangaben) [AVK10]

5.2 Stempelwerkstoffe

Für die Untersuchungen der Auswirkungen der verschiedenen Plattenwerkstoffe auf das Verschleißverhalten der Stempel werden drei unterschiedliche Stempelwerkstoffe eingesetzt. Um identische Versuchsbedingungen für alle Stempelwerkstoffe und gleichzeitig eine statistische Auswertung zu gewährleisten, werden von jeder Stempelvariante jeweils drei Stück gleichzeitig im neunspurigen Versuchswerkzeug eingesetzt. Während die Matrize mit Durchbrüchen für neun Lochungen aus einem Hartmetallblock individuell gefertigt wird, werden für die Schneidstempel Normalien nach [DIN9861-2] der FIBRO GmbH, Weinsberg, eingesetzt.

5.2.1 Schnellarbeitsstahl

Die Schneidstempel aus Schnellarbeitsstahl (HSS) werden aus dem Lieferprogramm eines Normalienherstellers bezogen. Bei der Legierung handelt es sich laut [FIBR11] um eine Zusammensetzung, die der Werkstoffnummer 1.3343 ähnlich ist. Mit Tabelle 5.6 ist die chemische Zusammensetzung des hochlegierten Werkzeugstahles 1.3343 gegeben, der nach dem Massenanteil der Hauptlegierungselemente Wolfram, Molybdän und Vanadium auch die Werkstoffbezeichnung HS6-5-2C nach [DIN4957] trägt.

C	Cr	Mo	V	W	Si	Fe
0,86 – 0,94	3,80 – 4,50	4,70 – 5,20	1,70 – 2,10	5,90 – 6,70	≤ 0,45	Rest

Tabelle 5.6: Chemische Zusammensetzung in Gewichts-% des eingesetzten Schnellarbeitsstahls HS6-5-2C nach [DIN4957]

5.2.2 Pulvermetallurgisch hergestellter Stahl

Weitere Schneidstempel sind pulvermetallurgisch aus einer ebenfalls den Schnellarbeitsstählen zugeordneten Legierung hergestellt. Der sogenannte PM-Stahl weist aufgrund des Herstellungsverfahrens gegenüber den HSS-Stempeln eine homogenere Verteilung der Legierungsbestandteile und Karbide auf, was sich im Einsatz häufig durch eine höhere Verschleißbeständigkeit und Zähigkeit zeigt. Bezeichnungen für diesen pulvermetallurgisch hergestellten Stahl sind der von der Erasteel S. A. S., Paris, Frankreich, geschützte Begriff ASP[®] 2023, 1.4433 und nach den Anteilen der Hauptlegierungselemente und des Herstellungsverfahrens PM HS6-5-3 [DIN10027-1], [DIN4957], [FIBR11]. Die Legierungszusammensetzung zeichnet sich im Vergleich zum Werkstoff HS6-5-2C durch einen höheren Kohlenstoff- und Vanadiumgehalt aus (Tabelle 5.7).

C	Cr	Mo	V	W	Si	Fe
1,15 – 1,25	3,80 – 4,50	4,70 – 5,20	2,70 – 3,20	5,90 – 6,70	≤ 0,45	Rest

Tabelle 5.7: Chemische Zusammensetzung in Gewichts-% des pulvermetallurgisch hergestellten Stahls PM HS6-5-3 nach [DIN4957]

5.2.3 Hartmetall

Als dritte Werkstoffvariante werden Stempel aus Hartmetall (HM) verwendet. Dieser ebenfalls pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoff aus Wolframcarbiden in einer Cobaltmatrix zeichnet sich üblicherweise durch höchste Verschleißbeständigkeit aus, wobei aufgrund der eingeschränkten Biegefestigkeit ein Einsatz nur in äußerst

präzise gefertigten Werkzeugen in Frage kommt. Vom Normalienanbieter werden für die eingesetzte Hartmetallgüte ein Wolframcarbidanteil von 94 Gewichts-% Wolframcarbid in 6 % Cobaltmatrix angegeben.

5.2.4 Festigkeits- und Härtekennwerte der eingesetzten Stempelwerkstoffe

Für die Kennwerte Druckfestigkeit und Biegebruchfestigkeit der eingesetzten Stempelwerkstoffe Schnellarbeitsstahl und Hartmetall kann mit Abbildung 5.2 nach [FIBR11] ein Vergleich stattfinden. Die Eigenschaften des PM-Stahls liegen üblicherweise zwischen den angegebenen Kennwertbereichen von Schnellarbeitsstahl und Hartmetall.

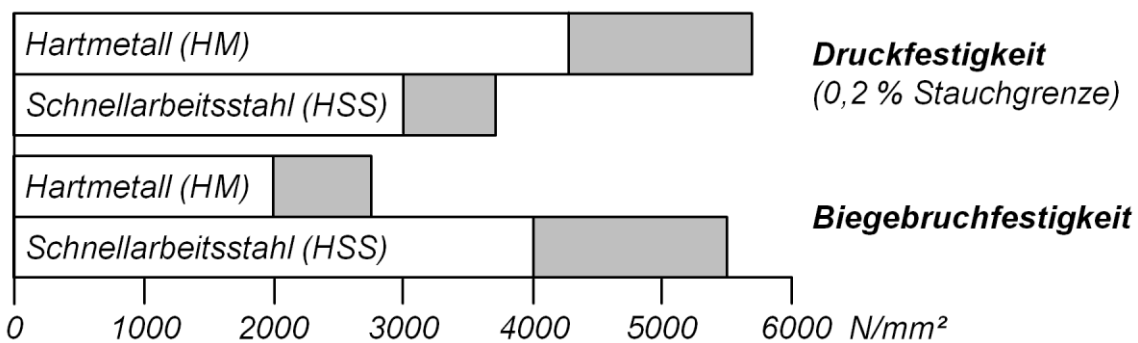


Abbildung 5.2: Werkstoffeigenschaften von Schneidstempelwerkstoffen [FIBR11]

Die Härte der Schneidstempel aus Schnellarbeitsstahl (HSS und PM-Stahl) wird vom Hersteller mit 64 HRC mit einer Toleranz von ± 2 HRC im Schaftbereich angegeben. Im Bereich des Stempelkopfes liegt die Härte nach dem Warmstauchen und Anlassen in einem Intervall zwischen 49 und 55 HRC. Die für die Schneidversuche eingesetzten Stempel entstammen jeweils einer Fertigungscharge, so dass innerhalb eines Werkstoffes keine Härteschwankungen zu erwarten sind.

Bei den Stempeln aus Hartmetall variiert die Härte zwischen Schaft- und Kopfbereich nicht, da die Kopfgeometrie durch Materialabtrag aus dem Vollmaterial herausgearbeitet wird. Die Härte liegt mit einem vom Hersteller angegebenen Vickers-Härtewert von 1350 HV10 über dem mit der Härteprüfung nach Rockwell [DIN6508-1] und der Härteskala C festgelegten Anwendungsbereich bis 70 HRC.

Auf eine verschleißmindernde Hartstoffbeschichtung der Stempel wird im Rahmen der Untersuchungen bewusst verzichtet, um einen Einfluss möglicher Unterschiede in der Beschichtungsgüte auszuschließen. Des Weiteren sind für die Untersuchungen höhere Verschleißniveaus für die Auswertbarkeit der Ergebnisse förderlich.

5.3 Blechwerkstoff

Für die praktischen Versuche wird ein Blechwerkstoff CuFe2P „mit sehr guter Kaltumformbarkeit“ [DKI05a] eingesetzt, der vielfach bei der Fertigung von Bauteilen wie Steckkontakten oder Halbleiterträgern Anwendung findet [LANG11], [WIEL11]. Bei den genannten Bauteilen handelt es sich um typische Stanzteile für die Elektronikindustrie, die mit hoher Ausbringung auf schnelllaufenden Stanzautomaten gefertigt werden. Für die niedriglegierte Kupferknetlegierung CuFe2P mit dem Hauptlegierungselement Eisen ist auch die von der Wieland-Werke AG, Ulm, geschützte Bezeichnung K65[®] oder die Werkstoffnummer CW107C als Benennung verbreitet [DIN1412], [DIN1654]. Der Blechwerkstoff mit der in Tabelle 5.8 dargestellten Legierungszusammensetzung ist in verschiedenen Walzzuständen mit unterschiedlichen Festigkeiten lieferbar.

Fe	P	Pb	Zn	Sonstige	Cu
2,1 – 2,6	0,015 – 0,15	≤ 0,03	0,05 – 0,20	≤ 0,2	Rest

Tabelle 5.8: Chemische Zusammensetzung des Kupferblechwerkstoffes in Gewichts-% nach [DIN1654]

Die Festigkeitskennwerte des Blechwerkstoffes werden daher mit der in Kapitel 4.6 beschriebenen Universalprüfmaschine im Zugversuch nach [DIN10002-1] bei Raumtemperatur ermittelt. Da eine Erwärmung des Versuchswerkzeuges während der Untersuchungen möglich erscheint, werden auch Zugversuche bei erhöhter Temperatur von 50°C nach [DIN10002-5] durchgeführt. Als Prüfgeometrie wird dabei nach [DIN50125] Form H für Flachzugproben von Flacherzeugnissen mit einer Probenbreite von 20 mm und einer Anfangsmesslänge von 80 mm verwendet. Die

Mittelwerte der ermittelten Streckgrenzen $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeiten R_m von jeweils mindestens drei Proben sind in Tabelle 5.9 aufgetragen. Ein geringfügiger Abfall der Festigkeitskennwerte bei Temperaturerhöhung ist dabei feststellbar.

Prüftemperatur T	Streckgrenze $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit R_m
22°C	400 [N/mm ²]	435 [N/mm ²]
50°C	391 [N/mm ²]	418 [N/mm ²]

Tabelle 5.9: Festigkeitskennwerte des Kupferblechwerkstoffes

Die Abmessungen des Spaltbandes betragen 55 mm in der Breite und 0,29 mm in Dickenrichtung. Wie auch bei der Produktion von Steckkontakten häufig eingesetzt, ist das Blech für die Untersuchungen beidseitig feuerverzinkt [DIN13148]. Die Dicke der Reinzinnschicht beträgt nach dem Abnahmeprüfzeugnis [WIEL01] zwischen 1 µm und 3 µm.

6 Versuchsplan

Die in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensweise zur Erreichung des Projektziels wird mit nachfolgendem Versuchsplan (Abbildung 6.1) detailliert beschrieben.

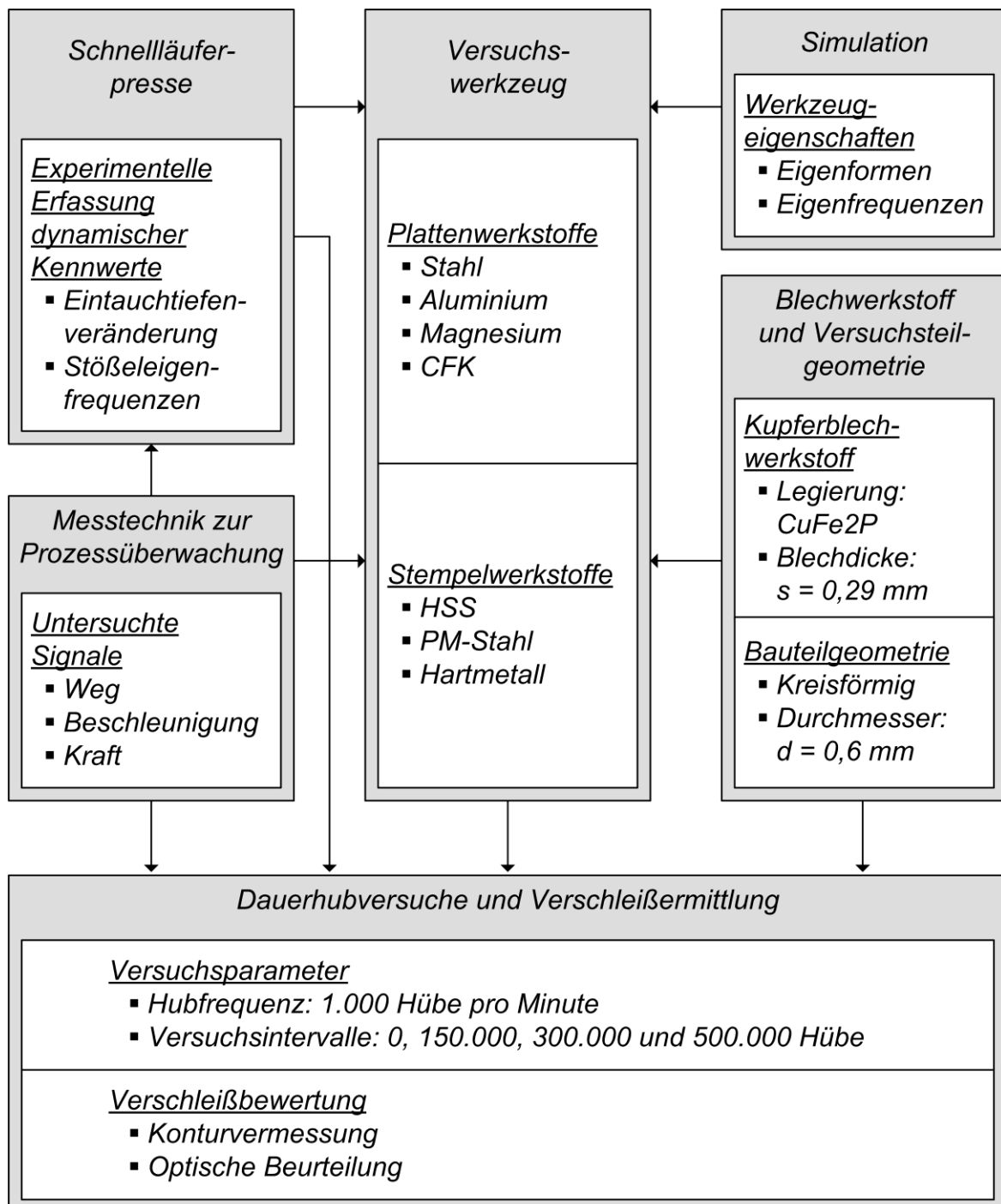


Abbildung 6.1: Versuchsplan

7 Versuchswerkzeug

Zur Untersuchung des Schwingungs- und Dämpfungsverhaltens in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München ein Versuchswerkzeug zum Schneiden von Löchern entwickelt und konstruiert. Die Fertigung erfolgte bei der Firma Stueken s. r. o., Hradec Králové, Tschechische Republik, einem Tochterunternehmen der Hubert Stüken GmbH & Co. KG, Rinteln.

7.1 Werkzeugkonzept

Bei der Konzeptionierung des Versuchswerkzeuges wurde das Scherschneidverfahren mit geschlossener Schnittlinie für die Untersuchungen ausgewählt, da hierbei die Problematik von Schwingungen aufgrund des Schnittschlages allseits bekannt ist, und die angeregten Schwingungen direkt zu einer Verlängerung des Reibweges zwischen Schnittfläche und Stempelmantelfläche und somit zu erhöhtem Verschleiß führen. Die Schnittliniengeometrie wurde hierbei als Kreisform festgelegt, da so von einem rotationssymmetrischen Spannungszustand ausgegangen werden kann und keine Beeinflussung aufgrund von Randeffekten zu befürchten ist. Um mehrere Stempelwerkstoffe in die Untersuchung einbeziehen zu können, werden gleichzeitig neun Lochoperationen ausgeführt. Die Bauart des Versuchswerkzeuges erlaubt es, die Kopf- und Grundplatte durch solche aus alternativen Werkstoffen auszutauschen, während die Führungsplatte als zentrale Komponente des Werkzeuges identisch bleibt.

7.2 Werkzeugkonstruktion

7.2.1 Schneidstempelanordnung

Mit der Zielsetzung des Einsatzes von genormten Schneidstempeln mit abgesetztem Schaft [DIN9861-2] wurde ein zur Blechdurchlaufrichtung symmetrisches Lochbild in fünf Reihen erzeugt (Abbildung 7.1). Der Abstand zwischen zwei Stempelpuren beträgt 5,5 mm und zwischen zwei Stempelreihen 4 mm. Mit einem realisierten Vorschubschritt von 2 mm entsteht somit ein geordnetes Lochbild im Stanzgitter.

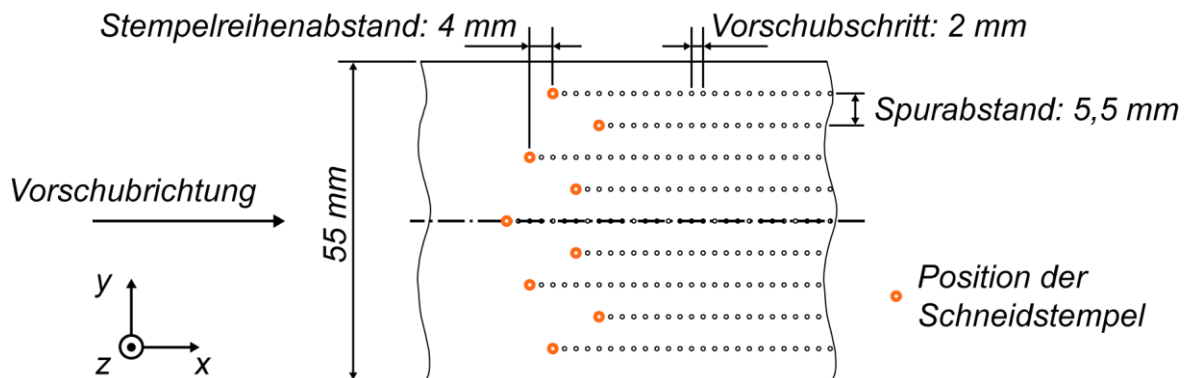


Abbildung 7.1: Stempelreihenabstand und geschnittenes Lochbild am Blechstreifen

Die verbleibenden Stegbreiten zwischen den Lochungen von mindestens 1,4 mm übersteigen den in der VDI-Richtlinie 3367 genannten Mindestwert von 0,8 mm für kreisrunde Löcher mit Durchmesser 0,6 mm bei der gegebenen Blechdicke [KELL01]. Bei dieser Stempelreihenabstand aus genormten Rundstempeln mit abgesetztem Schaft mit einem Kopfdurchmesser von 3 mm kann somit eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden. Der Schnittpunkt aus der Symmetrielinie des Lochbildes und der Verbindungslinie derjenigen Schneidstempel, die dem Streifenrand am nächsten stehen, wurde als Zentrum des Versuchswerkzeuges festgelegt. Ein Abstand von 0,89 mm des aus dem Schnittbild resultierenden Kraftschwerpunktes von der Werkzeugmitte in positiver x-Richtung wurde zu Gunsten einer vereinfachten Werkzeugkonstruktion in Kauf genommen.

7.2.2 Werkzeugaufbau

In Anlehnung an kommerziell erhältliche Säulengestelle wurde eine Werkzeuggrundfläche von 196 mm x 196 mm gewählt und aus Gründen der einfacheren Befestigung an Pressentisch und Stößel, quer zur Blechdurchlaufrichtung auf 296 mm vergrößert. Die Werkzeuggesamthöhe im unteren Umkehrpunkt beträgt 251 mm. Vier Führungssäulen mit einem Durchmesser von 19 mm mit Kugelführungen wurden zur Realisierung einer hohen Quersteifigkeit als Mittenbundsäulen in der Führungsplatte befestigt. Durch diese Ausführung konnten die Werkzeugkosten gering gehalten und die Einflüsse von Fertigungstoleranzen auf die Versuche beim Austausch der Kopf- und Grundplatten durch alternative Werkstoffe minimiert werden, da die mittlere

Niederhalter- und Führungsplatte als zentrale Komponente des Werkzeuges für alle vier Plattenwerkstoffvarianten identisch bleibt. Eine Darstellung im abgesetzten Schnitt in Ebenen senkrecht zur Blechdurchlaufrichtung durch eine Führungssäule und die Werkzeugmitte ist in Abbildung 7.2 gegeben.

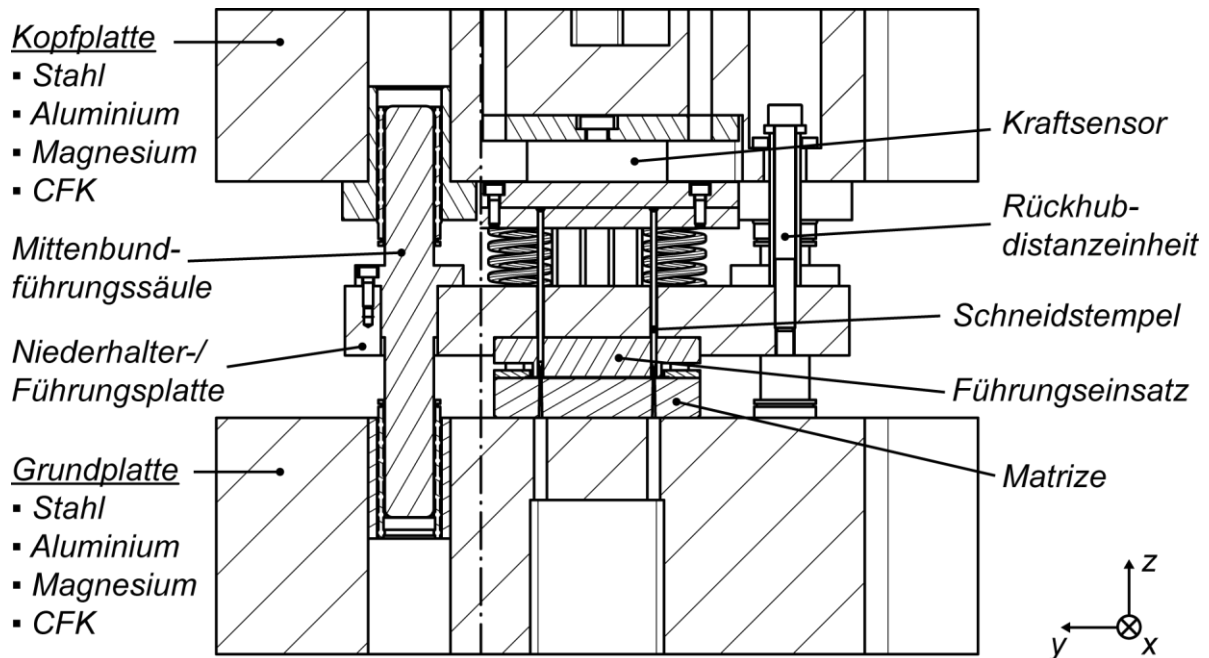


Abbildung 7.2: Schnittdarstellung des Versuchswerkzeuges im unteren Umkehrpunkt durch eine Führungssäule bzw. die Werkzeugmitte

Im Kraftfluss zur Kopfplatte wurde ein Kraftsensor mit einem Durchmesser von 54,5 mm zwischen zwei gehärteten und geschliffenen Platten integriert. Trotz der höheren Steifigkeit von Werkzeugen zur industriellen Bauteilfertigung in diesem Bereich war diese Konstruktion zur Aufzeichnung der Schneid- und Rückzugkräfte im Krafthauptschluss des Versuchswerkzeuges notwendig und zielführend. Zentral unter dem Kraftsensor wurden die Stempelköpfe von einer Stempelhalterplatte mit minimalem Spiel nach [FIBR11] an der unteren Druckplatte befestigt.

Während die vier Rückhubdistanzeinheiten achsensymmetrisch zur Werkzeugmitte angeordnet sind, befinden sich jeweils zwei Schraubenfedern zur Aufbringung der Niederhalterkraft im Ein- und Auslaufbereich des Bandes zwischen Kopf- und Niederhalterplatte.

Als Werkzeugaktivelemente werden runde Schneidstempel mit abgesetztem Schaft und Form C im Kopfbereich nach [FIBR11] bzw. [DIN9861-2] eingesetzt (Abbildung 7.3). Der zylindrische Arbeitsbereich mit einem Durchmesser von 0,60 mm wurde gegenüber der Norm in der Länge gekürzt, um die radiale Steifigkeit zu erhöhen. Diese Abweichung war notwendig, da die Stempelführung im 2 mm dicken Schaftbereich des Stempels in einiger Entfernung der Blechlaufebene stattfindet, um ein Verklemmen in der Stempelführung aufgrund von entstehenden Aufschweißungen im Mantelbereich bei den Dauerversuchen auszuschließen.

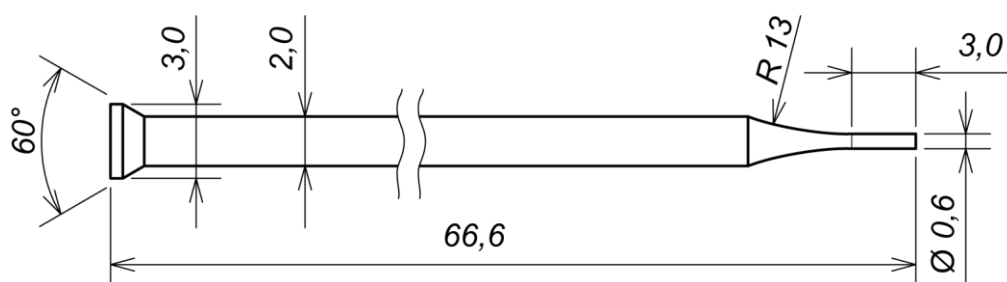


Abbildung 7.3: Abmessungen der eingesetzten Schneidstempel [DIN9861-2]

Zur Führung der im Kopfbereich mit Spiel gelagerten Schneidstempel wurde in der Niederhalter- bzw. Führungsplatte ein Stempelführungseinsatz für die neun Stempel aus gehärtetem Stahl integriert. In der Führungsplatte selbst werden die Schneidstempel nicht geführt, so dass die Durchgangslöcher darin mit vergrößertem Spiel ausgeführt wurden. Eine Detailansicht der Stempelführung, in der sich die Stempel 0,89 mm über dem unteren Umkehrpunkt befinden, ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

Mit einer anhand von Formel 2.1 abgeschätzten Schneidkraft von 160 N je Stempel besteht mit einem Sicherheitsfaktor von mehr als 3,4 weder für den Schneidbereich mit 0,6 mm noch im Schaftbereich mit 2,0 mm Durchmesser die Gefahr des elastischen Knickens nach Euler [GROS09]. Abbildung 7.5 (a) zeigt die Lagerbedingungen nach Belastungsart IV als Berechnungsgrundlage für den Schaftbereich des Stempels und Abbildung 7.5 (b) die Bedingungen nach Belastungsart III für den abgesetzten Stempeldurchmesser. Die Berechnungsgrundlagen sowie die Ergebnisse für die Sicherheit gegenüber elastischem Knicken für die beiden Fälle können dem Anhang entnommen werden (Kapitel 12.1).

