

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen  
der Technischen Universität München

## **Dynamische Belastungen von Lochstempeln beim Scherschneiden**

**Josef Mair**

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. Karsten Stahl

Die Dissertation wurde am 20.01.2015 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 06.07.2015 angenommen.



utg-Forschungsberichte

Band 72

**Josef Mair**

**Dynamische Belastungen von Lochstempeln  
beim Scherschneiden**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4500-0

ISSN 2366-505X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*„Man muss gelehrt sein, um Einfaches kompliziert sagen zu können;  
und weise, um Kompliziertes einfach sagen zu können.“*

*Charles Tschopp*



## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen und wäre ohne fremde Hilfe nicht möglich gewesen. Somit bin selbstverständlich auch ich vielen Unterstützern, Helfern und Förderern zu Dank verpflichtet. Eindrucksvoll blieb mir aber das Vorwort eines Kollegen in Erinnerung, der statt einer zwangsläufig unvollständigen Danksagung die Wirren und Widerstände auf dem Weg zu seiner Promotion schilderte und damit vielen Doktoranden und mir Mut zusprach. Man möge es mir deshalb verzeihen, dass auch ich ohne einzelne namentlich hervorzuheben vorbehaltlos allen die zum Gelingen dieser Arbeit beitragen ein herzliches Vergelts Gott ausspreche und an dieser Stelle meine persönlichen Beobachtung revue passieren lasse.

Das Verfassen einer Dissertation ist keine Generalprobe. Treten unkalkulierbare Ereignisse auf, sind sie situativ zu lösen. Allein diese Stolpersteine zehren schon einen Großteil der Leidensfähigkeit auf, die es sprichwörtlich mit einer Promotion zu demonstrieren gilt. Sie sind aber dank eines geteilten Leides und tröstender Worte der Kollegen gut zu bewältigen. Der Blick hinter die Kulissen der rosigen Forschungslandschaft eröffnet allerdings zusätzliche Blickwinkel. Dabei können nicht nur die wiederkehrenden Plagiatsdiskussionen den angestrebten Titel in ein anderes Licht rücken. Neben der Qualität einer Messung unterliegt eben auch die Interpretation der geforderten guten wissenschaftlichen Praxis einer systembedingten, inhärenten Schwankung. So wird man keine einheitlichen Maßstäbe finden, die an eine Arbeit anzulegen sind um alle Kritiker zu begeistern.

Das mag zunächst ernüchternd wirken. Es zwingt aber letztlich dazu, sich differenziert mit seinen Ergebnissen sowie seinen Möglichkeiten auseinanderzusetzen. Man beginnt die zugeteilte Rolle selbst zu interpretieren, Freiheiten zu nutzen und Ziele zu gestalten. So wird der Ausflug in die Forschungswelt mehr als eine kalkulierbare Stufe auf der Karriereleiter und zeigt sich der eigentliche Nutzen für die persönliche Entwicklung und den weiteren Lebensweg. Auch das Leben ist keine Generalprobe und jeder ist selbst verantwortlich für das, was er auf die Bühne bringt. Um hierbei am Ende der Aufführung zufrieden zurückblicken zu können, ist es schließlich entscheidend, seinen eigenen Ansprüchen gerecht zu werden.



*Für Jonas, Jonathan und den Kobold*



## **Kurzfassung**

Beim Scherschneiden von hochfesten Blechwerkstoffen sind die Aktivelemente der Stanzwerkzeuge sehr großen Belastungen ausgesetzt. Für eine anwendungsgerechte Auslegung der Schneidstempel sind Kenntnisse über diese Beanspruchung unerlässlich. In dieser Arbeit wurden mittels Dehnmessstreifen die dynamischen Kräfte unmittelbar an der Stempelanbindung während eines Lochvorgangs in Abhängigkeit verschiedener Prozess- und Werkzeugparameter aufgezeichnet. Aus den ermittelten Kraftverläufen konnten in Kombination mit analytischen und simulativen Schwingungsmodellen Wirkzusammenhänge abgeleitet und beschrieben werden, die das Prozessverständnis verbessern und für eine belastungsgerechte Auslegung von Schneidwerkzeugen herangezogen werden können.

## **Abstract**

In the course of shear cutting high-strength sheet metal, the cutting elements of punching tools are exposed to very high loads. Knowledge of these stresses is essential for an application-specific design of cutting punches. In this thesis, the dynamic forces were measured by strain gauges applied directly at the punch connection during a punching process using various process and tool parameters. Based on the determined force progression in combination with simulative and analytic oscillation-models, causal associations which allow an improved comprehension of the process and can be used for load-capable design of cutting tools could be clearly derived and analyzed.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Kurzzeichen .....</b>	<b>VI</b>
Lateinische Buchstaben .....	VI
Griechische Buchstaben .....	VIII
Indizes .....	IX
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen der Schwingungslehre und Maschinendynamik .....	3
2.1.1 Grundbegriffe der Schwingungslehre .....	3
2.1.2 Analyse von Schwingungssignalen .....	4
2.