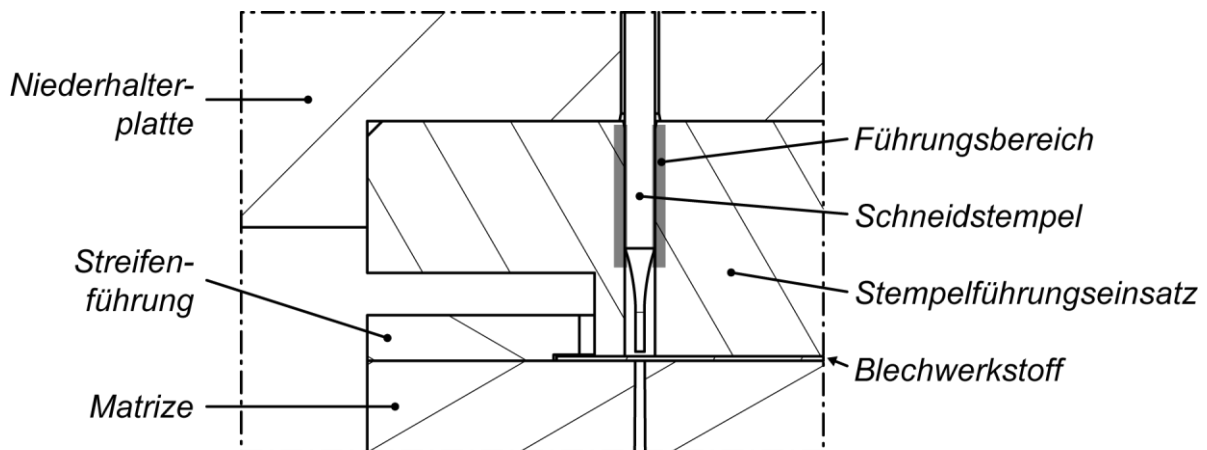


Abbildung 7.4: Detailansicht der Stempelführung, Werkzeug 0,89 mm über UT

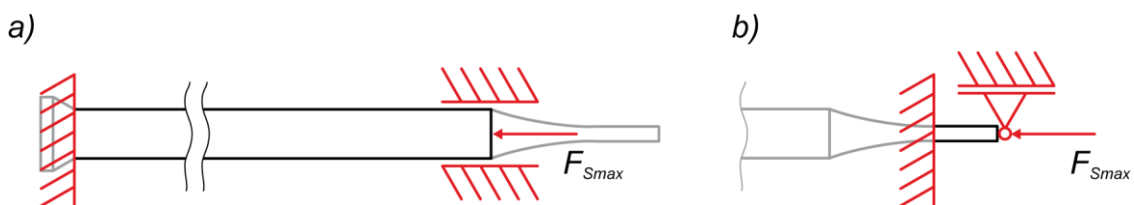


Abbildung 7.5: Lagerbedingungen für Knickfälle IV (a) und III (b) nach Euler

Die Matrizendurchbrüche für die neun gleichzeitig stattfindenden Schneidoperationen sind in einen Block aus Hartmetall eingebracht, um die Positionierung zueinander und zum Lochbild im Führungseinsatz mit geringsten Abweichungen sicherzustellen. Der Hartmetallblock für die Matrizendurchbrüche ist mit den Abmessungen 56 mm x 33 mm als Einsatz in eine gehärtete Stahlplatte mit den Abmessungen 80 mm x 120 mm eingepresst, worüber die Befestigung an der Grundplatte, die Anbindung der Streifenführung im Werkzeug und die Positionierung zum Führungseinsatz realisiert wird. Ein Konzept mit diversen Passstiften stellt die relative Lage der einzelnen Werkzeugkomponenten zueinander, insbesondere die exakte Ausrichtung des Führungseinsatzes zur Schneidmatrize sicher.

7.2.3 Varianten der Kopf- und Grundplatten

Kopf- und Grundplatten des Versuchswerkzeuges wurden jeweils in vier Werkstoffvarianten gefertigt, wobei gegenüber den metallischen Werkstoffen eine konzeptionelle Anpassung bei der Kopfplatte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff notwendig

war. Bei der Auslegung von Bauteilen aus faserverstärkten Werkstoffen muss der Art der Lasteinleitung häufig eine besondere Bedeutung zugemessen werden [VDI2014-2]. Verbreitet sind Klebeverbindungen sowie der Einsatz von Schrauben, Bolzen oder Nietverfahren [STELL93]. Lokale Punkt- und Linienlasten auf den Verbundwerkstoff können sehr schnell zum Bruch einzelner Fasern führen [SCHÜ07], oder Belastungen quer zur Faserrichtung die Delamination einzelner Verbundschichten begünstigen [PUCK96]. Bei der Werkzeugplattenauslegung kann der Problematik durch eine großflächige Einbindung von metallischen Körpern in das Werkstoffgefüge begegnet werden. Für die Kopfplattenkonstruktion des Versuchswerkzeugs wurde eine einfacher umzusetzende Lösung aus einer Kombination einer CFK-Platte und einer Platte aus Aluminium gewählt. Die Lasteinleitung durch die Federn und Rückhubdistanzeinheiten, an denen innerhalb eines Pressenhubes auch Relativbewegungen stattfinden können, liegen dabei im Bereich der Aluminiumkomponente. Die Faserverbundwerkstoffplatte liegt direkt im Kraftfluss zwischen den Stempeldruckplatten und dem Pressenstößel, so dass die Werkstoffeigenschaften des Verbundwerkstoffes auf den Schneidprozess untersucht werden können. Die beiden Kopfplattenausführungen in Massivbauweise und in geteilter Bauart werden zur Verdeutlichung der Position der Trennebene zwischen CFK- und Aluminiumplatte in Abbildung 7.6 im Schnittbild gegenübergestellt.

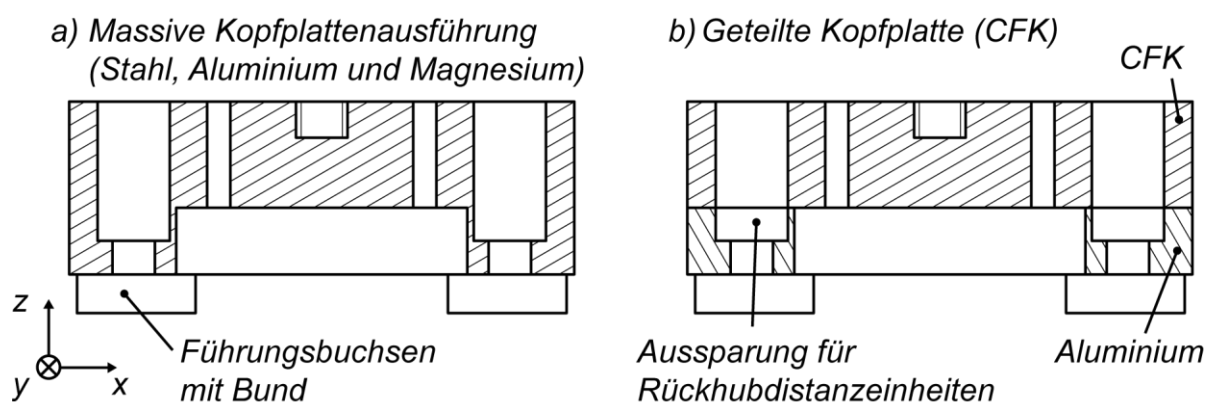


Abbildung 7.6: Kopfplattenausführung massiv (a) und geteilt (b)

Die im Werkzeug eingesetzten Normalien wie Führungssäulen und -buchsen, Kugelkäfige, Schraubenfedern und Schneidstempel wurden von der Firma

FIBRO GmbH, Weinsberg, bezogen. Lediglich die Führungsbuchsen für die Werkzeugplatten aus faserverstärktem Kunststoff samt dieser Plattenvariante werden von der Agathon AG, Solothurn, Schweiz, eingesetzt. In Abbildung 7.7 ist das Versuchswerkzeug in der Ausführung mit Platten aus CFK sowie Kopf- und Grundplatte in der metallischen Ausführung aus Aluminium abgebildet.

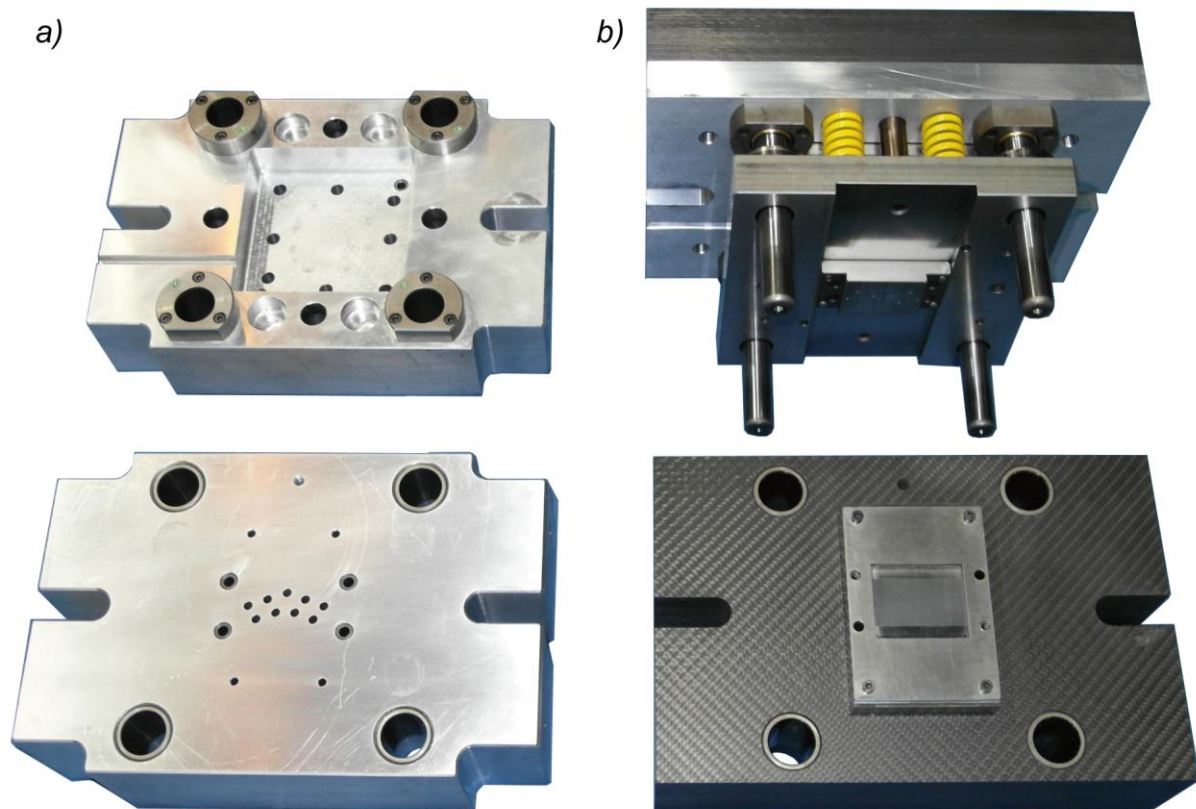


Abbildung 7.7: Versuchswerkzeug mit Platten in Ausführung aus metallischem Werkstoff (a) und aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (b)

7.3 Messtechnik im Versuchswerkzeug

In das Versuchswerkzeug wurden mehrere Sensoren integriert. Zur Aufzeichnung der auftretenden Effekte während des Schneidvorganges sowie zur Ermittlung von unterschiedlichem Verhalten beim Einsatz der vier Plattenwerkstoffe bei unterschiedlichen Verschleißzuständen wurden Weg-, Kraft- und Beschleunigungssensoren benutzt. Neben der nachfolgenden Beschreibung der einzelnen Sensortypen findet

sich im Anhang (Kapitel 12.3) eine Zusammenfassung der eingesetzten Sensorik mit ausgewählten Kennwerten und Abmessungen.

7.3.1 Kraftmessung

Die Messung der Schneid- und Rückzugkräfte erfolgt in den Vorversuchen mit einem Kraftsensor (Kistler, Typ 4576A5) mit einer Nennkraft von 5 kN, der zentral im Kraftauptschluss positioniert ist. Der mit Dehnungsmessstreifen ausgestattete Sensor ist zwischen zwei gehärteten Druckplatten über den Stempelköpfen und unter der Werkzeugkopfplatte positioniert (Abbildung 7.8 (a)). Vorteile sind die hohe Auflösung und ein Ausgangssignal, das mit einem vom Hersteller vorgegebenem Proportionalitätsfaktor ohne weitere Kalibrierung ausgewertet werden kann. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Lötstellen zwischen DMS-Anbindung, Abstimmwiderständen und Sensorkabel bei Stoßbelastung, wie sie beim Werkzeugbetrieb mit hohen Hubfrequenzen auftreten, wurde für die Verschleißuntersuchungen eine Quarz-Messunterlagsscheibe (Kistler, Typ 9021) eingesetzt. Zur Erfassung von Zug- und Druckkräften wird die Messscheibe, wie in Abbildung 7.8 (b) dargestellt, mit Hilfe einer Hülse und einer Auflagescheibe vorgespannt, so dass der Einbauraum sowie die Anbindung an die beiden Druckplatten im Werkzeug identisch mit denen der DMS-Kraftmessdose sind. Eine Kalibrierung des Sensoraufbaus erfolgte mit Hilfe der Universal Zug-Druck-Prüfmaschine in beiden Belastungsrichtungen. In der weiteren Signalverarbeitung beim Einsatz des Piezo-Sensors wird die vom Kristall abgegebene Ladung von einem Ladungsverstärker (Kistler, Typ 5011) in ein Spannungssignal umgewandelt.

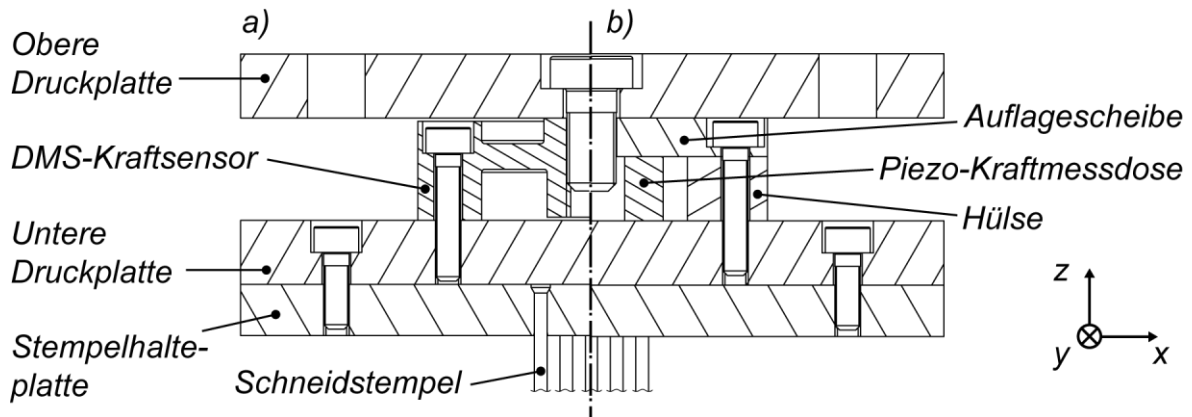


Abbildung 7.8: Integration der Kraftsensoren in DMS- (a) und Piezo-Bauart (b)

7.3.2 Beschleunigungsmessung

Für Beschleunigungsmessungen im Werkzeug kamen zwei unterschiedliche Sensortypen mit einem Messbereich bis 50 g (Kistler, Typ 8772A50) und bis 500 g (Kistler, Typ 8702B500) zum Einsatz. In beiden Sensorvarianten werden die Signale über Schubkeramik-Messelemente erzeugt und durch eine im Sensor integrierte Auswerteelektronik in ein Spannungssignal umgewandelt. Die Bereitstellung der Versorgungsspannung sowie die Signalaufbereitung erfolgt durch einen Kuppler (Kistler, Typ 5134) mit insgesamt vier Kanälen. In den Vorversuchen wurden die Beschleunigungssensoren an unterschiedlichen Positionen im Werkzeug eingesetzt, um die durch Stoßbelastung angeregten Schwingungen zu messen. Bei den Verschleißuntersuchungen befanden sich zwei Sensoren vom Typ 8772A50 in der Nähe der Stempelköpfe und ein Sensor des Typs 8702B500 in einer Einsenkung an der Oberseite der Kopfplatte. Die Montage der Sensoren erfolgte nach Empfehlung des Herstellers mit Klebewachs. Eine Absicherung für den Fall des Lösens der Verbindung wurde mit Klebeband realisiert. In Abbildung 7.9 sind die Sensorpositionen während der Dauerhubversuche in einem Ausschnitt der Werkzeugschnittzeichnung dargestellt.

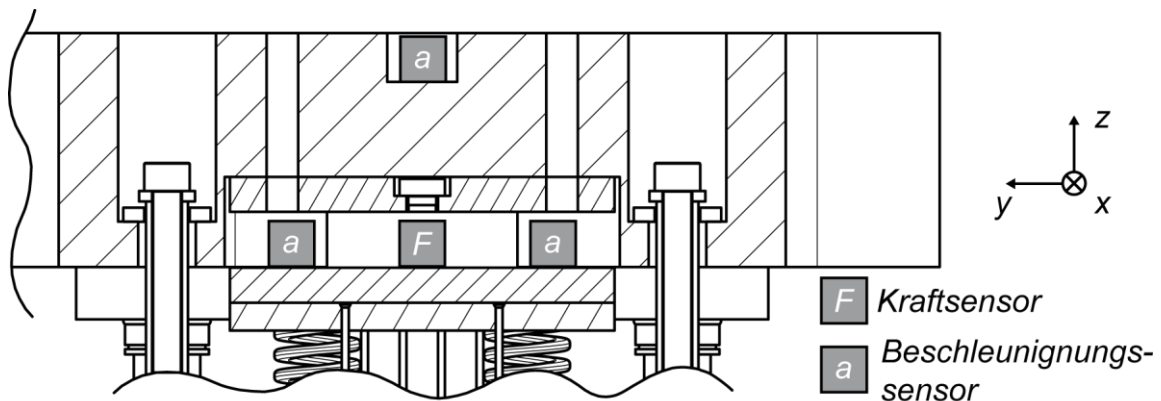


Abbildung 7.9: Positionen der Sensoren im Werkzeugoberteil

7.3.3 Wegmessung

Für die Aufzeichnung von Abstandsänderungen zwischen Pressentisch und –stößel wurde in den Versuchen ein berührungslos messender Wirbelstromsensor (Micro-Epsilon, NCDT3010 U3) eingesetzt. Mit einem Messbereich von 3 mm kann der Bereich um den unteren Umkehrpunkt der Presse mit hoher Auflösung bestimmt werden. Für die Messdatenauswertung ist die Zuordnung des unteren Umkehrpunktes notwendig, um die weiteren zeitsynchron erfassten Signale in Relation zum Hubverlauf betrachten zu können.

Innerhalb des Werkzeugs wurden Abstandsänderungen mit einem Sensor (Baumer, IWFM 18), dessen Messbereich 2 mm beträgt, erfasst. Die flache Bauart dieses Wirbelstromsensors erlaubt eine Montage auf der feststehenden Grundplatte mit Messung des Abstandes zur Führungsplatte sowie die Montage auf der bewegten Führungsplatte zur Abstandsmessung hin zur Stempelhalterplatte und zur Kopfplatte. Der Bewegungsverlauf der Niederhalterplatte nach dem Aufsetzen auf den Blechwerkstoff sowie die Schwingbewegungen zwischen Niederhalter- und Stempelhalterplatte konnten so gemessen werden.

7.3.4 Datenerfassung und Auswertung

Zur Datenerfassung wurde ein modulares System, aufbauend auf einem Chassis CompactDAQ-9172 des Unternehmens National Instruments, Texas, USA, für bis zu acht Einschübe über eine USB-Schnittstelle mit einem Messrechner verbunden. Ein

Analogeingangs-Modul für Brückenschaltungen NI 9237 dient zur Anbindung der mit Dehnungsmessstreifen ausgestatteten Kraftmessdose. Das Modul ist mit 4 Kanälen ausgestattet und erfasst Daten im Messbereich von ± 25 mV/V mit Abtastraten von 50 kHz und einer Auflösung von 24 bit. Zur Erfassung der Spannungssignale von Weg- und Beschleunigungssensoren sowie vom Ladungsverstärker der Piezo-Kraftmessdose im Messbereich von ± 10 V werden zwei Einschubmodule vom Typ NI 9215 mit jeweils 4 Kanälen verwendet. Hiermit sind Abtastraten von 100 kHz bei einer Auflösung von 16 bit möglich.

8 Versuchsbeschreibung

8.1 Prozessparameter für die Schneidversuche

Im entwickelten Versuchswerkzeug wurden für die Untersuchungen zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen definierte Prozessparameter eingestellt.

8.1.1 Stempeldurchmesser

Um dem industriellen Anwendungsfall beim Schneiden von Bauteilen für die Elektronikindustrie mit hohen Hubfrequenzen möglichst nahe zu kommen, wurde als zu verarbeitendes Bandmaterial ein höherfester Kupferblechwerkstoff (vgl. Kapitel 5.3) in einer Streifenbreite von 55 mm und einer Blechdicke von 0,29 mm verarbeitet. Der Stempeldurchmesser für die Schneidversuche mit dem gegebenen Blechwerkstoff wurde mit 0,60 mm festgelegt. Mit diesem Durchmesser werden Empfehlungen aus der Industrie für eine prozesssichere Fertigung bei den gegebenen Randbedingungen unterschritten, um den Effekt durch Variation der Werkzeugplattenwerkstoffe auf den Werkzeugverschleiß in den Untersuchungen zu verstärken.

8.1.2 Matrizengeometrie und Schneidspalt

Bei den gewählten Abmessungen der Schneidstempel von 0,60 mm Durchmesser im Schneidkantenbereich müssen sinnvolle Abmessungen für die Durchbrüche in der Matrize zur Realisierung eines Schneidspaltes gewählt werden. Mit Empfehlungen von Werkzeugbauern wurde hierfür ein Durchmesser von 0,625 mm festgelegt. Der Durchmesserunterschied von Stempel und Matrize führt zu einem absoluten Schneidspalt von 12,5 µm entlang der gesamten Schneidkante und damit zu einem relativen Spalt von 4,3 % der zu verarbeitenden Blechdicke von 0,29 mm. Der gewählte Parameter liegt auch im Bereich der Empfehlung des Deutschen Kupferinstituts, das für die Verarbeitung von Bandmaterial aus Kupfer und Kupferlegierungen einen relativen Spalt von 5 % der Blechdicke empfiehlt [DKI05b].

Die Durchbrüche in der Schneidmatrize sind konisch ausgeführt und weiten sich von der Schneidkante ausgehend mit einem Freiwinkel von 15 Winkelminuten auf, um ein Hochkommen der Butzen zu erschweren. Diese Ausführungsform entspricht der Richtlinie [VDI3368] sowohl in den Empfehlungen für den Schneidspalt, als auch in denen für den Freiwinkel der Schneidplattendurchbrüche. Eine weitere Maßnahme gegen das Hochkommen der ausgeschnittenen Schnittteile war der Einsatz der in Kapitel 4.4 beschriebenen Absaugvorrichtung, mit der während der Versuche ein Unterdruck unterhalb der Schneidmatrize erzeugt wurde und so die Butzen abgesaugt und gesammelt wurden.

8.1.3 Festlegung der Stempeleintauchtiefe und der Werkzeugschließhöhe

Bei maximalem Abstand zwischen Kopf- und Niederhalterplatte wurde die vertikale Position der Stempelstirnfläche im Werkzeug mit einem Abstand von 0,3 mm über der Kontaktfläche zwischen Stempelführungseinsatz und Blechwerkstoff festgelegt (vgl. Abbildung 7.4). Innerhalb eines Pressenhubes werden nach dem Kontakt zwischen Führungseinsatz und Blechwerkstoff erst die Federn im Werkzeug weiter vorgespannt, bis die Stempelstirnflächen auf den Blechwerkstoff auftreffen und der Schneidvorgang beginnt. Die Werkzeugschließhöhe der Schnellläuferpresse wurde so festgelegt, dass nach dem vollständigen Durchdringen des Blechwerkstoffes durch die Schneidstempel weitere 0,3 mm in den Blechwerkstoff eingetaucht wird, um die ausgeschnittenen Butzen im Matrizenkanal um diese Länge weiterzuschieben. Als Werkzeugschließhöhe ergibt sich somit ein Wert von 251,0 mm.

8.1.4 Niederhalterkraft

Bei der Werkzeuginbetriebnahme wurde über Wegmessungen zwischen Niederhalter- und Stempelhalterplatte das Verhalten der Führungsplatte während eines Pressenhubes insbesondere nach dem Aufsetzen auf den Blechwerkstoff bei verschiedenen Hubfrequenzen untersucht. Bei geringer Niederhalterkraft war ein mehrmaliges Zurückfedern nach dem Aufsetzen feststellbar, so dass eine ideale Stempelführung nicht gegeben war. Aus diesem Grund wurde die Kraft durch einen Austausch der Federelemente gegen solche mit höherer Steifigkeit soweit erhöht, bis

dieser Effekt nicht mehr messbar war. Eine unnötige Überhöhung der Niederhalterkräfte wurde vermieden, um zum einen die Presskräfte gering zu halten und um die Größe der Stoßanregung durch das Aufsetzen des Niederhalters zu begrenzen.

Die resultierende Niederhalterkraft aus den vier Federelementen zum Zeitpunkt des Kontaktes zwischen Stempel und Blechwerkstoff beträgt nach der Anpassung 5,1 kN und steigt bis zum unteren Umkehrpunkt der Presse auf 5,4 kN an. Über die untenliegende Kontaktebene des Stempelführungseinsatzes zum Blechwerkstoff mit einer Fläche von 50 x 40 mm² und Durchbrüchen von 2,0 mm Durchmesser für die neun Schneidstempel überträgt sich die Niederhalterkraft mit einer Flächenpressung von ca. 2,6 N/mm² auf die Matrize und weiterhin in die Grundplatte des Versuchswerkzeuges. Eine Skizze der Kontaktfläche des Stempelführungseinsatzes mit dem Blechstreifen verdeutlicht die geometrischen Verhältnisse in Abbildung 8.1.

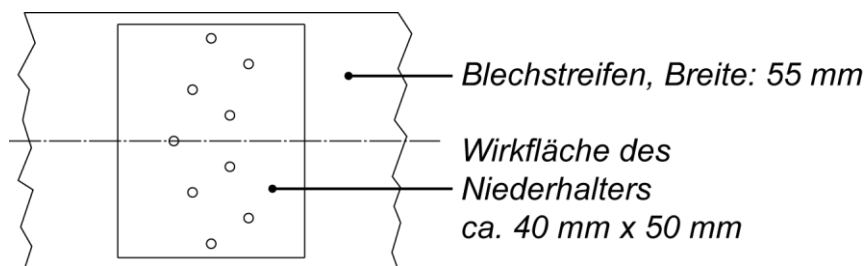


Abbildung 8.1: Wirkfläche der Niederhalterkraft auf dem Blechstreifen

8.1.5 Plattenmassen

In Tabelle 8.1 sind die Massen der Kopfplatten und der Werkzeuggrundplatten für die realisierte Plattengeometrie in den Werkstoffvarianten Stahl, Aluminium, Magnesium und CFK bzw. CFK-Aluminium aufgeführt. Trotz geringerer Dichte der CFK-Platten sind nur geringe Massenunterschiede zu den Plattenvarianten aus Magnesiumwerkstoff feststellbar. Gründe hierfür sind die bereits erläuterte geteilte Ausführung der Kopfplatte aus CFK und Aluminium sowie der Entfall von nicht benötigten Nuten zur Werkzeuggestaltung in den CFK-Ausführungen der Platten.

<i>Plattenwerkstoff</i>	<i>Kopfplattenmasse</i>	<i>Grundplattenmasse</i>
<i>Stahl</i>	<i>22,8 kg</i>	<i>35,7 kg</i>
<i>Aluminium</i>	<i>8,8 kg</i>	<i>13,1 kg</i>
<i>Magnesium</i>	<i>5,9 kg</i>	<i>8,5 kg</i>
<i>CFK-Aluminium / CFK</i>	<i>6,8 kg</i>	<i>8,0 kg</i>

Tabelle 8.1: Massen der Kopf- und Grundplatten in vier Werkstoffvarianten

8.1.6 Geschwindigkeitsverlauf der Werkzeugbewegung

Die Schneidversuche wurden mit der in Kapitel 4.1 beschriebenen Schnellläuferpresse mit einer eingestellten Hubhöhe von 13 mm durchgeführt. In Abbildung 8.2 ist der Geschwindigkeitsverlauf der Exzenterpresse im Bereich des unteren Umkehrpunktes für eine Hubfrequenz von 1000 Hüben pro Minute über dem Abstand zum tiefsten Punkt im Zyklus und über eine Hilfsskala unter dem Kurbelwinkel der Presse aufgetragen.

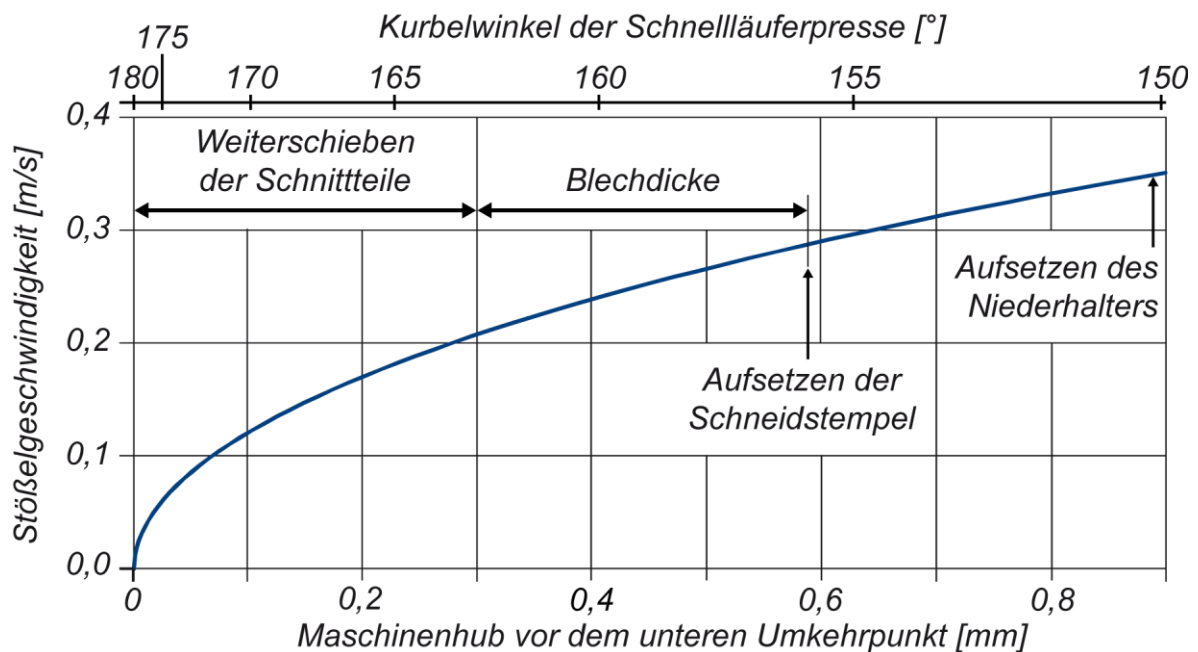


Abbildung 8.2: Stößelgeschwindigkeit im Bereich des unteren Umkehrpunktes bei 1000 Hüben pro Minute

Zum Zeitpunkt des Aufsetzens der Stempelstirnflächen auf den Blechwerkstoff in einem Abstand von 0,59 mm vor dem unteren Umkehrpunkt bewegen sich Stößel und Schneidstempel bei dieser Hubfrequenz mit einer Geschwindigkeit von 0,286 m/s. Bis zum vollständigen Durchdringen des Blechwerkstoffes der Dicke 0,29 mm sinkt diese Geschwindigkeit aufgrund der Exzenterkinematik der Presse auf einen Wert von 0,208 m/s ab.

8.1.7 Schnittteilgeometrie

Mit den eingestellten Prozessparametern zeigt das Versuchswerkzeug bis zur maximalen Hubfrequenz der eingesetzten Schnellläuferpresse von 1425 Hüben pro Minute ein prozessstabiles Verhalten. Zur Veranschaulichung der Bauteilgeometrie, die mit dem beschriebenen Versuchswerkzeug erzeugt wird, sind in Abbildung 8.3 eine Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop und Fotografien von ausgeschnittenen Butzen dargestellt.

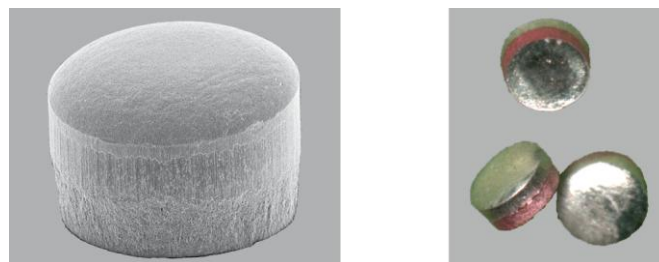


Abbildung 8.3: REM-Aufnahme und Fotografien von Butzen mit $\varnothing 0,6$ mm

8.2 Durchführung der Schneidversuche

Mit dem Versuchswerkzeug wurden zur Untersuchung des Schwingungs- und Dämpfungsverhaltens mit unterschiedlichen Plattenwerkstoffen Schneidversuche durchgeführt. Sowohl bei den Vorversuchen als auch den Dauerhubversuchen wurde das Werkzeug auf einer Schnellläuferpresse mit einer Nennpresskraft von 250 kN betrieben. Bei einer Prozesskraft aufgrund der gleichzeitig stattfindenden Schneidvorgänge der neun Schneidstempel von weniger als 1500 N liegen mit der geringen Pressenbelastung ideale Randbedingungen bezüglich der Pressenverformung vor. Aufgrund der für den Schneidvorgang starken Überdimensionierung der Werkzeug-

maschine ist der Presseneinfluss auf die Versuchsergebnisse als gering anzunehmen. Des Weiteren wurde das System Schnellläuferpresse während der Schneidversuche nicht verändert, so dass mögliche pressenspezifische Effekte bei allen Versuchen identisch eingingen.

Bei den Vorversuchen zur messtechnischen Auswertung des Einflusses unterschiedlicher Plattenwerkstoffe wurden jeweils neun Schneidstempel aus Schnellarbeitsstahl eingesetzt, um die Gefahr der Werkzeugbeschädigung beim Bruch von Hartmetallstempeln mit geringer Biegebruchfestigkeit zu verhindern. Zur Verschleißermittlung wurde für jede Versuchsreihe mit den vier Plattenwerkstoffen ein separater Stempelsatz, bestehend aus jeweils drei Stempeln aus konventionell hergestellten Schnellarbeitsstahl (HSS), PM-Stahl und Hartmetall (HM) eingesetzt. In positiver y-Richtung des Werkzeuges wurden die einzelnen Stempelgüten in folgender Reihenfolge im Versuchswerkzeug positioniert:

HSS – PM-Stahl – HM – HSS – PM-Stahl – HM – PM-Stahl – HSS – HM

Damit mögliche schleichende Veränderungen im Versuchswerkzeug nicht zu Fehlinterpretationen von Ergebnissen einzelner Plattenwerkstoffe führen, wurden bei den Dauerversuchen die Plattenwerkstoffe jeweils zum Zeitpunkt der Stempelvermessung variiert. Lediglich die Schneidversuche mit Werkzeugplatten aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen wurden aufgrund der späteren Beschaffung im Anschluss an die vorhergegangenen Versuche durchgeführt.

Mit Temperaturmessungen zwischen den Untersuchungsintervallen während der Dauerhubversuche konnte keine Erwärmung von Matrize oder Stempelführungseinatz nachgewiesen werden. Die durch den Schneidprozess eingebrachte Energie ist klein im Vergleich zur zu- und abgeführten Masse des Bandmaterials mit hoher Wärmekapazität, so dass die Temperatur im Werkzeug stabil bleibt.

8.3 Auswertung der Prozess-Messergebnisse

Die Signale der in Kapitel 7.3 beschriebenen im Versuchswerkzeug eingesetzten Sensoren wurden mit der grafischen Programmierumgebung LabVIEW (National

Instruments) in der Programmversion 8.6 geordnet erfasst und während der Messung visualisiert. Über das Prinzip der Verschaltung von einzelnen Systemblöcken wurde ein Programm zur Datenakquise, -speicherung und -visualisierung der Signale von Weg-, Kraft- und Beschleunigungsmessgrößen erstellt. Als Abtastfrequenz für die Datenverarbeitung wurde ein konstanter Wert von 50 kHz festgelegt. Mit Hilfe von Schalt- und Eingabefeldern können im Programm direkt auf Benutzerebene Sensoren für die jeweilige Messung aktiviert sowie Parameter zur geordneten Datenspeicherung eingetragen werden. Zur weiteren Auswertung und Visualisierung der Messergebnisse sowie zum Vergleich verschiedener Versuchsreihen wurde das Programmpaket DIAdem (National Instruments) in der Version 11.1 eingesetzt.

8.4 Auswertung des Stempelverschleißes

Zur Vermessung der Veränderung der Schneidkantengeometrie während der Dauerhubversuche kam das Tastschnittverfahren zum Einsatz. In Abbildung 8.4 ist der Messaufbau zur taktilen Abtastung grafisch dargestellt. Die reproduzierbare Positionierung und Fixierung der Schneidstempel erfolgte jeweils über zwei zueinander senkrecht stehenden V-Nuten in einem um 45° gekippten Sinus-Schraubstock. Zur Erhöhung der Aussagekraft der Messergebnisse wurden vier Messpositionen je Schneidstempel in einem Winkelabstand von jeweils 90° nach verdrehen der Stempel in der Aufspannvorrichtung vermessen.

Eine weitere Dokumentation der Verschleißzustände zwischen den Untersuchungsintervallen erfolgte mittels digitaler Bilderfassung und exemplarisch für den Plattenwerkstoff mit den höchsten Verschleißkennwerten an jeweils einem Stempel je Stempelwerkstoff im Rasterelektronenmikroskop. Aufgrund des eingeschränkten Probenraums musste hierfür der verschleißbehaftete Bereich um die Schneidkante abgetrennt werden. Diese Untersuchungen konnten daher nur zum Ende der Verschleißuntersuchungen durchgeführt werden.

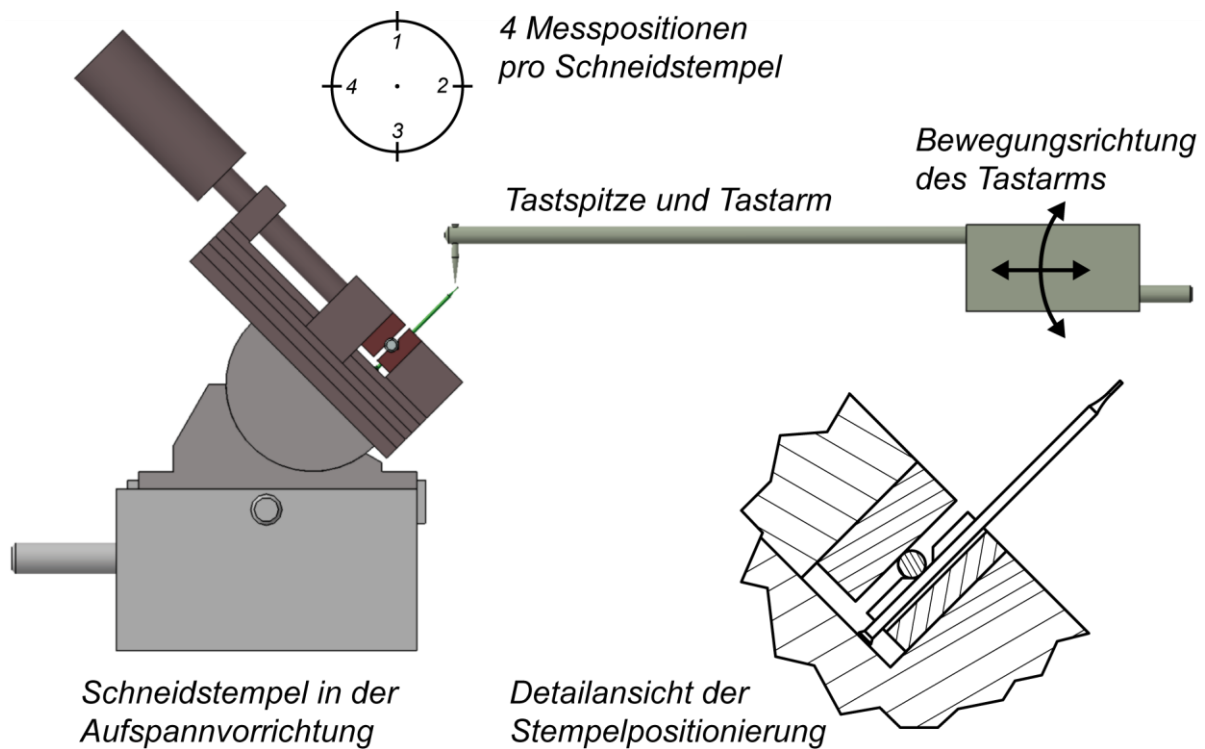


Abbildung 8.4: Aufbau zur Vermessung der Schneidkantenengeometrie der Stempel

8.5 Finite Elemente Simulationsprogramm

Zur Ermittlung relevanter Eigenformen des Versuchswerkzeuges wurden mehrere Simulationen durchgeführt. Dazu wurde das Programmpaket „Generative Structural Analysis“ der CAD-Software CATIA, Dassault Systèmes, Frankreich in der Version V5 R19, eingesetzt. Sowohl für einzelne Bauteile als auch für Baugruppen können damit Modalanalysen durchgeführt werden. Bei der Unterteilung der Volumenkörper in finite Elemente wurden für die Untersuchungen parabolische Tetraeder-Elemente gewählt. Zwischen den vier Eckknoten befindet sich jeweils ein zusätzlicher Knoten, so dass die Spannung innerhalb eines Elementes linear ansteigen und der Tetraeder somit parabolische Verformungszustände annehmen kann [KOEH10]. Obwohl hiermit die Struktur der Bauteile tendenziell steifer als in der Realität abgebildet wird, stehen bei der eingesetzten Software keine höherwertigen Volumenelemente zur Vernetzung der Bauteile zur Verfügung. Die Genauigkeit bei der Ermittlung der Eigenformen im Rahmen der Untersuchungen wird hiervon jedoch nicht beeinflusst, während eine zu hohe Steifigkeit auch zu überhöhten Werten für die Eigenfrequen-

zen führt. Sämtliche ermittelten Eigenfrequenzen werden zusätzlich mittels messtechnischen Untersuchungen abgesichert.

9 Versuchsergebnisse

9.1 Schwingungsformen der Werkzeugplatten

Im Versuchswerkzeug wurde als Hauptmerkmal der Einfluss von Werkzeugplatten aus unterschiedlichen Werkstoffen untersucht. In Versuchen wird daher vorerst losgelöst vom Schneidprozess, das Verhalten dieser Platten bei Stoßbelastung ermittelt.

9.1.1 Schlagartige Belastung durch die Schnellläuferpresse

In einem ersten Aufbau wurden die Werkstoffvarianten der Grundplatten in den Abmessungen 196 mm x 296 mm x 92 mm stoßartig belastet. Die Platten wurden dazu über die vorhandenen Nuten mit dem Pressentisch verschraubt. Zur Impulsanregung wurde eine gehärtete Stahlkugel in einer Hülse gehalten und mit einem Elastomer vorgespannt. Ein Teil der Kugeloberfläche ragt aus der Hülse hervor und kann so gegen die Federkraft der Elastomer-Feder verschoben werden. Durch die Montage der Hülse am Pressenstößel ließen sich damit Impulsanregungen der Werkzeugplatten mit verschiedenen Pressenhubfrequenzen durchführen. Mit einem berührungslosen Wirbelstromsensor wurde der Stößelweg im Bereich des unteren Umkehrpunktes gemessen, so dass eine Nachregelung der Stößeintauchtiefe erfolgen konnte. Als Kontaktpartner für die auftreffende Stahlkugel wurde die gehärtete Matrize des Werkzeuges auf die Grundplatten montiert. Der beschriebene Versuchsaufbau wird in Abbildung 9.1 veranschaulicht.

Aufgrund der angenähert sinusförmigen Stößelbewegung ist die Kontaktzeit zwischen Kugel und Matrize bzw. Grundplatte abhängig von der Pressenhubfrequenz. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Berührzeit ab. Durch Messungen mit einem Beschleunigungssensor an der Werkzeugplatte konnten in diesen Versuchen die allgemeinen Zusammenhänge zwischen Werkstoffsteifigkeit und der Eigenfrequenz bestätigt werden. Die Amplitude der angeregten Schwingungen fällt mit zunehmendem Elastizitätsmodul des Werkstoffs ab, während die gemessenen Frequenzen mit zunehmender Werkstoffsteifigkeit ansteigen. Eine zuverlässige Aussage zum Dämpfungsverhalten der eingesetzten Werkstoffe ist mit diesem

Versuchsaufbau nicht möglich, da die Amplituden der auftretenden Eigenschwingungen aufgrund der hohen Steifigkeit der mit dem Pressentisch verschraubten massiven Grundplatten auf niedrigem Niveau stark schwanken.

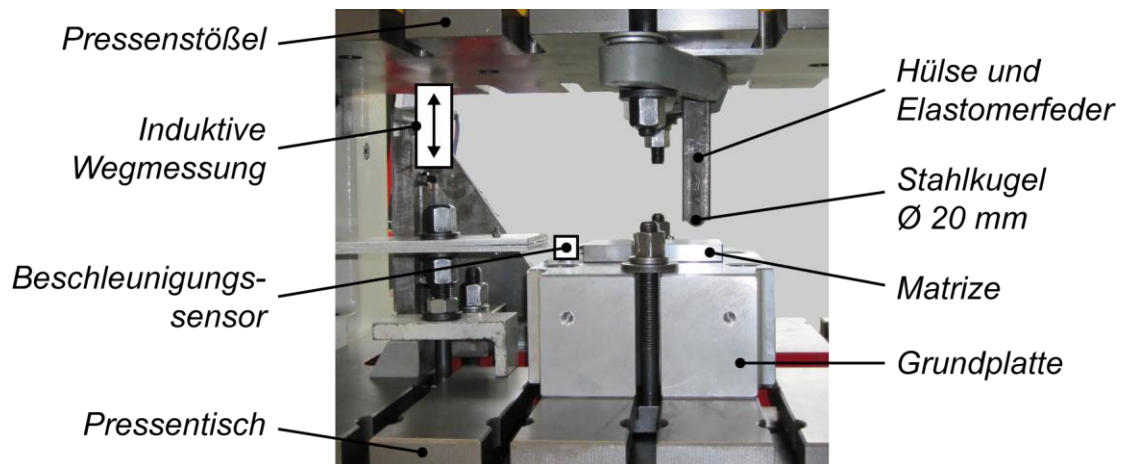


Abbildung 9.1: Versuchsaufbau zur Impulsanregung der Werkzeugplatten

9.1.2 Schwingungsanregung und Abgleich mit Simulationsergebnissen

Zur Ermittlung des Verhaltens der Plattenwerkstoffe, losgelöst von äußeren Einflüssen, wurden die vier Varianten der Grundplatten in weiteren Versuchen wie in Abbildung 9.2 (a) schematisch dargestellt, auf Elastomersträngen gelagert, um sie von Umgebungseinflüssen zu entkoppeln und ein freies Schwingen zu ermöglichen. Mit Hilfe eines Hammers mit abgerundeter Schlagfläche wurden die Platten an der der Lagerung gegenüberliegenden Seitenfläche der Platte manuell mit einem Schlag belastet. Durch die Impulsanregung wurden die Eigenfrequenzen der Platten angeregt, welche mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor (Kistler, Typ 8688A50) aufgezeichnet wurden. In Abbildung 9.2 (b) sind die Schwingungsamplituden aller angeregten Eigenfrequenzen in z-Richtung (Plattendicken-Richtung) für die vier Plattenwerkstoffe in einem Diagramm über der Zeit dargestellt. Es wird deutlich, dass die Eigenschwingungen der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatte am schnellsten abklingen, während die Stahlplatte am längsten schwingt. Zwischen diesen Werten liegen die Eigenschaften der Platten aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Die in Kapitel 2.8 behandelte Konstante δ zur Beschreibung

des Abklingverhaltens steigt demnach vom Stahlwerkstoff über Aluminium und Magnesium hin zum faserverstärkten Kunststoff an.

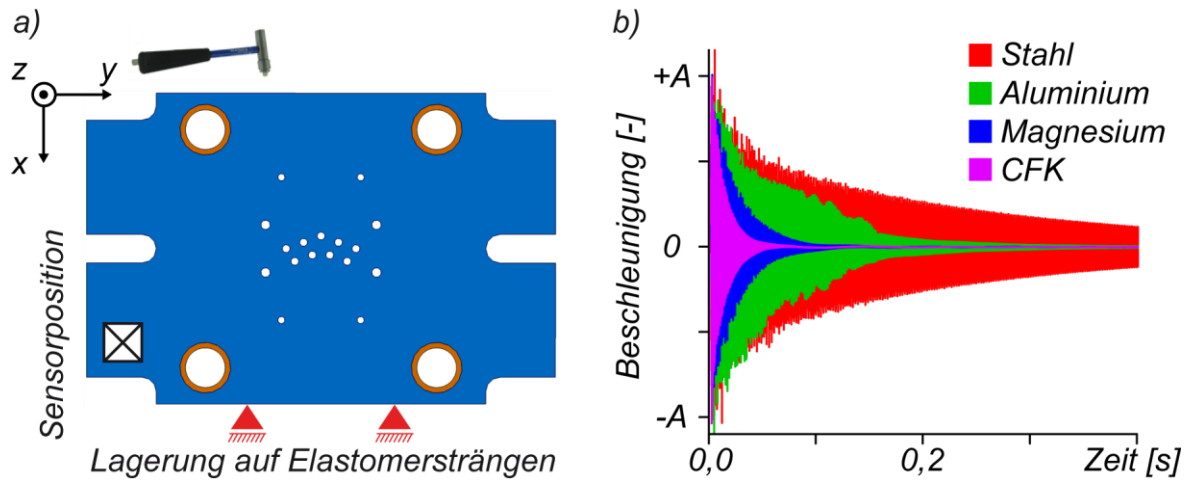


Abbildung 9.2: Impulsanregung der Werkzeuggrundplatten
a) Versuchsaufbau, b) Messergebnisse

Die Frequenzen der angeregten Schwingungen der ersten und zweiten Eigenform der vier Platten konnten mit dem beschriebenen Versuchsaufbau reproduzierbar ermittelt werden. Mit der gewählten Anregungsart war die dritte Eigenform dagegen nicht mehr für alle Plattenwerkstoffe eindeutig auswertbar. Abbildung 9.3 zeigt die ersten drei Eigenformen grafisch anhand von Simulationsergebnissen, die mit der CAD-Software CATIA V5 ermittelt wurden. Die hiermit ermittelten Eigenfrequenzen sind ebenfalls in Tabelle 9.1 aufgeführt. Während die Ergebnisse für die Stahlplatte äußerst gut übereinstimmen, zeigt die Simulation für die Aluminium- und Magnesiumlegierung leicht erhöhte Eigenfrequenzen an. Aufgrund der ungenügenden Kenntnisse der anisotropen Elastizitätskennwerte des eingesetzten Faserverbundwerkstoffes war eine Simulation der Eigenfrequenzen dieser Plattenvariante nicht möglich. Die messtechnisch ermittelten Eigenfrequenzen bei Impulsanregung liegen bei diesem Werkstoff deutlich unter den Werten der metallischen Werkstoffe.

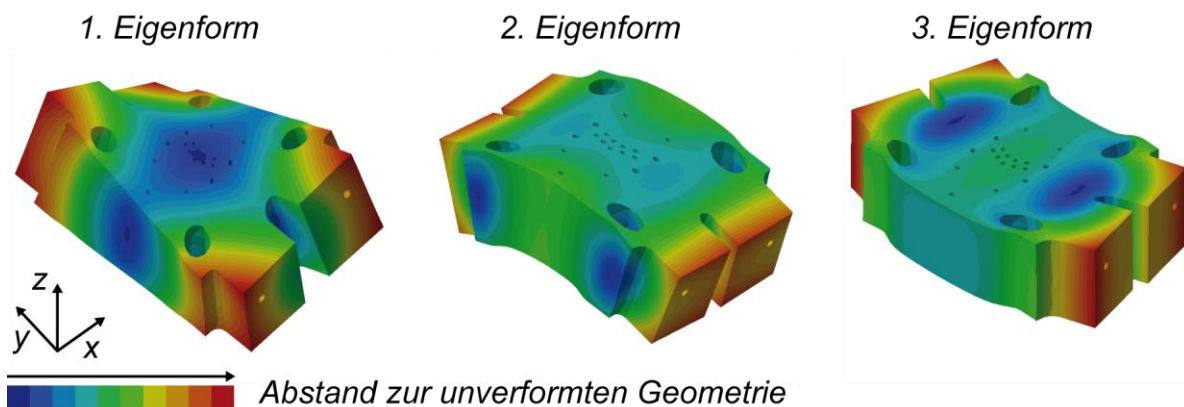


Abbildung 9.3: Eigenformen der Grundplatte mit isotropen Steifigkeitsverhalten

Plattenwerkstoff	1. Eigenform		2. Eigenform	
	Messung	Simulation	Messung	Simulation
Stahl	3788 Hz	3809 Hz	4223 Hz	4206 Hz
Aluminium	3555 Hz	3755 Hz	4111 Hz	4143 Hz
Magnesium	3483 Hz	3707 Hz	4047 Hz	4090 Hz
CFK	1790 Hz	-	3585 Hz	-

Tabelle 9.1: Eigenfrequenzen der Schwingungen der Grundplatten

9.2 Eigenschwingungen des Werkzeugoberteils

Zur Bestimmung der relevanten Eigenformen des Versuchswerkzeuges in Bezug auf Vertikalbewegungen der Schneidstempel wurde die Baugruppe im Kraftfluss zwischen Pressenstößel und zu schneidendem Blech in der Simulation betrachtet. Hierzu wurde ebenfalls das Programmpaket „Generative Structural Analysis“ der CAD-Software CATIA V5 eingesetzt. Die Bauteilgeometrie der betrachteten Komponenten wurde zur Optimierung des Simulationsablaufes durch das Entfernen von Gewinden und Durchgangslöchern bereinigt. In Abbildung 9.4 sind zwei Eigenformen aus den Simulationsergebnissen zur Beschreibung der Stempelschwingungen dargestellt. Von oben nach unten sind folgende Bauteile zu sehen, die in der Simulation berücksichtigt wurden:

- Kopfplatte (fixiert an der Oberseite)
- Obere Druckplatte
- DMS-Kraftsensor
- Untere Druckplatte
- Stempelhalteplatte
- 9 Schneidstempel (5 Stück dargestellt)
- Stempelführungseinsatz (fixiert an der Unterseite)

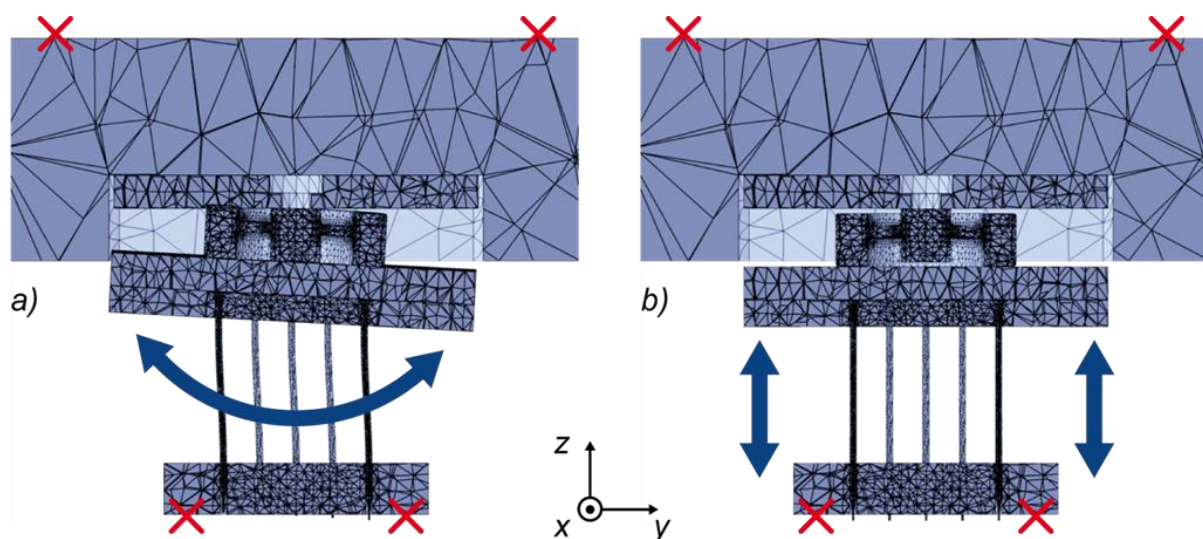


Abbildung 9.4: Kipp- (a) und Zug-Eigenform (b) der auftretenden Schwingungen

Mit Relevanz für die Stempelbewegungen in z-Richtung relativ zur Matrize gehen aus der Simulationen die beiden in Abbildung 9.4 dargestellten Eigenformen hervor. Auf der linken Seite der Abbildung ist eine der beiden Kipp-Eigenformen überzeichnet dargestellt. Eine weitere Kipp-Eigenform schwingt senkrecht zur dargestellten Richtung, wobei beide eine Frequenz um 300 Hz aufweisen. In Abbildung 9.4 (b) ist die Zug-Eigenform mit einer Frequenz von ca. 1,2 kHz zu sehen. Durch eine ebenfalls überzeichnete Darstellung ist hier ein teilweises Abheben der Kraftmessdose von den Druckplatten erkennbar. Eine weitere, hier nicht dargestellte Eigenform bewirkt eine Torsion der Komponenten um die z-Achse. Bei geringen Drehwinkeln und bei der Führung der Stempel im Führungseinsatz übt diese Eigenform aber keinen wesentlichen Einfluss auf den Schneidbereich der Stempel aus.

Die in der Simulation ermittelten Eigenformen lassen sich durch Auswertung von Kraft- und Beschleunigungssignalen bestätigen. Die Kipp-Eigenform kann mit zwei in der Nähe der Stempelköpfe, auf gegenüberliegenden Seiten der unteren Druckplatte montierten Beschleunigungssensoren während des Schneidprozesses nachgewiesen werden. Insbesondere aufgrund des Schnittschlages nach dem Durchbrechen des Blechwerkstoffes wird das System zum Schwingen in dieser Eigenform angeregt, was sich in gegenläufigen Amplituden der beiden Beschleunigungssignale zeigt. Die Kippbewegung der Stempelhalterplatte ist auch über eine Abstandsmessung zwischen dem Randbereich der Halteplatte und der Niederhalterplatte möglich. Abbildung 9.5 zeigt zum Nachweis der Kippschwingung exemplarische Messergebnisse der Beschleunigungssensoren (a) und der Bewegung der Stempelhalterplatte (b) in Relation zur Stößelbewegung. Nach dem Aufsetzen der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff kommt es in Abbildung 9.5 (b) aufgrund von Vorspannung des Systems zu Abweichungen zwischen Plattenabstand und Stößelwegverlauf. Nach dem Durchbrechen des Blechwerkstoffes ist eine deutliche Schwingbewegung in der Frequenz der Kipp-Eigenform von ca. 300 Hz erkennbar.

Auch die Eigenfrequenz der Zugeigenform kann messtechnisch nachgewiesen werden. Bei der schlagartigen Entlastung des vorgespannten Systems zum Zeitpunkt des Durchbrechens des Blechwerkstoffes wird diese Eigenform angeregt. Messtechnisch ist dies im Kraftsignal nachweisbar, das primär mit der Frequenz von ca. 1,2 kHz schwingt. Aufgrund der Kompensation der Biegeanteile durch eine geeignete Verschaltung der Dehnungsmessstreifen in der Kraftmessdose ist die Kipp-Eigenform im Kraftsignal deutlich geringer ausgeprägt, zum Teil aber noch als Überlagerung sichtbar (Abbildung 9.10).

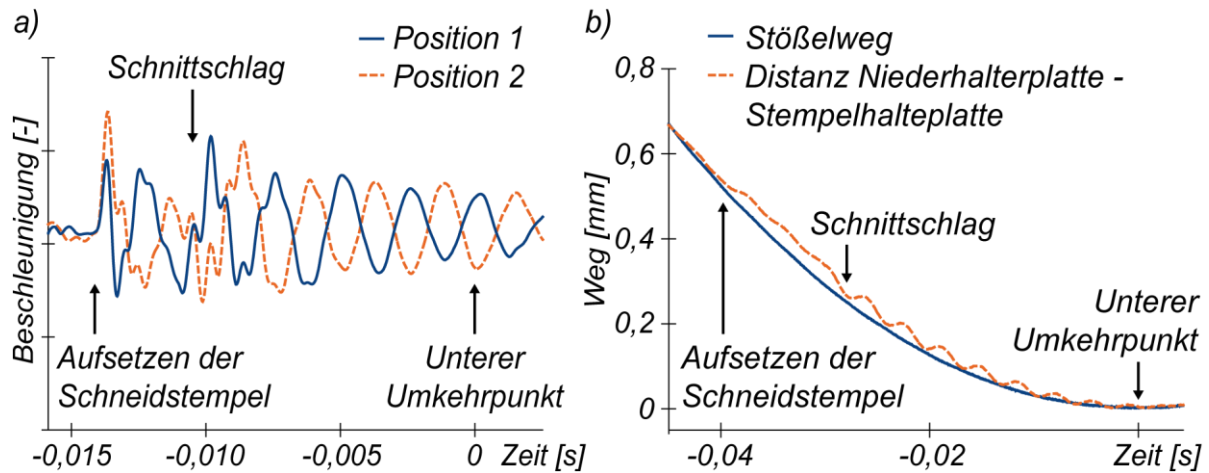


Abbildung 9.5: Messtechnischer Nachweis der Kipp-Eigenform

a) Beschleunigungen Stempelkopfbereich, 300 Hübe pro Minute

b) Bewegung der Stempelhalterplatte, 100 Hübe pro Minute

9.3 Presseneigenschaften

Die Schneidversuche wurden auf der in Kapitel 4.1 näher beschriebenen mechanischen Schnellläuferpresse BSTA 25BL der Firma Bruderer durchgeführt. Zur Bestimmung des Einflusses von Leichtbauwerkstoffen in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen auf das Schwingungs- und Dämpfungsverhalten müssen Effekte, die von außen auf das System Werkzeug einwirken ausgeschlossen bzw. die Einflussgrößen bekannt sein. Aus diesem Grund wird die Schnellläuferpresse, als direkter Kontaktpartner des Werkzeuges in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

9.3.1 Eintauchtiefenveränderung

Beim Betrieb von Pressen wird der Pressenstößel in vertikaler Richtung auf und ab bewegt. Aufgrund der wiederkehrenden Beschleunigungen und Verzögerungen des Pressenstößels sowie der kraftübertragenden Komponenten zwischen Stößel und Exzenterwelle wirken Trägheitskräfte auf die Massenkörper, denen die Kräfte von Ausgleichsgewichten mit gegenläufiger Bewegungsrichtung im Pressengesamtsystem entgegenwirken, so dass ein vibrationsarmes Laufverhalten sichergestellt ist. Betrachtet man lokal die Eintauchtiefe des Stößels, kommt es bei

der Stößelabbewegung ab dem Zeitpunkt der Abnahme der Bewegungsgeschwindigkeit im Kurbelwinkelbereich zwischen 90° und 180° zu Zugkräften in den Lagern und kraftübertragenden Bauteilen. Die gegenläufigen Kräfte aus dem Bauteilherstellungsprozess wirken üblicherweise nur im Bereich des unteren Umkehrpunktes. Abhängig von der Steifigkeit des Systems verändert sich aufgrund dieser Zugkräfte mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Pressenhubfrequenz sowie mit zunehmender Masse im Bereich des Pressenstößels die Lage des unteren Umkehrpunktes. In einigen Pressen wird die beschriebene Eintauchtiefenzunahme durch ein Regelsystem auf einen Einrichtwert korrigiert [HOFF88], [SCHU96b]. Die für die Schneidversuche zur Verfügung stehende Presse weist diese Funktionalität der dynamischen Eintauchtiefennachregelung während der Stößelbewegung nicht auf.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden Plattenwerkstoffe mit unterschiedlichen Kennwerten für die Dichte eingesetzt und somit die beschleunigte Masse am Pressenstößel variiert. Aus diesem Grund wurde das Pressenverhalten beim Einsatz des Werkzeugaufbaus mit geringster und höchster bewegter Masse betrachtet. Im Vergleich zur Kopfplatte in Verbundbauweise aus CFK und Aluminum weist die Magnesiumkopfplatte die geringere Masse auf. Das Werkzeug mit Stahlplatten wurde als Aufbau mit höchster Masse untersucht. Mit Hilfe eines berührungslos messenden Abstandssensors (Micro-Epsilon, NCDT3010 U3) wurde die Bewegung des Pressenstößels im Bereich des unteren Umkehrpunktes aufgezeichnet. Bei einer Erhöhung der Pressenhubfrequenz vom Startwert 100 auf den Maximalwert von 1425 Hüben pro Minute konnte über die Hubfrequenzen hinweg ein charakteristisches Verhalten der Presse aufgezeichnet werden. Abbildung 9.6 zeigt dieses Verhalten der relativen Verlagerung des unteren Umkehrpunktes für die beiden Versuchsreihen mit Stahl- und Magnesiumplatten. Bis zu einer Hubfrequenz von 300 Hüben pro Minute sind nur geringe Lageveränderungen feststellbar. Ab diesem Wert fallen die Kurven stark ab, bis sie ab einem Wert von 450 Hüben pro Minute wieder ein flacheres nahezu lineares Verhalten aufzeigen. Unstetigkeiten in Form von punktuell reduzierten Eintauchtiefen zeigen die Messkurven bei Hubfrequenzen von 990 und 1200 Hüben pro Minute.

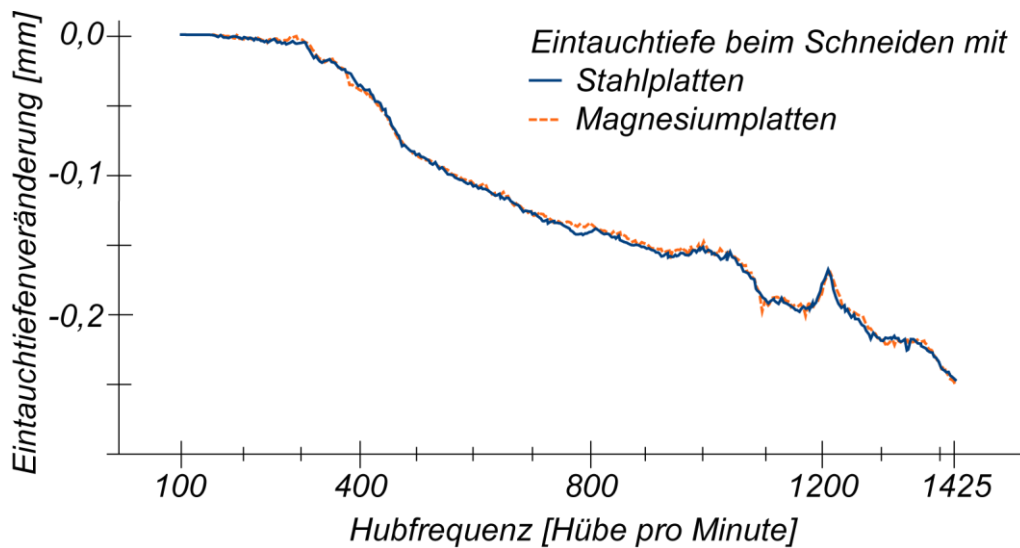


Abbildung 9.6: Eintauchtiefenveränderung der Schnellläuferpresse Bruderer BSTA25BL beim Schneiden mit unterschiedlichen Hubfrequenzen

Die in Abbildung 9.6 dargestellten Kurven wurden bei einer Hubfrequenzerhöhungsrates von 35,7 Hüben pro Sekunde aufgenommen. Dynamische Effekte aufgrund des Beschleunigungsvorganges konnten mit begleitenden Versuchsreihen mit einer reduzierten Beschleunigungsrate von 10 Hüben pro Sekunde und identischen Ergebnissen ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann auch das Verhalten bei den dargestellten Versuchsreihen mit Stahl- und Magnesiumplatten als identisch betrachtet werden.

Bei den gewählten Versuchsbedingungen beträgt die Massendifferenz der bewegten Werkzeugkomponenten im Aufbau mit Stahl- bzw. Magnesiumplatten ca. 17 kg, während aus Konstruktionszeichnungen des Pressenstößels eine Masse im bearbeiteten Zustand von ca. 150 kg zu entnehmen ist [BRUD10]. Bei einer bewegten Gesamtmasse des Werkzeugs mit Stahlplatten und Pressenstößel von ca. 186 kg beträgt die Massendifferenz beim Einsatz von Magnesiumplatten weniger als 10 %. Somit kann bei den Untersuchungen trotz Variation der bewegten Masse von gleichbleibenden Versuchsbedingungen in Bezug auf die Schnellläuferpresse ausgegangen werden.

9.3.2 Betrachtungen zum Nachlaufwinkel

In der industriellen Praxis werden häufig Sensoren zur Werkzeugüberwachung eingesetzt, die bei Störfällen einen Sofortstopp der Werkzeugmaschine initiieren und damit eine weitergehende Schädigung am Werkzeug verhindern sollen. Bei Exzenterpressen ist die Dauer dieses Anhaltevorganges abhängig von den Steuerzeiten der Pressensteuerung und vom Zustand von Bremse und Kupplung zum Abkuppeln vom Schwungrad und Abbremsen der Exzenterwelle. Diese Kennwerte lassen sich durch den Benutzer der Presse aber nicht direkt beeinflussen. Ein beeinflussbarer Parameter hingegen ist die Energie der beschleunigten Massen, die über die Hubfrequenz oder die Höhe der bewegten Masse des eingesetzten Werkzeuges variiert werden kann. Als messbare Größe für die Dauer des Anhaltevorganges kann der von der Pressensteuerung ausgegebene Nachlaufwinkel beim Maschinenstopp herangezogen werden.

Unter diesem Hintergrund wurde das Anhalteverhalten der verwendeten Presse bei verschiedenen Zuständen näher untersucht. Gegenüber dem konventionellen Schneidwerkzeug mit Stahlplatten wurde zum einen das Bremsverhalten des leeren Pressenstößels ohne eingebautes Werkzeug und zum anderen die leichteste Konfiguration des Versuchswerkzeuges mit Magnesiumplatten betrachtet. Die Werkzeuge wurden dabei jeweils mit und ohne Schneidoperation betrieben, wobei auch im Belastungsfall ohne Schneiden ein Blechstreifen mit Aussparungen im Stempelbereich zwischen Matrize und Niederhalter zu identischen Bewegungen und Belastungen der Niederhalterplatte führte. In Tabelle 9.2 sind für jeden Betriebszustand die von der Pressensteuerung ermittelten Bremswinkel aufgeführt. Auch bei dem mit dem Versuchswerkzeug maximal realisierbaren Massenunterschied am Pressenstößel (ohne Werkzeug bzw. mit Stahlwerkzeug) sind keine nennenswerten Veränderungen im Abbremsverhalten zu erkennen. Der Bremswinkel steigt für jede Konfiguration von ca. 30° bei 100 Hüben pro Minute auf einen Maximalwert von 494° bei 1000 Hüben pro Minute an.

Hubfrequenz [Hübe / Minute]	Ohne Werkzeug	Magnesiumplatten		Stahlplatten	
		Leerhub	Schneiden	Leerhub	Schneiden
100	29°	29°	29°	28°	29°
1000	487°	488°	486°	479°	494°

Tabelle 9.2: Bremswinkel der eingesetzten Schnellläuferpresse

Dass sich im Versuchsverlauf auch beim Einsatz der Leichtmetallwerkstoffe keine Verringerung des Nachlaufwinkels nachweisen ließ, kann an der geringen Baugröße des Werkzeugs im Vergleich zur Stößelmasse von etwa 150 kg liegen. Während zum Einbau eine Stößelfläche von 530 mm x 360 mm zur Verfügung steht, wird mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Versuchswerkzeug mit einer Aufspannfläche von 296 mm x 196 mm nur 30 % des nutzbaren Bereichs abgedeckt. Bei voller Ausnutzung des Einbauraums der Presse durch größere Werkzeuge würden weitaus größere Massendifferenzen zwischen Stahl- und Magnesiumbauart auftreten, so dass durch Leichtbauart auch ein positiver Effekt in Form von verkürzten Bremswinkeln zu erwarten wäre. Durch eine Verringerung des Bremswinkels kann im Falle eines Werkzeugbruchs idealerweise der Schaden durch erneutes Eintauchen der Schneidstempel beschränkt werden.

9.3.3 Eigenfrequenz des Pressenstößels

Zur Ermittlung der Eigenfrequenz des Pressenstößels wurde ein Impulshammer (Kistler, Typ 9728A20000) und ein Triaxial-Beschleunigungssensor (Kistler, Typ 8688A50) eingesetzt. Die Sensorpositionierung zur Erfassung der Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung an der Oberseite der Stößelaufspannplatte wird in Abbildung 9.7 veranschaulicht.

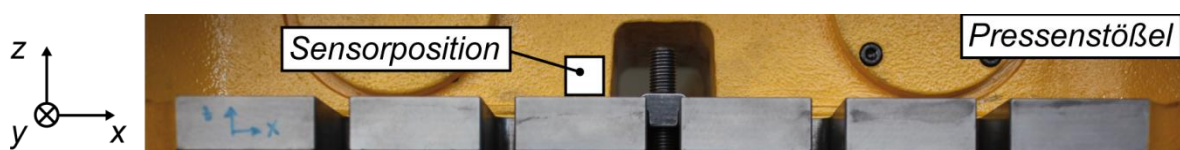


Abbildung 9.7: Sensorposition bei der Eigenfrequenzmessung des Stößels

Während Säulenführungen in Stanzwerkzeugen von außen einwirkende horizontale Kräfte aufnehmen, können Bewegungen des Pressenstößels in Vertikalrichtung vom Werkzeug nicht abgestützt werden. Solche Schwingungen können aber den Reibweg zwischen Stempel und Blechwerkstoff und damit das Verschleißverhalten beeinflussen. Die hierzu durchgeführten Messungen an der eingesetzten 25-t Schnellläuferpresse zeigen eine Eigenfrequenz in z-Richtung von 302 Hz auf, während die maximale Hubfrequenz mit 1425 Hübem pro Minute eine Schwingung von 23,75 Hz darstellt. Die periodische Anregung durch den Pressenhub liegt somit deutlich unter der Stößelresonanzfrequenz. Eine genügend energiereiche impulsartige Anregung durch den Fertigungsprozess mit dem Versuchswerkzeug zur merklichen Schwingungsanregung des steifen Pressenstößels mit über 150 kg Masse ist nicht zu erwarten.

Weitere Ergebnisse zu den Stößelschwingungen in x- und y-Richtung sind in Tabelle 9.3 angegeben. Da eine Anregung der Frequenzen über 1000 Hz mit der in diesen Versuchen eingesetzten Schlagspitze des Hammers nicht abgesichert ist, werden nur jeweils signifikante Frequenzen unterhalb dieser Grenze aufgeführt.

	<i>x-Richtung</i>	<i>y-Richtung</i>	<i>z-Richtung</i>
<i>Eigenfrequenzen</i>	167 Hz	280 Hz	302 Hz

Tabelle 9.3: Ermittelte Stößeigenfrequenzen bei impulsartiger Anregung

9.4 Ergebnisse aus Schneidversuchen

9.4.1 Charakterisierung eines Pressenhubes anhand von Messergebnissen

Unter Verwendung des überprüften Messsystems und des beschriebenen Versuchswerkzeuges wurden Schneidversuche mit der in Kapitel 4.1 beschriebenen Hochleistungs-Schnellläuferpresse mit Exzenterkinematik durchgeführt. Für einen Schneidvorgang bei einer Hubfrequenz von 100 Hübem pro Minute sind in Abbildung 9.8 exemplarisch Messkurven für folgende Sensoren dargestellt:

- Kraft, gemessen im Krafthauptschluss im Bereich der Stempelköpfe
- Beschleunigung, gemessen im Bereich der Stempelköpfe
- Weg des Pressenstößels
- Weg des Niederhalters

Im Folgenden werden unter Verweis auf Abbildung 9.8 die messtechnischen Ergebnisse während der einzelnen Phasen des Schneidvorganges näher erläutert. Als Beispiel soll der Signalverlauf bei einer Hubfrequenz von 100 Hüben pro Minute dienen.

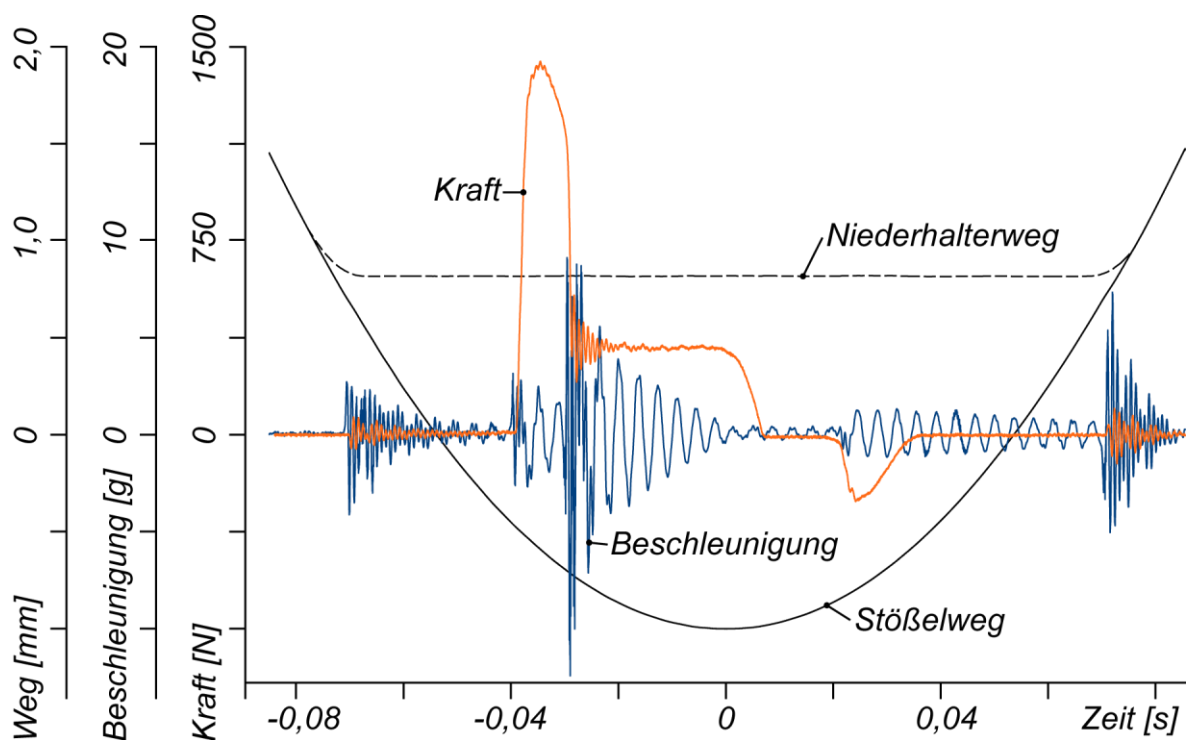


Abbildung 9.8: Exemplarische Messergebnisse bei 100 Hüben pro Minute

Aufsetzen des Niederhalters

Bei der dargestellten Hubfrequenz von 100 Hüben pro Minute bewegt sich der Stößel zum Zeitpunkt des Aufsetzens des Niederhalters auf das Blech mit einer Geschwindigkeit von 0,035 m/s. Hier kann ein erster Anstieg der Kraft- und Beschleunigungssignale beobachtet werden. Durch den Auftreffimpuls wird eine Schwingung angeregt, die als Beschleunigung im Bereich der Stempelköpfe deutlich wird. Die Auslenkungen des Kraftsignals zeigen an, dass das gesamte System von

Schneidstempeln, Stempelhalterplatte, Stempeldruckplatte und Kraftsensor zum Schwingen angeregt wird.

Aufsetzten der Schneidstempel

Nach einem kurzen Zeitintervall, während die Schraubenfedern im Werkzeug komprimiert werden und die Niederhalterkraft weiter erhöht wird, kommt es zum Kontakt zwischen Stempelstirnflächen und Blechwerkstoff. Durch das Auftreffen der Schneidstempel mit einer Anschneidgeschwindigkeit von 0,029 m/s wird die nahezu abgeklungene Schwingung im Beschleunigungssignal ein weiteres Mal angeregt. Ab diesem Zeitpunkt steigt auch die Schneidkraft stark an, während der Blechwerkstoff erst elastisch und anschließend plastisch verformt wird.

Durchbrechen des Blechwerkstoffes

Zum Zeitpunkt des Durchbrechens des Blechwerkstoffes wird die elastische potentielle Energie, die in den Schneidstempeln sowie den weiteren Komponenten im Kraftfluss gespeichert ist, schlagartig frei [HOFF09]. Diese als Schnittschlag bekannte Erscheinung regt ebenfalls die Schneidstempel und die umgebenden Platten zum Schwingen an. In Abbildung 9.8 ist dies im Kraft- und Beschleunigungssignal erkennbar. Das Kraftsignal fällt dabei nicht auf Null ab, sondern bleibt aufgrund von Reibkräften zwischen Stempelmantelfläche und Stanzgitter sowie aufgrund der Kräfte zum Weiterschieben der vorhergehenden Schnittteile in der Matrize auf einem Niveau über Null. In dieser Phase des Schneidvorganges können vertikale Schwingungen den Reibweg zwischen Stempelmantelfläche und Stanzgitter erhöhen und somit zu erhöhtem Mantelflächenverschleiß führen.

Unterer Umkehrpunkt

Für ein kurzes Zeitintervall nach dem unteren Umkehrpunkt des Stößels fällt das Kraftsignal auf Null ab, da die Schneidstempel zur Vermeidung einer überbestimmten Lagerung mit Spiel im Kopfbereich festgehalten werden. In der zeitlichen Betrachtung wird dieser Bereich besonders deutlich, da aufgrund der sinusförmigen Stößelbewegung im Bereich des unteren Umkehrpunktes die Bewegungsgeschwindigkeit minimal ist.

Rückzug der Stempel

Sobald die Schneidstempel bei der Aufwärtsbewegung des Stößels wieder mit der Stempelhalteplatte in Kontakt treten, kommt es zur nächsten Impulsanregung im Werkzeug, welche aber aufgrund der geringen Stößelgeschwindigkeit im Bereich des unteren Umkehrpunktes relativ klein ausfällt. Im Beschleunigungssignal ist eine schwach gedämpfte Schwingung in der Eigenfrequenz der Kipp-Eigenform erkennbar. Negative Kräfte in der weiteren Phase des Schneidvorganges weisen auf Rückzugskräfte aufgrund von Reibung zwischen Stempelmantelflächen und Stanzgitter hin. Im dargestellten Fall weisen diese Kräfte einen Betrag von etwa 17 % der maximalen Schneidkraft auf.

Abheben der Stempel vom Stanzgitter

Zum Zeitpunkt des Rückhubes, wenn die Schneidstempel das Stanzgitter verlassen, kommt es zu einer Entlastung des durch die Lochreibungskräfte unter Zugspannung stehenden Systems. Auch hier wird gespeicherte potentielle Energie innerhalb einer kurzen Zeitspanne freigesetzt. Aufgrund der im Vergleich zur Schneidkraft deutlich geringeren Rückzugskraft wird zu diesem Zeitpunkt jedoch keine Schwingung angezeigt. Da beim Rückhub ab diesem Zeitpunkt der Kontakt zwischen Blechwerkstoff und Stempel endet, haben später auftretende Schwingungen keinen Einfluss mehr auf das Verschleißverhalten der Werkzeugaktivelemente.

Abheben des Niederhalters

Eine letzte schlagartige Belastung während eines Pressenhubes ist im Kraft- und Beschleunigungssignal der Abbildung 9.8 deutlich erkennbar, wenn die Niederhalterplatte vom Blech abhebt und sich mit den Rückhub-Distanzeinheiten in der Kopfplatte einhängt. Die Größe dieser Anregung ist abhängig von der Hubfrequenz der Presse und der Vorspannung der Federn zwischen Kopf- und Niederhalterplatte zur Aufbringung der Niederhalterkraft. Obwohl diese Schockbelastung hohe Amplituden in den Signalen hervorruft, wird die Genauigkeit der Schnitteile und der Verschleiß der Aktivelemente hiervon nicht mehr beeinflusst, da die Schneidstempel das Blech bereits verlassen haben. Des Weiteren klingt die Schwingung deutlich vor Erreichen des oberen Umkehrpunktes des Pressenstößels ab, so dass der nächste

Pressenhub davon nicht beeinflusst wird. Die Höhe der Amplitude lässt sich auch durch die Nähe der Stoßbelastung zur Kraftmessdose und den direkten Übertragungspfad mit nur einer Fügestelle erklären.

In Abbildung 9.9 ist der Schneidkraftverlauf bei der Durchführung eines Testhubes mit einer Hubfrequenz von 25 Hüben pro Minute entgegen der Darstellung in Abbildung 9.8 nicht über der Messzeit, sondern entlang des Stößelweges aufgetragen. Zur besseren Darstellung wurde im Kraft-Weg-Diagramm das Wegsignal ab dem unteren Umkehrpunkt gespiegelt aufgetragen. Gerade um den Bereich des unteren Umkehrpunktes der Presse ergibt sich hierbei ein verändertes Bild, da bei der Exzenterpresse die Stößelgeschwindigkeit stark abfällt und nach dem Nulldurchgang das Vorzeichen wechselt (vgl. Abbildung 8.2).

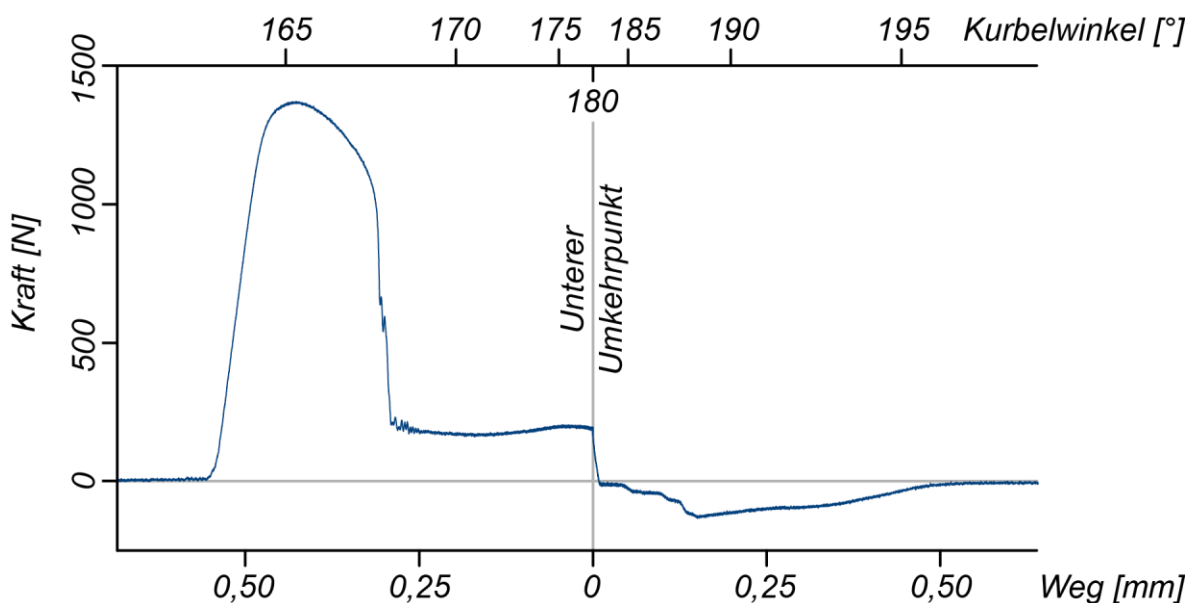


Abbildung 9.9: Kraft-Weg-Verlauf bei 25 Hüben pro Minute, Wegachse gespiegelt

Mit der Darstellung des Kraftverlaufes über dem Stößelweg können die geometrischen Verhältnisse in Bezug auf die Stempelposition und die Werkzeugschließhöhe in der Schnellläuferpresse kontrolliert werden. Die Auswertung wurde für jede Werkzeugkombination bei einer Hubfrequenz von 100 Hüben pro Minute durchgeführt und die Werkzeugschließhöhe bei Bedarf über die Stößelverstellung der Presse nachgeregelt. Nach dem Aufsetzen der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff

durchdringen diese das Stanzgitter vollständig und tauchen im Anschluss weitere 0,3 mm bis zum unteren Umkehrpunkt in die Matrize ein. Die ausgeschnittenen Stanzbutzen werden dabei um diese Strecke weitgeschoben. Mit diesem Vorgehen konnte für alle Versuchsreihen eine identische Eintauchtiefe der Schneidstempel in das Stanzgitter sichergestellt werden. Durch das Weiterschieben der Butzen von mehr als der Blechdicke konnte in Kombination mit einem im Winkel von $0^\circ 15'$ konischen Matrizenkanal und der eingesetzten Absauganlage ein Hochkommen der Stanzbutzen während der Schneidversuche sicher vermieden werden.

In Abbildung 9.9 ist bei einer Pressenhubfrequenz von 25 Hüben pro Minute zum Zeitpunkt des Durchbrechens des Blechwerkstoffes im stark abfallenden Bereich der Kraftkurve noch eine Unregelmäßigkeit zu erkennen. Diese lässt sich mit minimalen Unterschieden in der Länge der neun Schneidstempel erklären. Während der Butzen an den Positionen mit längeren Stempeln zuerst durchbricht, geschieht dies bei den kürzeren Stempeln mit minimalem Weg- bzw. Zeitversatz. Bei höheren Hubfrequenzen ist dieses Phänomen nicht mehr erfassbar. Um den ursprünglichen Zustand der Schneidkante beizubehalten wurden aus der gelieferten Charge Stempel mit gleicher Stempellänge zu einem Stempelsatz zusammengestellt. Differenzen im Bereich von unter 0,01 mm konnten aber nicht ausgeschlossen werden.

9.4.2 Einfluss der Pressenhubfrequenz

Schneidkraft

In Abbildung 9.10 sind in zwei Diagrammen Kraftsignale bei verschiedenen Pressenhubfrequenzen bei ansonsten identischen Randbedingungen aufgetragen. Aufgrund der auftretenden Erhöhung der Maximalwerte wurde die Kraft-Achse im rechten Diagramm für die Hubfrequenzen 500 und 1000 Hübe pro Minute um den Faktor vier gegenüber der Darstellung für 100 und 300 Hübe pro Minute auf der linken Seite skaliert. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden auch die Zeitachsen mit den Faktoren 3, 5 und 10 gegenüber der Achse für 100 Hübe pro Minute auf den gleichen Stößelweg gestreckt.

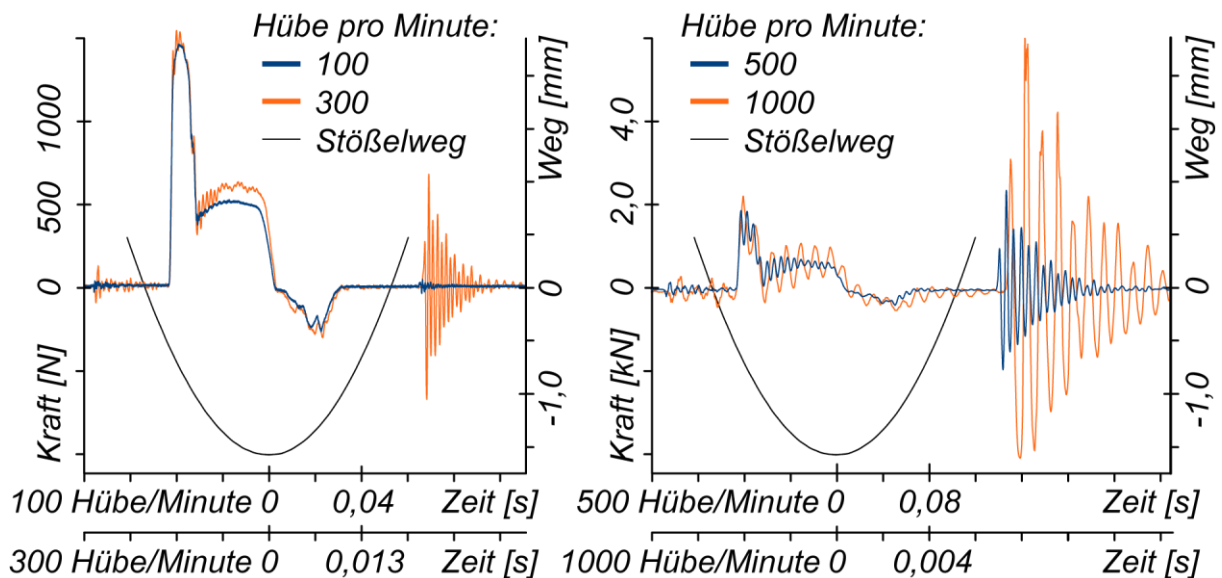


Abbildung 9.10: Kraftverlauf beim Schneiden mit Hubfrequenzen von 100, 300, 500 und 1000 Hüben pro Minute

In Bezug auf die Qualität der erzeugten Schnittflächen sowie auf den Stempelverschleiß ist insbesondere die Betrachtung des Zeitintervalls relevant, in dem sich die Schneidstempel in direktem Kontakt mit dem Blechwerkstoff befinden. Die Schwingungsamplituden steigen dabei mit zunehmender Pressenhubfrequenz an. Während das Kraftsignal beim Ausschwingen der Stempel nach dem Schnittschlag bei 100 Hüben pro Minute nur geringe Amplituden aufweist, erhöht sich dieser Wert bis hin zu etwa 1100 N bei 1000 Hüben pro Minute.

Eine deutlich sichtbare Auswirkung der Erhöhung der Pressenhubfrequenz ist das kontinuierliche Ansteigen der Schwingungsamplitude des Kraftsignals zum Zeitpunkt des Abhebens des Niederhalters, wenn sich die Niederhalterplatte wieder in der Kopfplatte einhängt. Diese schlagartige Anregung in der Kopfplatte überträgt sich im direkten Kraftfluss über die obere Druckplatte auf den Kraftsensor. Ab einer Hubfrequenz von etwa 500 Hüben pro Minute überschreiten die angezeigten Kraftwerte diejenigen, die beim Schneiden erreicht werden.

Bei Hubfrequenzen von mehr als 100 Hüben pro Minute können Schwingungen des Systems in der Zug-Eigenfrequenz von ca. 1200 Hz während des eigentlichen Schneidvorganges als Überlagerung im Kraftsignal im Zeitbereich um die maximale

Schneidkraft nachgewiesen werden (Abbildung 9.10). Schneidversuche mit überlagerten Schwingungen wurden bereits in der Veröffentlichung „Oscillation overlaid shearing of sheet“ [BEHR07b] dokumentiert. Im Gegensatz zu den vorliegenden Untersuchungen, in denen durch impulsartige Belastungen während des Schneidprozesses die Eigenfrequenzen des Systems zum Schwingen angeregt wurden, oszillierten die Schneidaktivelemente in [BEHR07b] aufgrund der Anregung durch einen Piezo-Aktuator. Bei Frequenzen zwischen 0 und 20 kHz konnte eine Auswirkung auf Höhe und Verlauf der Schneidkraft sowie auf charakterisierende Parameter der Schnittfläche wie z. B. Kanteneinzugshöhe, Glattschnittanteil, Bruchflächenanteil und Grat nach [VDI2906-2] aufgezeigt werden. In diesem Zusammenhang kann eine Betrachtung der Eigenfrequenzen und Eigenformen von relevanten Komponenten eines Schneidwerkzeuges dazu beitragen, ein Optimum zwischen Verschleißentwicklung und Schnittflächenqualität der Bauteile zu finden. Da die gleichzeitige Umsetzung von hohen Frequenzen, hohen Schneidkräften und hohen Schwingungsamplituden mit Piezotechnik äußerst aufwändig ist, liegt ein besonderes Potential in einer schwingungsoptimierten Auslegung von Werkzeugen.

Ein exemplarischer Nachweis für die Ermittlung der Eigenformen und –frequenzen für das Versuchswerkzeug mit Hilfe der FE-Simulation konnte in Kapitel 9.2 erbracht werden. Mit der Kenntnis der idealen Überlagerungsfrequenz für ein entsprechendes Schneidsystem kann durch gezielte Auslegung der Komponenten zwischen Schneidaktivelement und Pressenstößel diese Eigenfrequenz bei entsprechenden Amplituden eingestellt werden. Durch die Möglichkeit der Variation von Massen und Steifigkeiten im System ist auch ein Nachjustieren der simulativ ermittelten Werte im realen Werkzeug möglich.

Beschleunigungen

Bei Erhöhung der Pressenhubfrequenz zeigen auch die Beschleunigungssensoren ein stetiges Ansteigen der Schwingungsamplituden an. Eine Auswertung bei den Frequenzen 25, 100, 500 und 1000 Hüben pro Minute ist in Abbildung 9.11 und Abbildung 9.12 dargestellt. Neben der Schneidkraft und dem Stößelweg im Bereich des unteren Umkehrpunktes der Presse ist darin das Beschleunigungssignal im

Bereich der Stempelköpfe und des Sensors in einer Tasche im oberen Bereich der Kopfplatte aufgetragen. Die genaue Sensorposition kann der Detaildarstellung des Querschnitts des oberen Werkzeugbereiches in Abbildung 7.9 entnommen werden.

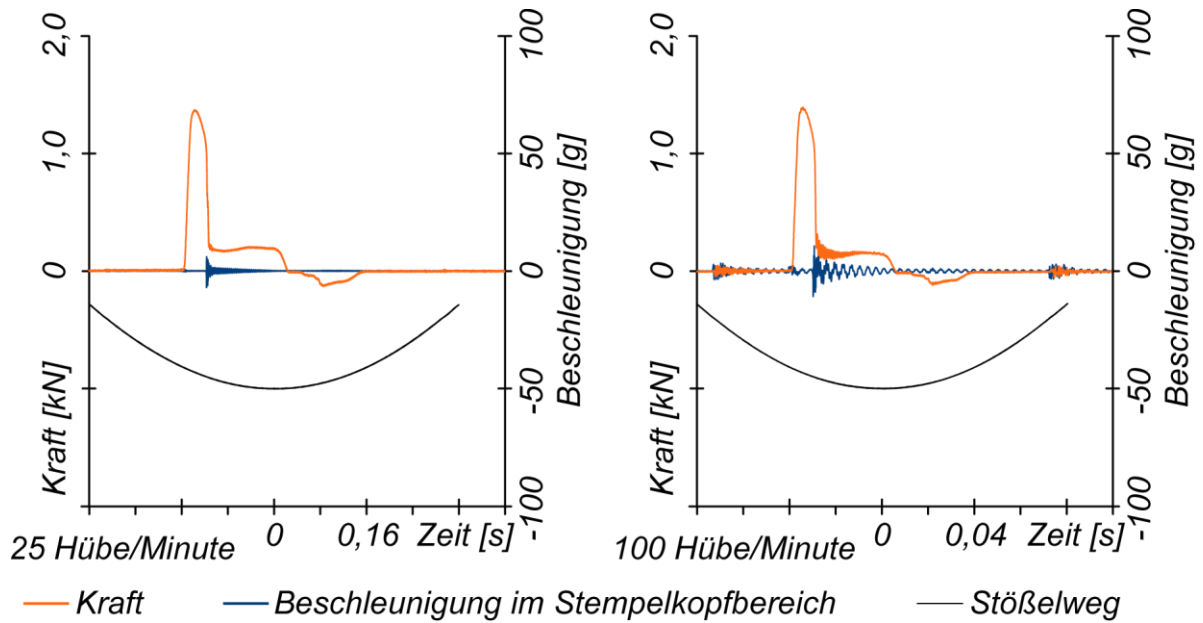


Abbildung 9.11: Kraft- und Beschleunigung bei 25 und 100 Hügen pro Minute

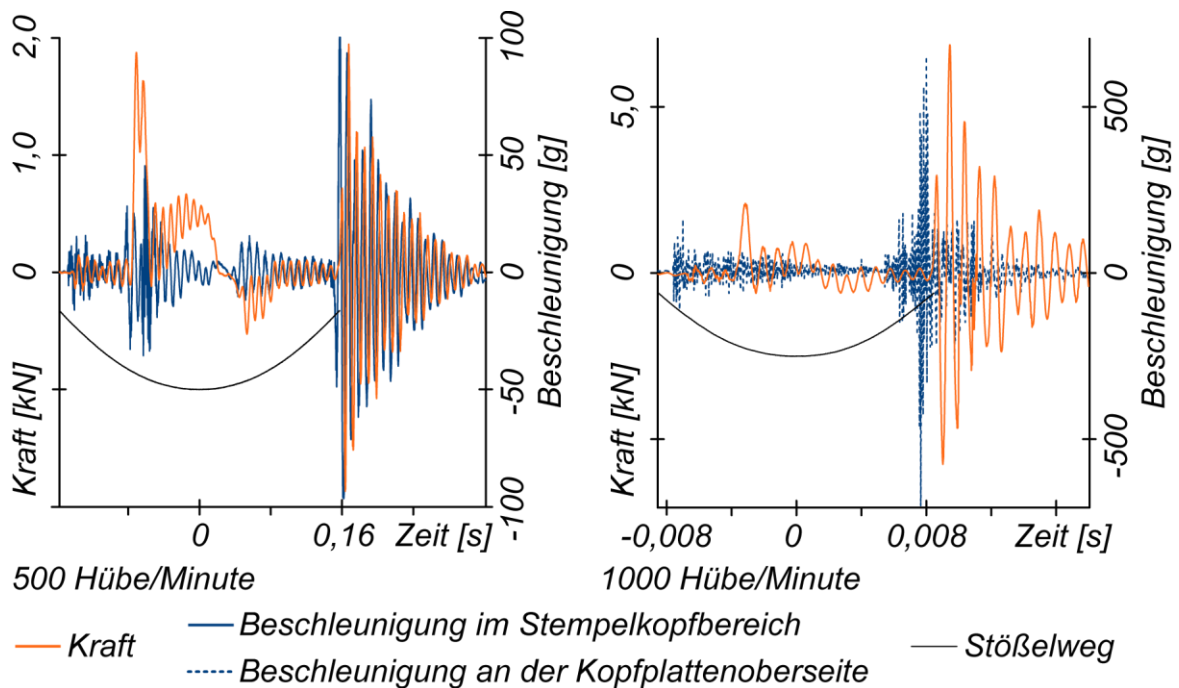


Abbildung 9.12: Kraft- und Beschleunigung bei 500 und 1000 Hügen pro Minute

Während beim Testhub der Presse mit einer Hubfrequenz von 25 Hübem pro Minute der Beschleunigungssensor nur beim Schnittschlag eine Anregung aufzeigt, sind bei 100 Hübem pro Minute auch deutliche Ausschläge beim Aufsetzen und Abheben des Niederhalters zu verzeichnen. Mit zunehmender Hubfrequenz steigen die Amplituden zu den drei Zeitpunkten kontinuierlich an, wobei sich der Wert beim Abheben des Niederhalters, wenn sich dieser über die Rückhubhülsen wieder in die Kopfplatte einhängt, überproportional erhöht. Bei Hubfrequenzen über 500 Hübem pro Minute lassen sich mit dem ausgewählten Beschleunigungssensor im Stempelkopfbereich die Messwerte nicht mehr zufriedenstellend erfassen, da aufgrund von Schockbelastung der vorgesehene Messbereich überschritten wird. Im Diagramm für die Produktionshubzahl 1000 Hübe pro Minute wird daher das Signal des Sensors an der Kopfplatte des Werkzeuges ausgewertet. Aufgrund der großen Entfernung mit mehreren dämpfenden Fügestellen zum Entstehungsort der Anregungen weisen die Ausschläge dieses Sensors insbesondere im Zeitbereich des Schneidens deutlich geringere Amplituden auf. Der Impuls durch das Einhängen der Niederhalterplatte in die Kopfplatte beim Rückhub wird hingegen an dieser Sensorposition verstärkt wahrgenommen.

9.4.3 Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Nach umfassenden Untersuchungen zum Werkzeug- und Pressenverhalten bei unterschiedlichen Hubfrequenzen und der genauen Betrachtung der messtechnisch erfassbaren Größen während des Schneidvorganges wurden Dauerhubversuche mit verschiedenen Werkzeugkonfigurationen durchgeführt. Der Einfluss der Plattenwerkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und CFK auf das Schwingungs- und Dämpfungsverhalten im Werkzeug konnte beim Schneiden der in Kapitel 5.3 beschriebenen Kupferlegierung CuFe2P aufgezeigt werden. Jede Werkzeugkonfiguration wurde bis zu einer Gesamthubzahl von 300.000 Hübem untersucht. Für die Versuchsreihen zur Verschleißermittlung wurde die Pressenhubfrequenz bei einem Wert von 1000 Hübem pro Minute konstant gehalten. Zwischen den Untersuchungsintervallen von 50.000 Hübem wurden jeweils Messungen mit Hubfrequenzen von 100 und 300 Hübem pro Minute aufgezeichnet.

Als Nachweis für die Reproduzierbarkeit der Versuche und von gleichbleibenden Versuchsbedingungen kann Abbildung 9.13 mit insgesamt 9 Kurven für Kraftverläufe während eines Schneidvorganges bei 1000 Hüben pro Minute in einem Diagramm herangezogen werden. Über eine Versuchsdauer von 300.000 Hüben wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Messungen aufgezeichnet und die Verläufe in einem Diagramm miteinander verglichen. Trotz zwischenzeitlicher Demontage und Montage des Versuchswerkzeugs in der Schnellläuferpresse sowie Aus- und Einbau der Schneidstempel aus dem Werkzeug nach Vermessung der Schneidkanten sind die zeitlichen Verläufe der Kräfte über den gesamten Messzeitraum nahezu deckungsgleich. Minimale Schwankungen in der Amplitude können akzeptiert werden, da sie keine Abhängigkeit von der Anzahl der Schneidvorgänge oder vom Umrüstvorgang aufweisen.

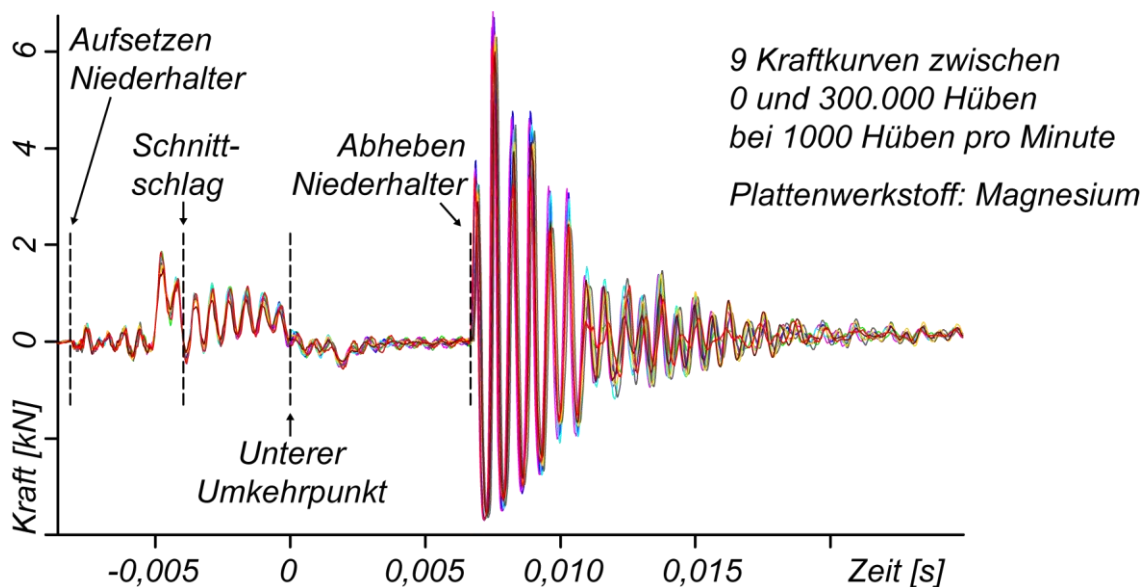


Abbildung 9.13: Nachweis der Reproduzierbarkeit der Versuche mit zwischenzeitlichem Werkzeugumbau

9.4.4 Einfluss des Plattenwerkstoffs auf das Schwingungsverhalten

Zur Bestimmung des Einflusses von unterschiedlichen Werkstoffplattenwerkstoffen wurden in den Vor- und Dauerhubversuchen Kraft- und Beschleunigungssignale bei unterschiedlichen Hubfrequenzen betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die

Schwingungen des Kraftsignals, die aufgrund des Durchbrechens des Blechwerkstoffes angeregt werden, sehr stark von den notwendigen Kräften zum Weiterschieben der ausgeschnittenen Butzen in der Matrize abhängig sind. Obwohl eine Tendenz zu geringeren Amplituden beim Einsatz von Leichtbauwerkstoffen gegenüber Stahlplatten ersichtlich ist, wird aufgrund einer hohen Streuung dieser Messdaten hierauf nicht näher eingegangen.

Mit der Auswertung der Messdaten der Beschleunigungssensoren während des Schneidvorganges kann zum Zeitpunkt des Auftreffens der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff und beim Durchbrechen des Bleches jeweils eine Schwingungsanregung im System nachgewiesen werden. Auch bei dieser Signalart war die Auswertung der Amplituden beim Schnittschlag nicht zielführend, da die durch das Aufsetzen der Stempel angeregte Oszillation zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeklungen ist. Durch die phasenverschobene Anregung beim Durchbrechen des Blechwerkstoffes bewirken hierbei geringste zeitliche Verschiebungen starke Schwankungen der Amplituden.

Eine Betrachtung der Beschleunigungssignale zum Zeitpunkt des Auftreffens der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff führt hingegen zu aussagekräftigen Ergebnissen. Hierzu wurden während der Dauerhubversuche, zwischen den Untersuchungsintervallen von 50.000 Hüben Messungen mit Hubfrequenzen von 300 Hüben pro Minute durchgeführt und ausgewertet. Bei einer Auftreffgeschwindigkeit von 0,086 m/s liefern sowohl die Sensoren im Bereich der Stempelköpfe als auch der Beschleunigungsaufnehmer an der Oberseite der Werkzeugkopfplatten für alle Werkstoffvarianten aussagekräftige Messergebnisse. Zur Beschreibung des Einflusses der Leichtbauwerkstoffe auf das Schwingungsverhalten im Werkzeug wurde von den Beschleunigungssignalen jeweils der halbe Abstand der Amplituden der ersten beiden Halbschwingungen in positiver und negativer Richtung als Kennwert für eine mittlere Amplitude A_m ermittelt. Die Vorgehensweise zur Auswertung der Messdaten wird mit Abbildung 9.14 anhand einer exemplarischen Messkurve und mit Formel 9.1 verdeutlicht.

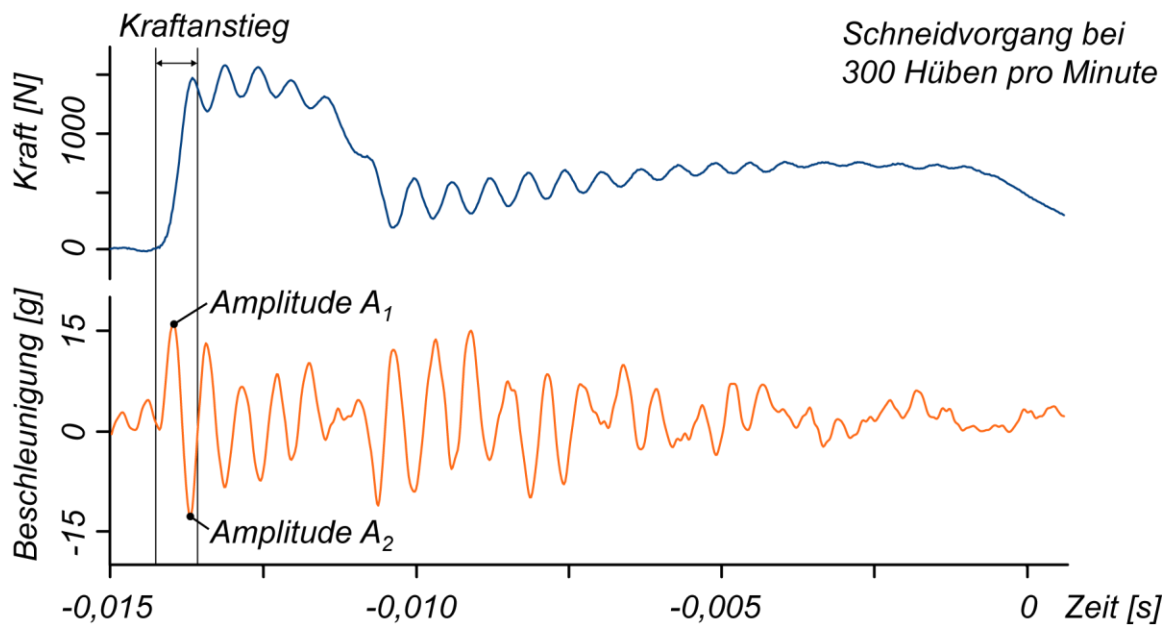


Abbildung 9.14: Auswertung der Beschleunigungssignale

$$A_m = |A_1 - A_2| / 2 \quad (9.1)$$

A_m Mittlere Amplitude [g]
 A_n Amplitude der n. Halbschwingung [g]

Für alle Plattenvarianten fand eine Auswertung der mittleren Amplituden A_m bis zu einer Gesamthubzahl von 500.000 Hüben und eine anschließende Mittelwertbildung für die Kennwerte statt. Im Bereich der Stempelköpfe wurden die Signale von zwei baugleichen, gegenüberliegenden Sensoren als gleichwertig betrachtet. Messergebnisse von Signalen mit unbefriedigender Güte wurden dabei nicht in die Mittelwertbildung eingeschlossen. Eine grafische Darstellung der Veränderung der Beschleunigungsamplituden erfolgt in Abbildung 9.15 relativ zum Ergebnis beim Einsatz von Stahlplatten. Für die unterschiedlichen Plattenwerkstoffe sind die Kennwerte der Sensoren im Bereich der Stempelköpfe und des Sensors an der Oberseite der Kopflatte gegeben. In Relation dazu sind jeweils die Kennwerte für Elastizitätsmodul und Dichte der Plattenwerkstoffe, ebenfalls normiert auf den Kennwert von Stahl, dargestellt. Ein Diagramm mit absoluten Werten für die Mittelwerte der Beschleunigungsamplituden mit Angabe von Standardabweichung sowie von Minimal- und Maximalwerten ist im Anhang unter Kapitel 12.4 aufgeführt.

Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Beschleunigungsamplituden im oberen Bereich der Stempelkopfplatte von Stahl über Aluminium und Magnesium hin zum kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff um ein vielfaches ansteigen. Beim Einsatz von CFK-Platten weisen die Amplituden im Mittel einen Wert vom 6,4-fachen der Amplituden von Stahlplatten auf. Umgekehrt verhält es sich bei den Signalen im Bereich der Stempelköpfe. Hier fallen die Amplituden vom Stahlwerkstoff über die beiden Leichtmetallwerkstoffe hin zum faserverstärkten Kunststoff auf die Hälfte ab.

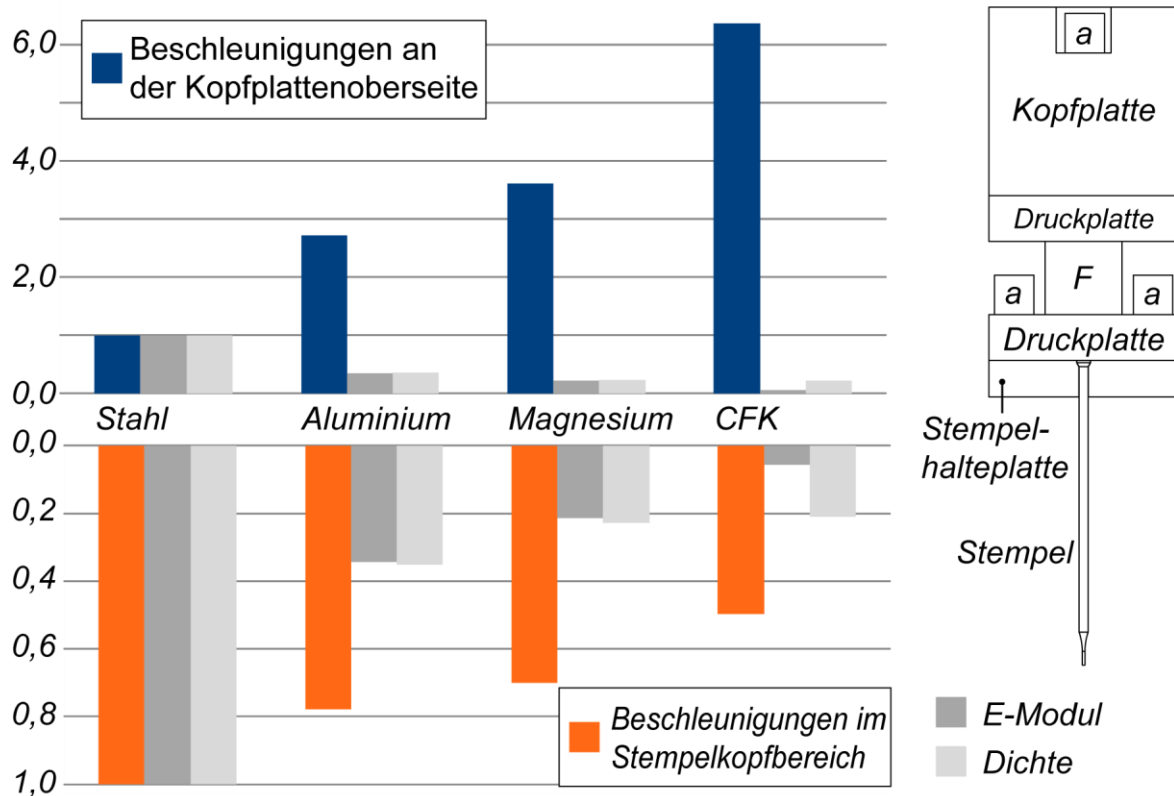


Abbildung 9.15: Amplituden der Beschleunigungen beim Einsatz der Werkzeugplattenwerkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und CFK

Die Beobachtungen lassen sich deuten, wenn man das System aus Kopfplatte, oberer Druckplatte, Kraftsensor, unterer Druckplatte sowie der Stempelhalterplatte und der Schneidstempel als Hintereinanderschaltung von Federn betrachtet. Durch den Austausch der Kopfplattenwerkstoffe wird lediglich mit dem Elastizitätsmodul die Federsteifigkeit des Systems in diesem Bereich verändert, während die restlichen

Parameter konstant gehalten werden. Die Einbringung von Energie ins System durch eine schlagartige Belastung, ausgehend von der Stempelstirnfläche wirkt sich bei einer steifen Kopfplatte in der Form aus, dass hohe Beschleunigungswerte im Bereich der Schneidstempel auftreten. Mit abnehmendem Elastizitätsmodul der Kopfplatte bei Druckbelastung werden die Beschleunigungsamplituden im Bereich der Schneidstempel reduziert, was als Folge einen positiven Effekt auf das Verschleißverhalten der Werkzeugaktivelemente annehmen lässt. Mit zunehmender Plattensteifigkeit wird demnach ein geringerer Anteil der entstehenden Festkörperwellen in den Bereich des Pressenstößels abgeleitet und stattdessen am Übergang zur Kopfplatte in Richtung der Schneidstempel reflektiert.

9.4.5 Verschleißverhalten unterschiedlicher Stempelwerkstoffe

Zur Bestätigung des positiven Effektes auf den Werkzeugverschleiß beim Einsatz von Leichtbauwerkstoffen als Platten in schnelllaufenden Stanzwerkzeugen wurden zusätzlich zu den messtechnischen Untersuchungen während des Schneidprozesses auch die Schneidkanten der Stempel taktil vermessen. Eine Aufnahme der Schneidkantengeometrie der Stempel in den Güten HSS, PM-Stahl und Hartmetall fand im Lieferzustand, zwischen den Untersuchungsintervallen bei 150.000 und 300.000 Hüben sowie zum Ende der Verschleißversuche nach 500.000 Hüben statt. Die Hubfrequenz für die Dauerhubversuche wurde bei 1000 Hüben pro Minute konstant gehalten. Exemplarisch sind in Abbildung 9.16 Schneidkantengeometrien bei verschiedenen Verschleißzuständen für die drei untersuchten Stempelgüten aufgetragen. Dargestellt sind jeweils die Verschleißkurven für den Versuchsaufbau mit Werkzeugplatten aus Stahl, da hierbei die größte Veränderung an den Schneidkanten gemessen werden konnte.

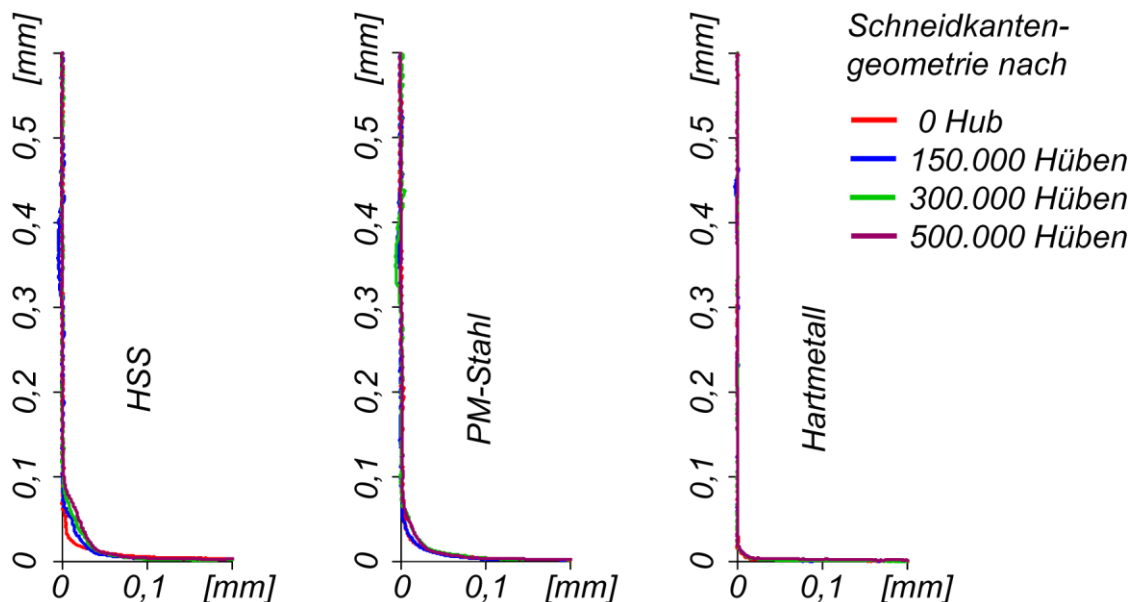


Abbildung 9.16: Verschleißkurven für die Dauerhubversuchsreihe mit Stahlplatten

Aus Abbildung 9.16 geht hervor, dass die Ausgangszustände der Schneidkanten der Güten HSS und PM-Stahl von denen der Hartmetallstempel abweichen. Während bei den Hartmetallaktivelementen von einem Schneidkantenradius von weniger als 20 μm ausgegangen werden kann, weisen die beiden unterschiedlich hergestellten Schnellarbeitsstähle Werte von über 40 μm auf. Der Effekt der größeren Kantenradien ist auf die geringere Werkstoffhärte beim letzten Fertigungsschritt des Normalienherstellers zurückzuführen und wäre nur mit erhöhtem Fertigungsaufwand zu vermeiden. Da in der industriellen Praxis an den Schneidstempeln in der Regel auch keine weitere Schneidkantenanpassung vorgenommen wird, wurde der Lieferzustand auch für die Verschleißuntersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes als Ausgangszustand gewählt.

In Bezug auf das Verschleißverhalten der Stempelwerkstoffe wird anhand von Abbildung 9.16 deutlich, dass der Verschleiß bei Stempeln aus konventionell hergestelltem Schnellarbeitsstahl am größten ist, während beim pulvermetallurgisch produzierten Stahl ein geringerer Einfluss der Hubzahl feststellbar ist. Stempel aus Hartmetallwerkstoff zeigen bis zu einer Gesamthubzahl von 500.000 Hüben nahezu keinen Verschleiß auf. Anhand der Messkurven der Stempel aus Schnellarbeitsstahl ist eine deutliche Dominanz des Mantelflächenverschleißes gegenüber dem

Verschleiß an der Stirnfläche erkennbar. Beim zu schneidenden höherfesten Kupferblechwerkstoff lässt sich dies mit einer schmierenden Wirkung der beidseitigen Zinnbeschichtung erklären. Des Weiteren führen die untersuchten Vertikal-schwingungen bei hohen Pressenhubfrequenzen lediglich im Mantelflächenbereich zu einer Erhöhung des Reibweges und damit zu erhöhtem Verschleiß.

An den Mantelflächen der Stempel sind in einem Abstand von 0,30 bis 0,45 mm von der Stempelstirnfläche anhaftende Werkstoffpartikel des Bleches messbar. Die Auswertung weiterer Messkurven macht deutlich, dass diese Anhaftungen im Versuchsverlauf an verschiedenen Stellen kontinuierlich auf- und abgebaut werden. Der Umstand, dass diese Anhaftungen nur im oberen Bereich der Stempelmantelfläche vorzufinden sind, lässt darauf schließen, dass die Partikel nur leicht anhaften und während des normalen Schneidprozess wieder abgeschabt werden. Eine optische Bewertung der Schneidstempel mit Hilfe von Makroaufnahmen aus dem Rasterelektronenmikroskop ergibt, dass solche Anhaftungen keinen umlaufenden Ring bilden, sondern aus einzelnen Partikeln bestehen. Die Darstellungen in Abbildung 9.17 zeigen im Weiteren eine Orientierung dieser Partikel in z-Richtung der Schneidstempel, was auf die Relativbewegung zwischen Stempel und Blechwerkstoff in dieser Richtung zurückzuführen ist. In den Aufnahmen aus dem Rasterelektronenmikroskop ist nach 500.000 Hüben nahezu kein Verschleiß am Schneidstempel aus Hartmetall feststellbar. In der dargestellten Aufnahme ist jedoch in einem Umfangsbereich von etwa 25° entlang der umlaufenden Schneidkante ein Ausbruch dokumentiert, der auf Unregelmäßigkeiten im Stanzprozess zwischen 300.000 und 500.000 Hüben zurückzuführen ist. Aus diesem Grund werden die weiteren Verschleißergebnisse lediglich bis zu einer Anzahl von 300.000 Hüben diskutiert. Neben den Aufnahmen aus dem Rasterelektronenmikroskop in Abbildung 9.17 sind die drei Stempelgüten im Verschleißzustand nach 500.000 Hüben zur optischen Bewertung auch in der Seitenansicht in Abbildung 9.18 abgebildet.

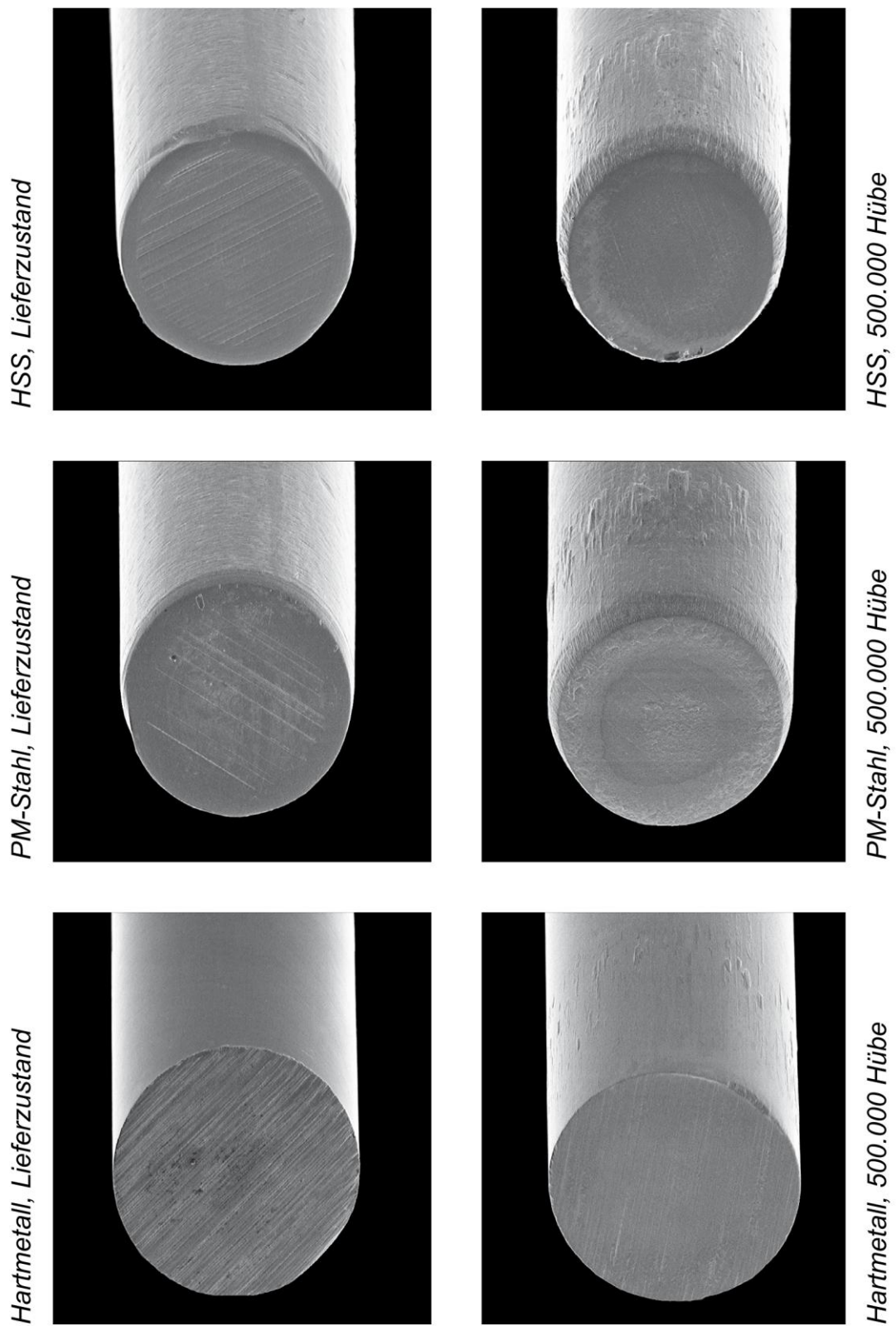


Abbildung 9.17: REM-Aufnahmen von Schneidstempeln vor und nach den Schneidversuchen mit Stahlplatten, Stempeldurchmesser 0,6 mm



Abbildung 9.18: *Fotografische Dokumentation der Schneidstempel, Zustand nach 500.000 Hieben, Stempeldurchmesser 0,6 mm*

9.4.6 Einfluss des Plattenwerkstoffes auf das Verschleißverhalten

Zur Auswertung des Verschleißverhaltens bei den Versuchsparametern Werkzeugplattenwerkstoff und Schneidstempelwerkstoff wurden nach jedem Versuchsintervall jeweils drei Schneidstempel der jeweiligen Werkstoffgüten an jeweils 4 Messpositionen taktil vermessen. Mit den ermittelten Kennwerten für die 45°-Verschleißlänge wurden somit aus 12 Parametern die Mittelwerte gebildet und in Abbildung 9.19 für den Zustand nach 150.000 sowie nach 300.000 Hieben aufgetragen. Abbildung 9.16 zeigt, dass die Schneidkanten der Stempel herstellungsbedingt auch im Ausgangszustand einen spezifischen Wert für die 45°-Verschleißlänge aufweisen. In den Untersuchungen wurden die Stempel entsprechend der industriellen Praxis ebenfalls ohne zusätzliche Schneidkantenpräparation im Lieferzustand eingesetzt. Zur deutlicheren Darstellung des Einflusses der Versuchsparameter wurden im Diagramm, Abbildung 9.19 die Veränderungen der 45°-Verschleißlänge zum Ausgangszustand aufgetragen. Da beim Hartmetallstempelwerkstoff mit scharfer Schneidkante die Veränderungen bis zur durchgeführten Anzahl an Schneidoperationen nur geringfügig über der Messtoleranz liegen, sind in Abbildung 9.19 lediglich die Verschleißwerte für den konventionell und pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstahl dargestellt.

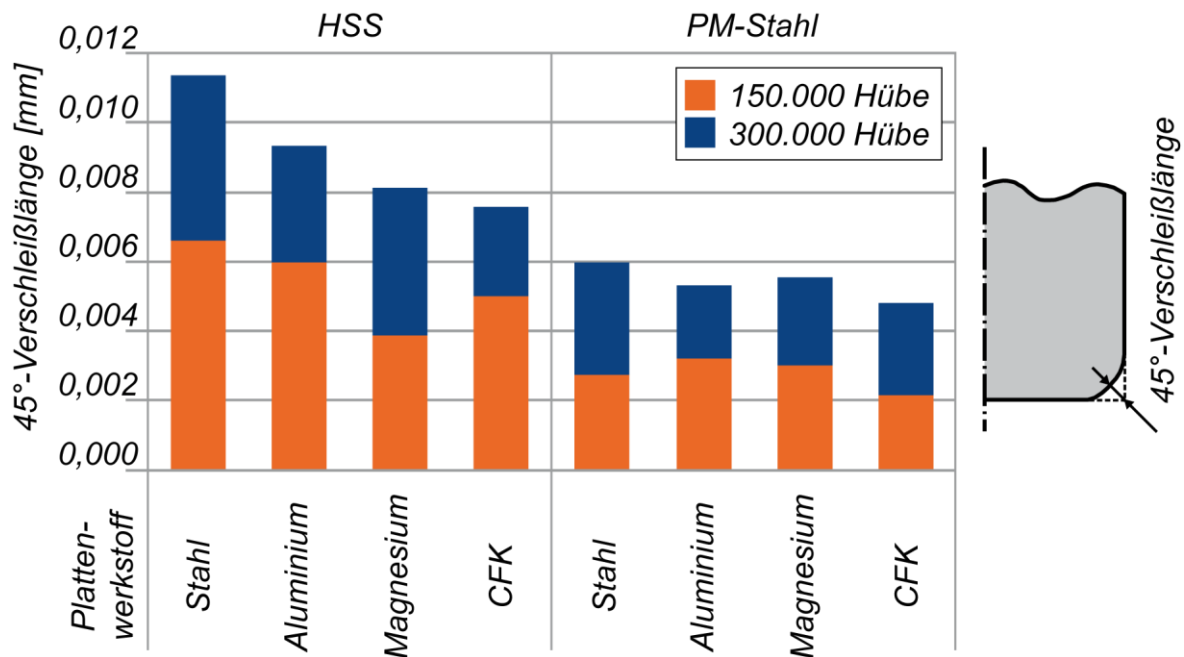


Abbildung 9.19: 45°-Verschleißlänge bei unterschiedlichen Plattenwerkstoffen, Hubfrequenz 1000 Hübe pro Minute

Bei beiden Stempelwerkstoffen ist ein deutlicher Anstieg des Verschleißes zwischen 150.000 und 300.000 Hüben erkennbar. Beim Stempelwerkstoff mit den geringsten Anschaffungskosten im Rahmen der Untersuchungen, dem konventionell hergestellten Schnellarbeitsstahl, ist der Verschleiß bei allen Plattenvarianten größer als beim PM-Stahl im Einsatz mit dem ungünstigsten Plattenwerkstoff. Bis auf eine Unregelmäßigkeit zwischen 0 und 150.000 Hüben bei Verwendung der Magnesiumplatten sinkt der Verschleiß für den Stempelwerkstoff HSS, analog zu den Auswertungen der Beschleunigungskenngrößen in Kapitel 9.4.4, mit abnehmenden Elastizitätsmodul der Plattenwerkstoffe. Im Vergleich zum Stahlwerkstoff sinkt der Mittelwert der gemessenen Verschleißkennwerte beim Aluminiumeinsatz um 18 %, bei Magnesiumplatten um 28 % und um 33 % bei Platten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.

Der pulvermetallurgisch hergestellte Stempelwerkstoff zeigt im Diagramm bei jeweils gleichem Plattenwerkstoff im Durchschnitt 40 % geringere Werte für die 45°-Verschleißlänge an. Auf diesem geringen Verschleißniveau gewinnen Messunsicherheiten und unvermeidbare Prozessschwankungen deutlich stärkeren

Einfluss, so dass beim PM-Stahl kein eindeutiges Ergebnis abgeleitet werden kann. Eine Tendenz, wie bei der Stempelgüte HSS, hin zu geringerem Verschleiß bei abnehmendem Elastizitätsmodul ist aber auch hier noch zu erkennen.

Aufgrund der Verschleißuntersuchungen bei identischen Randbedingungen kann somit ein positiver Effekt beim Einsatz von Werkzeugplatten aus Leichtbauwerkstoffen in schnellaufenden Schneidwerkzeugen nachgewiesen werden. Am deutlichsten wird dies beim Einsatz von Schneidstempeln aus konventionell hergestelltem Schnellarbeitsstahl mit der im Vergleich zum eingesetzten PM-Stahl und Hartmetallwerkstoff geringsten Verschleißbeständigkeit.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit konnte ein Beitrag zur Verschleißminimierung in schnelllaufenden Schneid- und Stanzwerkzeugen geleistet werden. Messtechnisch sowie mit Verschleißversuchen wurde der Nachweis erbracht, dass durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen als Platten in Werkzeugen das Schwingungsverhalten im Sinne von geringerem Werkzeugverschleiß positiv beeinflusst werden kann.

In Relation zu den Eigenschaften von Werkzeugplatten aus Stahl wurde das Schwingungs- und Verschleißverhalten beim Einsatz von metallischen Werkstoffen in Form einer Aluminium- sowie einer Magnesiumlegierung untersucht. Im Weiteren wurde ein kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff unter gleichen Versuchsbedingungen eingesetzt und dessen Eigenschaften bewertet. Als Verarbeitungsprozess, bei dem es zu schlagartigen Belastungen im Werkzeug kommt, wurde exemplarisch der Scherschneidvorgang betrachtet. Mit Schneidstempeln des Durchmessers 0,6 mm wurden dabei Lochoperationen an einem höherfesten Kupferblechwerkstoff durchgeführt.

Als erster Schritt war dazu die Auslegung und Konstruktion eines mehrspurigen Versuchswerkzeuges notwendig, in dem der Einfluss der Plattenwerkstoffe auf das Verschleißverhalten verschiedener Stempelwerkstoffgüten untersucht werden konnte. Grundlegende Anforderungen an das Werkzeug waren dabei eine hohe Prozessstabilität bis zu Hubfrequenzen von über 1000 Hüben pro Minute sowie die Integration von Kraft-, Weg- und Beschleunigungssensorik zur Erfassung des Werkstoffeinflusses auf den Bearbeitungsprozess. Insbesondere durch ein Konzept der Beibehaltung zentraler Komponenten des Werkzeuges beim Austausch von Kopf- und Grundplatte für die einzelnen Versuchsreihen konnte der Einfluss von Fertigungstoleranzen auf die Versuchsergebnisse minimiert werden. Ein prozessstabiler Werkzeugbetrieb wurde bis zur Maximalgeschwindigkeit der eingesetzten Schnellläuferpresse bei 1425 Hüben pro Minute erreicht.

Als Schnittstelle zum Versuchswerkzeug wurde die mechanische Presse bezüglich ihres Verhaltens im eingesetzten Hubfrequenzintervall zwischen 100 und 1425 Hüben pro Minute untersucht. Bei Variation der bewegten Massen im Werkzeug durch den Einsatz von Plattenwerkstoffen unterschiedlicher Dichte konnte ein Einfluss auf die Stößeintauchtiefe ausgeschlossen werden. Über den Hubfrequenzverlauf zeigt sich ein bei allen Plattenvarianten identisches charakteristisches Verhalten, das bei ca. 990 und 1200 Hüben pro Minute lokale Maxima aufweist. Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Werkzeugvarianten zeigten auch, dass der Nachlaufwinkel der Exzenterwelle der Presse bei einem durch die Werkzeugüberwachung herbeigeführten Sofortstopp der Maschine keine Abhängigkeit von der variierten Werkzeugmasse aufweist. Durch Messungen bei impulsartiger Anregung konnten hohe Werte für die Eigenfrequenzen des Stößels der eingesetzten Schnellläuferpresse ermittelt werden und damit der Nachweis einer hohen Pressensteifigkeit erbracht werden. Die Eigenfrequenz in z-Richtung des Stößels wurde mit 302 Hz aufgenommen. Sie liegt damit deutlich über der Pressenhubfrequenz von 16,7 Hz bzw. 1000 Hüben pro Minute, mit welcher die Dauerhubversuche durchgeführt wurden.

Vor dem Vergleich der Vorgänge während des Scherschneidprozesses mit unterschiedlichen Werkzeugplattenwerkstoffen wurden die dynamischen Eigenschaften der Platten selbst sowie die Eigenformen und –frequenzen von relevanten Werkzeugbereichen ermittelt. Die berechneten Werte für die Eigenfrequenzen aus der FE-Simulation der metallischen Plattenwerkstoffe stimmten sehr gut mit den Ergebnissen aus der Modalanalyse überein. Da die anisotropen Werkstoffeigenschaften des faserverstärkten Kunststoffes nicht zerstörungsfrei ermittelt werden konnten, war eine Simulation des Verhaltens dieses Werkstoffes nicht möglich. Die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen in Plattendickenrichtung des kohlenstofffaserverstärktem Kunststoffes liegen deutlich unter denen der metallischen Werkstoffe.

Bei der Analyse der im Kraftfluss befindlichen Werkzeugkomponenten über dem Blechwerkstoff wurden mit Hilfe der FE-Simulation zwei relevante Eigenformen für

Stempelbewegungen in z-Richtung ermittelt. Sowohl die Kipp- als auch die Zug-Eigenform konnte mit Hilfe der Kraft- und Beschleunigungssensoren messtechnisch bestätigt werden. Insbesondere die Zug-Eigenform führte im entwickelten Versuchswerkzeug ab Hubfrequenzen von 300 Hübten pro Minute zu einer Schwingungsüberlagerung über der Schneidkraft, die durch den Schneidprozess beim Aufsetzen der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff selbst angeregt wird. Die Möglichkeit der Eigenfrequenzermittlung mit Hilfe der FE-Simulation wurde beispielhaft am Versuchswerkzeug aufgezeigt und kann zur Werkzeugauslegung mit Ziel der definierten Einstellung von Frequenzen zur Schwingungsüberlagerung genutzt werden. Dieses Konzept stellt eine aussichtsreiche Alternative zum Einsatz von Piezo-Aktuatoren für diesen Zweck dar, bei denen häufig ein Kompromiss zwischen maximaler Amplitude und realisierbarer Frequenz bei gleichzeitiger Belastung durch die Schneidkraft eingegangen werden muss.

Eine messtechnische Auswertung des Einflusses unterschiedlicher Plattenwerkstoffe im Versuchswerkzeug wurde anhand der Beschleunigungssignale nach der schlagartigen Belastung durch das Aufsetzen der Schneidstempel auf den Blechwerkstoff durchgeführt. Es wurde nachgewiesen, dass die Amplituden an der Oberseite der Kopfplatte, ausgehend vom Werkstoff Stahl über Aluminium und Magnesium hin zum faserverstärktem Kunststoff ansteigen. Im Bereich der Stempelköpfe fallen die gemessenen Beschleunigungsamplituden in identischer Reihenfolge von Stahl auf CFK um die Hälfte ab. Mit diesen Ergebnissen kann im Sinne einer Minimierung der Schwingungen im Bereich der Schneidkanten ein positiver Effekt bei abnehmendem Elastizitätsmodul der untersuchten Plattenwerkstoffe festgestellt werden.

Der positive Effekt der Leichtbauwerkstoffe konnte auch mit Dauerversuchen und Verschleißmessungen an den Stempelschneidkanten belegt werden. Mit einer Hubfrequenz von 1000 Hübten pro Minute wurden für jede Werkstoffvariante bis zu einer Gesamthubzahl von 300.000 Hübten Schneidversuche durchgeführt und ausgewertet. Dabei konnte eine Reduzierung des Kennwertes für die 45°-Verschleißlänge beim Einsatz von alternativen Plattenwerkstoffen um bis zu

33 % erzielt werden. Die untersuchten Stempelwerkstoffgüten Schnellarbeitsstahl (HSS), PM-Stahl und Hartmetall zeigten dabei unterschiedliches Verschleißverhalten. Während selbst bei einer Hubzahl von 500.000 Hübem beim Hartmetallwerkstoff keine signifikante Veränderung an der Schneidkante feststellbar war, stieg insbesondere der Mantelflächenverschleiß bei Stempeln aus PM-Stahl kontinuierlich an und war beim kostengünstigsten eingesetzten Stempelwerkstoff HSS maximal.

Mit den vorliegenden umfassenden Untersuchungen konnte der Nachweis erbracht werden, dass der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen in Stanzwerkzeugen nicht nur zu einer Gewichtsersparnis mit positiven Effekten bei Transport und Umbau der Werkzeuge führt, sondern dass dadurch auch die Standmengen erhöht werden können. Vorbehalte gegenüber der spanenden Bearbeitung von Magnesiumlegierungen können mit einer Veröffentlichung von [KLEI02] ausgeräumt werden, wonach unter Berücksichtigung einiger Sicherheitsvorkehrungen eine Fräs- oder Schleifbearbeitung mit Werkzeugen aus der Aluminiumbearbeitung problemlos möglich ist. Mit steigender Verbreitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen stehen inzwischen auch für die Zerspanung dieser Werkstoffvariante spezielle Werkzeuge und Bearbeitungsempfehlungen zur Verfügung [HOFF11]. Somit können neue Werkzeuge ohne nennenswerten Mehraufwand auch mit Magnesium- oder CFK-Platten ausgeführt werden. Auch ein Austausch bereits vorhandener Werkzeugplatten durch solche aus Leichtbauwerkstoffen mit geringerem Elastizitätsmodul sollte aufgrund der zu erwartenden Standzeitverlängerung in Betracht gezogen werden.

Mit dem im Forschungsprojekt entwickelten 9-spurigen Schneidwerkzeug und der integrierten Messtechnik ist eine grundlegende Untersuchung des Schwingungsverhaltens bis hin zu hohen Pressenhubfrequenzen möglich. Durch den modularen Aufbau des Werkzeuges können damit auch weitere Werkstoffe hinsichtlich Ihrer Eignung als Werkzeugplatten getestet werden. Insbesondere eine systematische Untersuchung des Dämpfungsvermögens von möglichen Plattenwerkstoffen könnte ein Potential für eine weitere Verschleißminderung eröffnen. Als metallische Werkstoffe mit hohen Dämpfungskennwerten sind z. B. Gusseisenwerkstoffe [SEID05] oder spezielle Kupferlegierungen bzw. sogenannte High-Damping-Metals

(HIDAMETS) [RITC91], [ZAK07] bekannt. Aber auch Kunststoff oder (Kunststoff-) Verbundwerkstoffe sollten in Hinblick auf eine weitere Verbesserung der Werkzeugstandmengen untersucht werden.

11 Verzeichnisse

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Notwendige Elemente zur Herstellung von Steckkontakten.....	1
Abbildung 2.1:	Einordnung der Untergruppe Scherschneiden in die Fertigungsverfahren nach [DIN8580]	3
Abbildung 2.2:	a) Ausschneiden, b) Lochen (geschlossener Schnitt), c) Abschneiden (offener Schnitt) [DIN8588]	4
Abbildung 2.3:	Schneidkraftkomponenten beim Scherschneiden nach [LANG90]	6
Abbildung 2.4:	Schematische Darstellung des Schneidkraftverlaufes beim Scherschneiden [CAMM86], [FUGG84], [HOFF73], [SCHU96b].....	7
Abbildung 2.5:	Einflussparameter beim Scherschneiden nach [HOOG99].....	9
Abbildung 2.6:	Formen des Verschleißes an runden Schneidstempeln (a – c) Verschleißkenngrößen an einem Schneidstempel (d)	12
Abbildung 2.7:	Ausgewählte Schnittflächenkenngrößen beim Scherschneiden [VDI2906-2]	13
Abbildung 2.8:	4-Säulen-Werkzeuggestell in massiver Ausführung [STRA11]	14
Abbildung 2.9:	Dehnungsmessstreifen im Ausgangszustand (R_0), im gedehnten ($R_0+\Delta R$) und gestauchten ($R_0-\Delta R$) Zustand.....	16
Abbildung 2.10:	Piezoelektrischer Effekt im Quarz bei Schubbelastung [KIST11].....	17
Abbildung 2.11:	Beispiele für freie, gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen	19
Abbildung 2.12:	Kräftegleichgewicht am ungedämpften (a) und gedämpften (b) Feder-Masse-System	20
Abbildung 2.13:	Eigenformen eines einseitig eingespannten Biegebalkens	23
Abbildung 2.14:	Exemplarische Kraftverläufe und angeregte Frequenzen bei verschiedenen Stoßpartnern [RUHM10].....	25
Abbildung 4.1:	Seitenkanalverdichter mit Luftfilter und Butzenabscheider	33

Abbildung 5.1:	Ansichten der Grundplatte aus faserverstärktem Kunststoff.....	40
Abbildung 5.2:	Werkstoffeigenschaften von Schneidstempelwerkstoffen [FIBR11].....	44
Abbildung 6.1:	Versuchsplan	47
Abbildung 7.1:	Stempelanordnung und geschnittenes Lochbild am Blechstreifen	49
Abbildung 7.2:	Schnittdarstellung des Versuchswerkzeuges im unteren Umkehrpunkt durch eine Führungssäule bzw. die Werkzeugmitte	50
Abbildung 7.3:	Abmessungen der eingesetzten Schneidstempel [DIN9861-2]....	51
Abbildung 7.4:	Detailansicht der Stempelführung, Werkzeug 0,89 mm über UT.....	52
Abbildung 7.5:	Lagerbedingungen für Knickfälle IV (a) und III (b) nach Euler	52
Abbildung 7.6:	Kopfplattenausführung massiv (a) und geteilt (b)	53
Abbildung 7.7:	Versuchswerkzeug mit Platten in Ausführung aus metallischem Werkstoff (a) und aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (b)	54
Abbildung 7.8:	Integration der Kraftsensoren in DMS- (a) und Piezo- Bauart (b).....	56
Abbildung 7.9:	Positionen der Sensoren im Werkzeugoberteil.....	57
Abbildung 8.1:	Wirkfläche der Niederhalterkraft auf dem Blechstreifen.....	61
Abbildung 8.2:	Stößelgeschwindigkeit im Bereich des unteren Umkehrpunktes bei 1000 Hüben pro Minute	62
Abbildung 8.3:	REM-Aufnahme und Fotografien von Butzen mit \varnothing 0,6 mm.....	63
Abbildung 8.4:	Aufbau zur Vermessung der Schneidkanten­geometrie der Stempel.....	66
Abbildung 9.1:	Versuchsaufbau zur Impulsanregung der Werkzeugplatten	69
Abbildung 9.2:	Impulsanregung der Werkzeuggrundplatten a) Versuchsaufbau, b) Messergebnisse	70
Abbildung 9.3:	Eigenformen der Grundplatte mit isotropen Steifigkeitsverhalten	71

Abbildung 9.4:	Kipp- (a) und Zug-Eigenform (b) der auftretenden Schwingungen	72
Abbildung 9.5:	Messtechnischer Nachweis der Kipp-Eigenform a) Beschleunigungen Stempelkopfbereich, 300 Hübe pro Minute b) Bewegung der Stempelhalteplatte, 100 Hübe pro Minute.....	74
Abbildung 9.6:	Eintauchtiefenveränderung der Schnellläuferpresse Bruderer BSTA25BL beim Schneiden mit unterschiedlichen Hubfrequenzen	76
Abbildung 9.7:	Sensorposition bei der Eigenfrequenzmessung des Stößels.....	78
Abbildung 9.8:	Exemplarische Messergebnisse bei 100 Hüben pro Minute	80
Abbildung 9.9:	Kraft-Weg-Verlauf bei 25 Hüben pro Minute, Wegachse gespiegelt	83
Abbildung 9.10:	Kraftverlauf beim Schneiden mit Hubfrequenzen von 100, 300, 500 und 1000 Hüben pro Minute	85
Abbildung 9.11:	Kraft- und Beschleunigung bei 25 und 100 Hüben pro Minute.....	87
Abbildung 9.12:	Kraft- und Beschleunigung bei 500 und 1000 Hüben pro Minute	87
Abbildung 9.13:	Nachweis der Reproduzierbarkeit der Versuche mit zwischenzeitlichem Werkzeugumbau.....	89
Abbildung 9.14:	Auswertung der Beschleunigungssignale.....	91
Abbildung 9.15:	Amplituden der Beschleunigungen beim Einsatz der Werkzeugplattenwerkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und CFK.....	92
Abbildung 9.16:	Verschleißkurven für die Dauerhubversuchsreihe mit Stahlplatten	94
Abbildung 9.17:	REM-Aufnahmen von Schneidstempeln vor und nach den Schneidversuchen mit Stahlplatten, Stempeldurchmesser 0,6 mm	96
Abbildung 9.18:	Fotografische Dokumentation der Schneidstempel, Zustand nach 500.000 Hüben, Stempeldurchmesser 0,6 mm.....	97
Abbildung 9.19:	45°-Verschleißlänge bei unterschiedlichen Plattenwerkstoffen, Hubfrequenz 1000 Hübe pro Minute	98

Abbildung 12.1:	Polares Dämpfungsdiagramm für bidirektional verstärkte Proben eines kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes nach [NIED90]	125
Abbildung 12.2:	Lagerbedingungen und Abmessungen der Schneidstempel zur Berechnung der Knicksicherheit nach Euler Fall IV (a), Fall III (b)	126
Abbildung 12.3:	Absolutwerte der ausgewerteten Beschleunigungsamplituden a) Sensorposition im Bereich der Stempelköpfe b) Sensorposition an der Oberseite der Kopfplatte	128

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kenngrößen zur Beschreibung von Dämpfungseffekten	22
Tabelle 4.1:	Technische Daten der Schnellläuferpresse BSTA 25BL [BRUD10].....	31
Tabelle 4.2:	Technische Daten des Vorschubapparates Bruderer BBV 190/85H [BRUD10]	32
Tabelle 4.3:	Technische Daten Seitenkanalverdichter	34
Tabelle 4.4:	Technische Daten des Vorschubgerätes PCV 200 [MAHR04]	35
Tabelle 5.1:	Werkstoffkenndaten der eingesetzten Stahl- und Aluminiumplattenwerkstoffe nach [DIN10083-2] und [CERT11]	36
Tabelle 5.2:	Chemische Zusammensetzung des Magnesiumwerkstoffes AZ31B in Gewichts-% nach [ASTMB90/B90M]	37
Tabelle 5.3:	Werkstoffkenndaten der eingesetzten Magnesiumlegierung nach [SZMT08]	38
Tabelle 5.4:	Werkstoffkenndaten der eingesetzten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatten (Herstellerangaben) [AGAT09].....	41
Tabelle 5.5:	Mechanische Kennwerte für unidirektional kohlenstofffaserverstärkte Einzelschichten (Literaturangaben) [AVK10].....	42
Tabelle 5.6:	Chemische Zusammensetzung in Gewichts-% des eingesetzten Schnellarbeitsstahls HS6-5-2C nach [DIN4957]	43
Tabelle 5.7:	Chemische Zusammensetzung in Gewichts-% des pulvermetallurgisch hergestellten Stahls PM HS6-5-3 nach [DIN4957]	43
Tabelle 5.8:	Chemische Zusammensetzung des Kupferblechwerkstoffes in Gewichts-% nach [DIN1654]	45
Tabelle 5.9:	Festigkeitskennwerte des Kupferblechwerkstoffes	46
Tabelle 8.1:	Massen der Kopf- und Grundplatten in vier Werkstoffvarianten	62
Tabelle 9.1:	Eigenfrequenzen der Schwingungen der Grundplatten	71

Tabelle 9.2:	Bremswinkel der eingesetzten Schnellläuferpresse	78
Tabelle 9.3:	Ermittelte Stößeigenfrequenzen bei impulsartiger Anregung	79
Tabelle 12.1:	Übersicht der eingesetzten Sensoren	127
Tabelle 12.2:	Übersicht der eingesetzten Messmodule (National Instruments)	127
Tabelle 12.3:	Anzahl an herangezogenen Messungen zur Berechnung des Mittelwertes für die Beschleunigungskenngrößen	128

11.3 Literaturverzeichnis

- [ADAM03] Adams, R. D.; Maheri, M. R.:
Damping in advanced polymer-matrix composites
Journal of Alloys and Compounds, Vol. 355, pp. 126-130, 2003
- [AGAT09] N. N.:
Platten & Säulengestelle aus Carbon
Produktinformation, Agathon AG, Solothurn, Schweiz, 2009
- [AVK10] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.):
Handbuch Faserverbundkunststoffe; Grundlagen, Verarbeitung,
Anwendungen
3. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010
- [BACH24] Bach, E. L.:
Die Spannungen unter einem kreisrunden Stempel
Dissertation, TH Karlsruhe, 1924
- [BACH05] Bach, F.-W.; Behrens, B.-A.; Rodmann, M.; Rossberg, A.; Kurz, G.:
Macroscopic Damage by the Formation of Shear Bands during the
Rolling and Deep Drawing of Magnesium Sheets
JOM, pp. 57-61, 2005
- [BECK63] Becker, G. W.; Meißner, J.; Oberst, H.; Thurn, H.:
Elastische und viskose Eigenschaften von Werkstoffen
Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, 1963
- [BEHR05] Behrens, B.-A.; Werbs, M.; Brecher, C.; Hork, M.:
Entwicklung eines aktiven Dämpfersystems zur Reduzierung des
Werkzeugverschleißes von Schneidwerkzeugen
EFB-Forschungsbericht Nr. 242, EFB, Hannover, 2005
- [BEHR07a] Behrens, B.-A.; Marthiens, O.:
Interferenzerscheinungen in Umformmaschinen
wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 97, S. 766-771, 2007
- [BEHR07b] Behrens, B.-A.; Schaeper, E.-F.; Kamp, M.:
Oscillation overlaid shearing of sheet
Production Engineering, volume 1, pp. 19-24, 2007
- [BEHR11] Behrens, B.-A.; Pielka, T.:
Einfluss der Presseneigenschaften auf den Werkzeugverschleiß und
die Schnittflächenqualität
EFB-Forschungsbericht Nr. 338, EFB, Hannover, 2011
- [BILL02] Bill, B.:
Messen mit Kristallen: Grundlagen und Anwendungen der
piezoelektrischen Messtechnik
Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2002

-
- [BORC76] Borchert, P.:
Einflüsse der Werkzeuggeometrie und der Maschine beim Schneiden
von kaltgewalztem Elektroblech
Dissertation, TU Hannover, 1976
- [BROC70] Broch, J. T.:
Messungen von Mechanischen Schwingungen und Stößen
Brüel & Kjaer, Naerum, Dänemark, 1970
- [BRP08] N. N.:
Servopressen – erprobt im langjährigen Einsatz
Blech Rohre Profile, Heft 10, S. 80-83, 2008
- [BRUD10] N. N.:
Betriebsanleitung – Bruderer Hochleistungs-Stanzautomat, BSTA
25BL
Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz, 2010
- [BRUD11] N. N.:
BSTA 200 – Bruderer Hochleistungs-Stanzautomat
Technisches Datenblatt, Frasnacht, Schweiz, 2011
- [CAMM86] Camman, J.:
Untersuchungen zur Verschleißminderung an Scherschneidwerk-
zeugen der Blechbearbeitung durch Einsatz geeigneter Werkzeug-
stoffe und Beschichtungen
Dissertation, TH Darmstadt, 1986
- [CERT11] N. N.:
Certa[®]; Technisches Datenblatt
GLEICH Aluminiumwerk GmbH & Co. KG, Kaltenkirchen, 2011
- [CHEN10] Chen, X.; Mao, J.; Pan, F.; Peng, J.; Wang, J.:
Influence of impurities on damping properties of ZK60 magnesium
alloy
Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20,
pp. 1305-1310, 2010
- [DFBO70] N. N.:
Praktische Winke; Werkzeug 52; Kleinstzulässige Lochdurchmesser
Beilage zu den Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft
für Blechverarbeitung und Oberflächenbehandlung e. V., Nr. 7, 1970
- [DEMM11] Demmel, P.; Hirsch, M.; Golle, R.; Hoffmann, H.:
In-situ temperature measurement in the shearing zone during sheet
metal blanking
Advances in Materials and Processing Technologies, Istanbul, 2011
- [DKI05a] DKI Werkstoffdatenblatt
Werkstoff Datenblätter CuFe2P
Deutsches Kupfer Institut, Düsseldorf, 2005

-
- [DKI05b] DKI Informationsdruck i.16
Trennen und Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen
Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf, 2005
- [DOEG80] Doege, E.; Neumann, C.-P.; Schmidt, K.-H., Fugger, B.:
Einfluss des Blechwerkstoffs und des Schneidspalts auf die
Schneidbarkeit von Elektroblechen
10. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Artikel 20, 1980
- [DOEG01] Doege, E.; Derenthal, M.-J.; Weck, M.; Krell, M.; Großmann, K.;
Wiemer, H.:
Einfluss der Dämpfungseigenschaften von weggebundenen
Schnellläuferpressen auf den Werkzeugverschleiß
EFB-Forschungsbericht Nr. 171, EFB, Hannover, 2001
- [DOEG10] Doege, E.; Behrens, B.-A.:
Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen
2. Auflage, Springer, Heidelberg, 2010
- [DONG93] Dong, S.; Gauvin, R.:
Application of Dynamic Mechanical Analysis for the Study of the
Interfacial Region in Carbon Fiber / Epoxy Composite Materials
Polymer Composites, Vol. 14, Nr. 5, pp. 414-420, 1993
- [DRES06] Dresig, H.:
Schwingungen mechanischer Antriebssysteme
2. Auflage, Springer, Berlin, 2006
- [DUBB05] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.:
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau
21. Auflage, Springer, Berlin, 2005
- [EBNE11] Ebnetter, G.:
Bruderer Maschinen- und Vorschubtechnik; Lösungen mit
Servotechnologien
3. Kongress Stanztechnik, Dortmund, 2011
- [EHRE06] Ehrenstein, G. W.:
Faserverbund-Kunststoffe; Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften
2. Auflage, Carl Hanser, München, 2006
- [ERDM04] Erdmann, C.:
Mechanismen der Flitterentstehung beim Scherschneiden von
Pressteilen aus Aluminiumblech
Dissertation, TU München, 2004
- [FIBR11] N. N.:
FIBRO Normalien, Kapitel E – Präzisionsteile
Produktkatalog, FIBRO GmbH, Hassmersheim, 2011
- [FLEI80] Fleischer, G.; Gröger, H.; Thum, H.:
Verschleiß und Zuverlässigkeit
1. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1980

-
- [FRAN90] Franzmann, M.; Kalkbrenner, A.; Reimann, A.:
Die Verarbeitungseigenschaften isotroper Elektrobänder
Stahlberatung, Band 17, Heft 2, S. 8-13, 1990
- [FUGG84] Fugger, B.:
Untersuchung der Verschleißvorgänge beim Scherschneiden von
Feinblechen
Fortschr.-Ber. VDI-Z, Reihe 2, Nr. 81, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984
- [GFT7] GfT Arbeitsblatt 7
Tribologie; Verschleiß, Reibung; Definitionen, Begriffe, Prüfung
Gesellschaft für Tribologie e. V., Aachen, 2002
- [GÖKE03] Göken, J.:
Dämpfungspotential der Magnesiumlegierung AZ91 bei Raumtempe-
ratur
Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2003
- [GRAN56] Granato, A.; Lücke, K.:
Theory of Mechanical Damping Due to Dislocations
Journal of Applied Physics, Vol. 27, Nr. 6, pp. 583-593, 1956
- [GROS09] Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A.:
Technische Mechanik 2, Elastostatik
10. Auflage, Springer, Dordrecht, 2009
- [GROS11] Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.:
Technische Mechanik 4; Hydromechanik, Elemente der Höheren
Mechanik, Numerische Methoden
8. Auflage, Springer, Heidelberg, 2011
- [GRUN10] Gruner, M. P.:
Die MultiServoPresse – das Multitalent unter den Servopressen für
Bauteile der Zukunft
Tagungsband T31 des EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung,
Bad Boll, 2010
- [HALD93] Haldenwanger, H.-G.:
Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau:
Entwicklung, Berechnung, Prüfung, Einsatz von Bauteilen
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [HERI04] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.:
Physik für Ingenieure
9. Auflage, Springer, Berlin, 2004
- [HILB49] Hilbert, H. L.:
Lochen statt Bohren
Die Technik, Band 4, Nr. 8, S. 357-360, 1949

-
- [HILD70] Hildebrand, R.:
Untersuchungen über das geräuscharme Schneiden von Elektroblech in einer Vier-Säulen-Exzenterpresse
Dissertation, TU Berlin, 1970
- [HIRS09] Hirsch, M.; Golle, R.; Hoffmann, H.:
Displacements in Punching Dies and their Effect on Tool Endurance
Proceedings of the 8th International Tooling Conference (TOOL),
Vol. 1, Aachen, 2009
- [HOEN11] Hoenicka, R.:
Wirbelströme in neuem Gewand
polyscope, Heft 17, S. 38-40, 2011
- [HÖRM09] Hörmann, F.; Demmel, P.:
Qualitätsbeeinflussende Parameter (beim Scherschneiden)
Blech Rohre Profile, Heft 11, S. 14-17, 2009
- [HOFE07] Hofele, H.:
Neue Pressentechnologien für höchstfeste und pressgehärtete
Stähle
Tagungsband T27 des EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung,
Fellbach, 2007
- [HOFF73] Hoffmann, H.:
Untersuchungen über den Einfluss des statischen und dynamischen
Verhaltens einer Presse in vertikaler Richtung auf den Eintauchvor-
gang beim Schneiden
Dissertation, TU Berlin, 1973
- [HOFF87] Hoffmann, K.:
Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstrei-
fen
Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1987
- [HOFF88] Hoffmann, H.; Bareis, A.; Waller, E.:
Optimierte Schnellläuferpressen – Regelung der Stempelintauchtie-
fe verlängert die Werkzeugstandzeit
Bänder, Bleche, Rohre; Nr. 4, S. 26-27, 1988
- [HOFF09] Hoffmann, H.; Hirsch, M.:
Einfluss von Verlagerungen in Schneidwerkzeugen auf die
erreichbaren Standzeiten der Werkzeugaktivelemente
EFB-Forschungsbericht Nr. 293, Hannover, 2009
- [HOFF10] Hoffmann, H.:
Grundlagen der Entwicklung und Produktion – Umformen
Vorlesungsunterlagen, TU München, 2010
- [HOFF11] N. N.:
Broschüre: Die Welt der modernen Werkstoffe
Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge, München, 2011

-
- [HOLL07] Hollburg, U.:
Maschinendynamik
2. Auflage, Oldenbourg, München, 2007
- [HOOG99] Hoogen, M.:
Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen
von Aluminiumfeinblechen
Dissertation, TU München, 1999
- [HU10] Hu, Y.; Deng, J.; Pan, F.; Zhang, D.; Chen, Y.; Wang, J.:
Study on damping capacity of graphite particle-reinforced AZ31
magnesium matrix composites
Journal of Composite Materials, Vol. 45, Nr. 5, pp. 557-564, 2010
- [HUML81] Huml, P.; Strandell, P.O.:
Dynamic Analysis of the Tools for High Speed Metalworking
Annals of the CIRP, Vol. 30/1, 1981
- [JENN73] Jenness, J. R.; Kline, D. E.:
Dynamic Mechanical Properties of Some Epoxy Matrix Composites
Journal of Applied Polymer Science, Vol. 17, pp. 3391-3422, 1973
- [JOO05] Joo, B.-Y.; Rhim, S.-H.; Oh, S.-I.:
Micro-hole fabrication by mechanical punching process
Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, Issue 3,
pp.593-601, 2005
- [KAMM00] Kammer, C.:
Magnesium Taschenbuch
1. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [KELL01] Keller, E.; Kilgus, R.; Klein, W.; Winkow, R.:
Metalltechnik; Der Werkzeugbau
13. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2001
- [KIST11] N. N.:
Schub- oder Schereffekt
Produktinformationen, www.kistler.com, 2011
- [KLEI02] Kleiner, S.:
Magnesium und seine Legierungen
6. Internationales IWF-Kolloquium, Feinstbearbeitung technischer
Oberflächen, Egerkingen, Schweiz, 2002
- [KLOC06] Klocke, F.:
Fertigungsverfahren 4, Umformen
5. Auflage, Springer, Berlin, 2006
- [KNAE09] Kneabel, M.; Jäger, H.; Mastel, R.:
Technische Schwingungslehre
7. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009

-
- [KOEH50] Koehler, J. S.:
The Influence of Dislocations and Impurities on the Damping and the Elastic Constants of Metal Single Crystals
Symposium „Imperfections in Nearly Perfect Crystals“, 1950
John Wiley & Sons, New York, 1952
- [KOEH10] Koehldorfer, W.:
Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5 / SIMULA
3. Auflage, Carl Hanser, München, 2010
- [KÜHL03] Kühlewein, R.:
Einfluss der Prozessparameter auf das Nachschneiden schergeschnittener Konturen
Dissertation, TU München, 2003
- [KUHN11] Kuhn, D.:
Immer am Limit – Hightechstanzen von filigranen Blechteilen
blechnet, Heft 3, S. 84-87, 2011
- [KURA99] Kuratle, R. H.; Signer, A.:
Robuste Signale von mechanischen Messgrößen
Kistler Instrumente AG, Winterthur, 1999
- [LANG90] Lange, K.:
Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft
Band 3: Blechbearbeitung
2. Auflage, Springer, Berlin, 1990
- [LANG11] Langer, J.:
Kupferwerkstoffe für Steckverbinder, Kontaktfedern und Systemträger
DIEHL Metall, Sundwiger Messingwerk GmbH & Co. KG., 2011
- [LAZA68] Lazan, B. J.:
Damping of Materials and Members in Structural Mechanics
1st Edition, Pergamon Press, Oxford, 1968
- [LEHR30] Lehr, E.:
Schwingungstechnik; Ein Handbuch für Ingenieure
Springer, Berlin, 1930
- [LEIT78] N. N.:
Anleitung; LEITZ-AMR 1200 B, Raster-Elektronenmikroskop
LEITZ AMR GmbH, Wetzlar, 1978
- [LIMB94] Limberger, H.:
Stanznormalien, Normalien für den Werkzeug-, Vorrichtung- und Maschinenbau
Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1994

-
- [LOIB03] Loibl, D.:
Standzeit und Teilequalität beim Lochen von Feinblechen mit
keramischen Schneidstempeln
Dissertation, TU München, 2003
- [MAHR04] N. N.:
Betriebsanleitung Vorschubgerät MarSurf PCV 200 mit Software
MarSurf XC 20 und Beiblatt zu den technischen Daten
Mahr GmbH, Göttingen, 2004
- [MART10] Marthiens, O.; Behrens, B.-A.:
Schneidverfahren zum Vermindern eines Schnittschlags und
Schneidmaschine mit einem Kurbelantrieb zur Durchführung dieses
Verfahrens
Deutsche Patentschrift, DE 10 2008 011 024 B4, 2010
- [MATI80] Matitschka, G.; Bley, H.; Brandl, J.; Hoffmann, H.; Kreiskorte, H.:
Möglichkeiten der Lärminderung an Schneidpressen
10. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Artikel 27, 1980
- [MATU80] Matuszewski, H.:
Untersuchungen der Größe der Schnitt- und Rückzugskraft und des
Größenverhältnisses zueinander als Funktion von verschiedenen
Parametern beim Lochen von Blechen
Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2994,
Westdeutscher Verlag, Opladen, 1980
- [MÖSE10] Möser, M.; Kropp, W.:
Körperschall; Physikalische Grundlagen und technische Anwendun-
gen
3. Auflage, Springer, Heidelberg, 2010
- [MOSE92] Moser, K.:
Faser-Kunststoff-Verbund; Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [MÜLL10] Müller, M.:
Verfahren und Vorrichtung zur Schnittschlagdämpfung
Europäische Patentschrift, EP 2 054 177 B1, 2010
- [NIED90] Niederstadt, G.; Hufenbach, W.; Hanselka, H.:
Viskoelastizität und Dämpfung von CFK-Prepreg-Verbunden
Kunststoffe, Band 80, Heft 1, S. 65-69, 1990
- [NIEL94] Nielsen, L. E.; Landel, R. F.:
Mechanical Properties of Polymers and Composites
2nd Edition, Marcel Dekker Inc., New York, 1994
- [NÜRN10] Nürnberg, G.:
Untersuchungen zum Scherschneiden von Magnesiumblech unter
Serienbedingungen
Dissertation, TU München, 2010

-
- [OEHL93] Oehler, G.; Kaiser, F.:
Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge
7. Auflage, Springer, Berlin, 1993
- [OTT81] Ottl, D.:
Schwingungen mechanischer Systeme mit Strukturdämpfung
VDI Forschungsheft, Nr. 603, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981
- [PERV92] Pervez, T.; Zabarar, N.:
Transient Dynamic and Damping Analysis of Laminated Anisotropic
Plates using a Refined Plate Theory
International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 33,
pp. 1059-1080, 1992
- [PIER10] Piersol, A. G.; Paez, T. L.:
Harris' Shock and Vibration Handbook
6th Edition, McGraw-Hill, New York, 2010
- [PFEI92] Pfeiffer, F.:
Einführung in die Dynamik
2. Auflage, Teubner, Stuttgart, 1992
- [PUCK96] Puck, A.:
Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten; Modelle für die
Praxis
Carl Hanser, München, 1996
- [REIT11] Reitemeyer, M.:
Persönliche schriftliche Stellungnahme zur Frage:
„Kompensation der Geometrie des Tastelementes bei Konturmes-
sungen. Wie klein kann ein Radius gemessen werden?“
Mahr GmbH, Göttingen, 2011
- [RITC91] Ritchie, I. G.; Pan, Z.-L.:
High-Damping Metals and Alloys
Metallurgical Transactions A, Vol. 22A, pp. 607-616, 1991
- [ROMA59] Romanowski, W. P.:
Handbuch der Stanzereitechnik
VEB Verlag Technik, Berlin, 1959
- [RUHM10] Ruhm, K. H.:
Anregung schwingungsfähiger mechanischer Prozesse
Internet-Portal „Wissenschaft und Technik des Messens“,
<http://www.mmm.ethz.ch/dok01/d0000218.pdf>, 2010
- [SCHE80] Schenk, H.; Prölß, E.:
Schneidbarkeit von Elektroblechen
10. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Artikel 19, 1980

-
- [SCHM88] Schmütsch, H.-H.; Kühne, H.-J.:
Komplexe Verschleißmechanismen – Schneidbarkeit und
Maßhaltigkeit von Elektroblechen beim Scheren
Bänder Bleche Rohre, Heft 10, S. 88-97, 1988
- [SCHN69] Schnurbusch, G.:
Über die Schneidbarkeit von Elektroblechen
Dissertation, TU Berlin, 1969
- [SCHU37] N. N.:
Taschenbuch für wirtschaftliche Blechbearbeitung
3. Auflage, L. Schuler AG, Göppingen, 1937
- [SCHU96a] Schuler, L.:
Improvements in Machinery for Stamping Coins and the like
Patent Great Britain, GB000189519961A, No. 19'961, 1895
- [SCHU96b] N. N.:
Handbuch der Umformtechnik / Schuler GmbH
Springer, Berlin, 1996
- [SCHÜ07] Schürmann, H.:
Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden
2. Auflage, Springer, Berlin, 2007
- [SEID05] Seidel, W.:
Werkstofftechnik; Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung
6. Auflage, Carl Hanser, München, 2005
- [SEML11] Semlitsch, K.-H.; Zöttl, A.:
Vorrichtung zum Formen oder Bearbeiten von Werkstücken
Europäische Patentanmeldung, EP 2 273 857 A1, 2011
- [SIEM10] N. N.:
spektrum METAL FORMING; Artikel „Beeindruckende Ergebnisse“
Siemens AG, Nürnberg, 2010
- [SOMM10] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.:
Verschleiß metallischer Werkstoffe
1. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010
- [SPUR85] Spur, G.:
Handbuch der Fertigungstechnik; Band 2/3 Umformen und Zerteilen
Carl Hanser, München, 1985
- [STELL93] Stellbrink, K.:
Dimensionierung von Kraffteinleitungen in FVW-Strukturen
Mitteilung der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und
Raumfahrt e. V. (DLR), Nr. 93-12, Stuttgart, 1993
- [STRA11] N. N.:
STRACK Normalien, Präzisions-Säulengestelle
Produktkatalog, STRACK NORMA GmbH & Co. KG, Lüdenscheid,
2011

- [SZMT08] N. N.:
Produkte und Produkt-Informationen; Magnesium Walzprodukte
Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH, Salzgitter, 2008
- [TIMM53] Timmerbeil, F. W.:
Einflüsse auf die Rückzugskräfte beim Lochen von Blechen
Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, Nr. 24,
S. 308-313, 1953
- [TIMM56] Timmerbeil, F. W.:
Der Einfluss der Schneidkantenabnutzung auf den Schneidvorgang
am Blech
Werkstattstechnik und Maschinenbau, 46. Jg., Heft 2, S. 58-66, 1956
- [TOUS00] Toussaint, A.:
Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Teilequalität beim
Scherschneiden von Elektroblechen
Dissertation, TU München, 2000
- [WIEL01] N. N.:
Abnahmeprüfzeugnis 3.2.B nach EN10204;
Halbzeug: 230 Band verzinkt; Werkstoff: Wieland K65 CuFe2P
Wieland-Werke AG, Ulm, 2001
- [WIEL11] N. N.:
Wieland-K65[®] Walzprodukte, CuFe2P, C19400
Produktdatenblatt Wieland-Werke AG, Ulm, 2011
- [WIEM04] Wiemer H.:
Stand und Möglichkeiten der Systemsimulation von mechanischen
Pressmaschinen
Dissertation, TU Dresden, 2004
- [WITT96] Wittenburg, J.:
Schwingungslehre, Lineare Schwingungen, Theorie und Anwendun-
gen
Springer, Berlin, 1996
- [WITT11] Wittig, A.:
Prozess begleitender Werkzeugbau: Messtechnische Lösungen im
Umformwerkzeug
31. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Hochfeste und hybride
Materialien, Schnelle Umform- und Fügeverfahren, Bad Boll, 2011
- [ZAK07] Zak, H.:
Kupferlegierung mit hoher Dämpfungskapazität und Verfahren zu
ihrer Herstellung
Offenlegungsschrift, DE 10 2005 035 709 A1, 2007
- [ZWIC07] N. N.:
Betriebsanleitung Zwick DUPS
Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, 2001 mit Ergänzung von 2007

11.4 Normen und Richtlinien

- [ASTMB90/B9 0M] ASTM B 90/B 90M – 07
Standard Specification for Magnesium-Alloy Sheet and Plate
ASTM International, United States, 2007
- [DIN485-2] DIN EN 485 Teil 2:
Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche und Platten;
Teil 2: Mechanische Eigenschaften
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2004
- [DIN1311-1] DIN 1311 Blatt 1:
Schwingungen und schwingungsfähige Systeme,
Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2000
- [DIN1311-2] DIN 1311 Blatt 2:
Schwingungen und schwingungsfähige Systeme, Teil 2: Lineare,
zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2000
- [DIN1412] DIN EN 1412:
Kupfer und Kupferlegierungen; Europäisches Werkstoffnummernsystem
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1995
- [DIN1654] DIN EN 1654:
Kupfer und Kupferlegierungen; Bänder für Federn und Steckverbinder
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1998
- [DIN2564] DIN EN 2564:
Kohlenstofffaser-Laminat – Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1998
- [DIN4287] DIN EN ISO 4287:
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2010
- [DIN4957] DIN EN ISO 4957:
Werkzeugstähle
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2001
- [DIN6508-1] DIN EN ISO 6508 Teil 1:
Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell –
Teil 1: Prüfverfahren
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2006

-
- [DIN7500-1] DIN EN ISO 7500 Teil 1:
Metallische Werkstoffe – Prüfung von statischen einachsigen
Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Prüfung
und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2004
- [DIN8580] DIN 8580:
Fertigungsverfahren, Begriffe, Einteilung
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2003
- [DIN8588] DIN 8588:
Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2003
- [DIN9861-1] DIN 9861 Blatt 1:
Runde Schneidstempel mit durchgehendem Schaft bis 20 mm
Schneiddurchmesser
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1992
- [DIN9861-2] DIN 9861 Blatt 2:
Runde Schneidstempel mit abgesetztem Schaft bis 5,5 mm
Schneiddurchmesser
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1993
- [DIN10002-1] DIN EN 10002 Teil 1:
Metallische Werkstoffe; Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei
Raumtemperatur
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2001
- [DIN10002-5] DIN EN 10002 Teil 5:
Metallische Werkstoffe; Zugversuch – Teil 5: Prüfverfahren bei
erhöhter Temperatur
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 1992
- [DIN10027-1] DIN EN 10027 Teil 1:
Bezeichnungssysteme für Stähle – Teil 1: Kurznamen
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2005
- [DIN10083-2] DIN EN 10083 Teil 2:
Vergütungsstähle – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für
unlegierte Stähle
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2006
- [DIN13148] DIN EN 13148:
Kupfer und Kupferlegierungen – Feuerverzinnte Bänder
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2010
- [DIN24041] DIN 24041:
Lochplatten – Maße
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2002

- [DIN50125] DIN 50125:
Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth, Berlin, 2009
- [VDI2014-2] VDI-Richtlinie 2014 Blatt 2:
Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund;
Konzeption und Gestaltung
VDI, Beuth, 1993
- [VDI2906-2] VDI-Richtlinie 2906 Blatt 2:
Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von
Werkstücken aus Metall, Scherschneiden
VDI, Beuth, Berlin, 1994
- [VDI3368] VDI-Richtlinie 3368:
Schneidspalt-, Schneidstempel- und Schneidplattenmaße für
Schneidwerkzeuge der Stanztechnik
VDI, Beuth, Berlin, 1982
- [VDI3830-1] VDI-Richtlinie 3830 Blatt 1:
Werkstoff- und Bauteildämpfung; Einteilung und Übersicht
VDI, Beuth, Berlin, 2004
- [VDI3830-2] VDI-Richtlinie 3830 Blatt 2:
Werkstoff- und Bauteildämpfung; Dämpfung in festen Werkstoffen
VDI, Beuth, Berlin, 2004

12 Anhang

12.1 Dämpfungsdiagramm eines faserverstärkten Kunststoffes

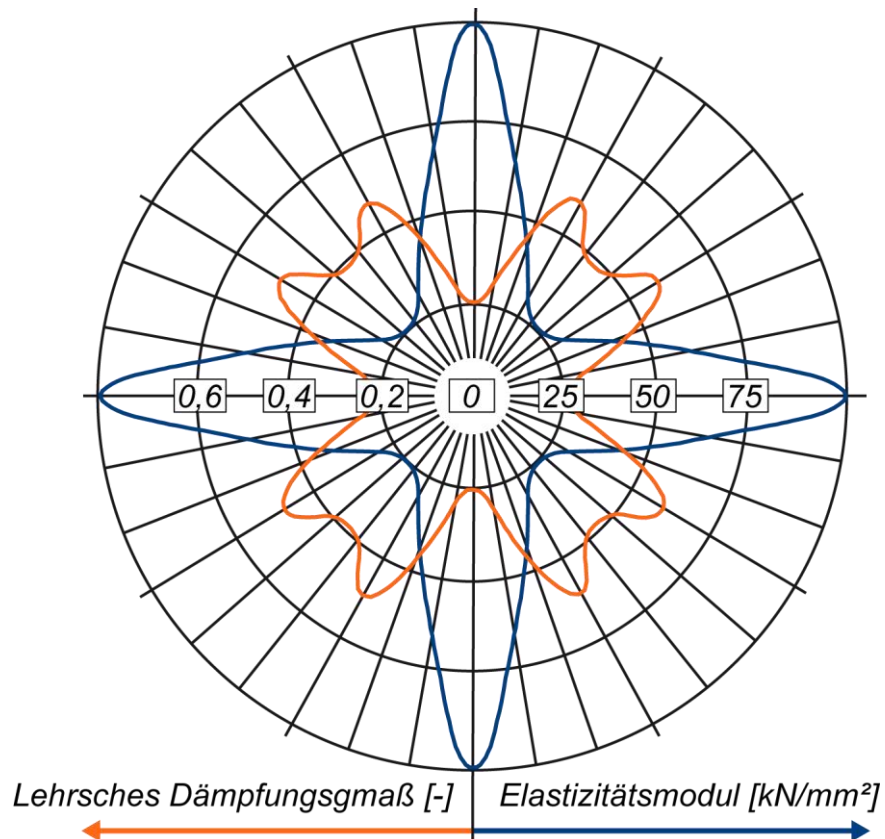


Abbildung 12.1: Polares Dämpfungsdiagramm für bidirektional verstärkte Proben eines kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffes nach [NIED90]
Matrix: Mischpolymer aus Epoxidharz und Bismaleinimid
Faser: C-Fasern, Typ T 800

12.2 Sicherheit gegenüber elastischem Knicken der Schneidstempel

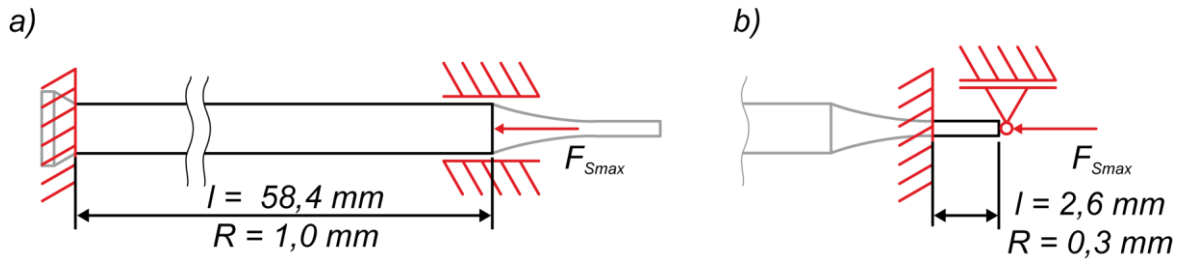


Abbildung 12.2: Lagerbedingungen und Abmessungen der Schneidstempel zur Berechnung der Knicksicherheit nach Euler Fall IV (a), Fall III (b)

$$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2} \quad \text{Formel für elastisches Knicken nach Euler} \quad (12.1)$$

$$\text{mit } l_k = 0,5 \cdot l \quad \text{für Fall IV (a)} \quad (12.2)$$

$$\text{mit } l_k = 0,7 \cdot l \quad \text{für Fall III (b)} \quad (12.3)$$

$$\text{und } I = \frac{\pi \cdot R^4}{4} \quad \text{Flächenträgheitsmoment für Zylinder} \quad (12.4)$$

F_{krit}	Kritische Kraft für elastisches Knicken [N]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
I	Flächenträgheitsmoment [mm ⁴]
l_k	Relevante Knicklänge [mm]
l	Tatsächliche Länge [mm]

Für die Berechnungen wurden die folgenden Kennwerte herangezogen:

F_{Smax}	=	160 N
E	=	210 000 N/mm ²
l_{Schaft}	=	58,4 mm
R_{Schaft}	=	1,0 mm
l_{Schneid}	=	2,6 mm
R_{Schneid}	=	0,3 mm

Damit ergeben sich die Sicherheiten gegenüber elastischem Knicken:

$$\text{Stempelschaft (a)} = 3,45$$

$$\text{Schneidbereich (b)} = 4,99$$

12.3 Kennwerte der eingesetzten Messtechnik

Signaltyp	Hersteller	Bezeichnung	Messbereich	Maße [mm]
Weg	Baumer	IWFM 18	0 – 2 mm	l 18; b 13; h 10
Weg	Micro-Epsilon	U3	0 – 3 mm	Ø M12x1; l 20
Kraft	Kistler	4576A5	± 5 kN	Ø 54,5; h 16
Kraft	Kistler	9021A	0 – 35 kN	Ø 22,5; h 10
Beschleunigung	Kistler	8772A50	± 50 g	□ 12,7
Beschleunigung	Kistler	8702B500	± 500 g	Ø 12,2; h 16
Beschleunigung	Kistler	8688A50	± 50 g	□ 12,5

Tabelle 12.1: Übersicht der eingesetzten Sensoren

Signalart	Typ	Eingangssignal	Kanäle	Abtastrate	Auflösung
Spannung	NI 9215	± 10 V	4	100 kS/s	16 bit
Brückenschaltung	NI 9237	± 25 mV/V	4	50 kS/s	24 bit

Tabelle 12.2: Übersicht der eingesetzten Messmodule (National Instruments)

12.4 Absolutwerte der ausgewerteten Beschleunigungsamplituden

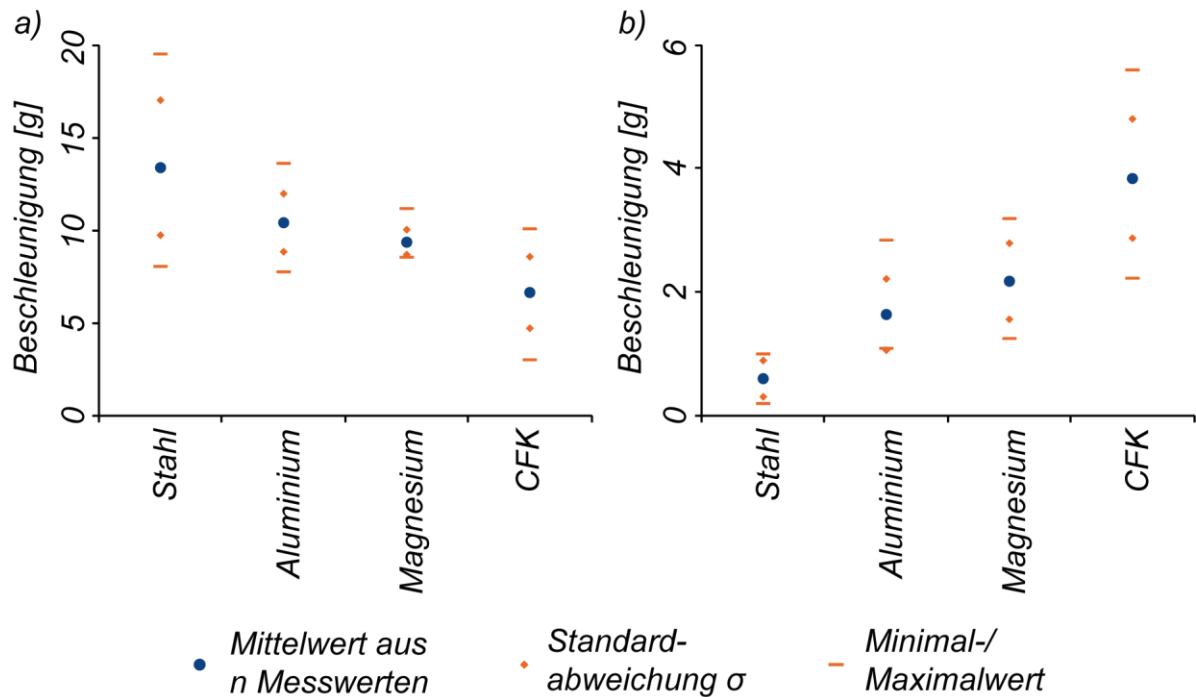


Abbildung 12.3: Absolutwerte der ausgewerteten Beschleunigungsamplituden
 a) Sensorposition im Bereich der Stempelköpfe
 b) Sensorposition an der Oberseite der Kopfplatte

	Stahl	Aluminium	Magnesium	CFK
Sensorposition im Stempelkopfbereich	20	22	29	45
Sensorposition an der Oberseite Kopfplatte	11	12	17	23

Tabelle 12.3: Anzahl an herangezogenen Messungen zur Berechnung des Mittelwertes für die Beschleunigungskenngrößen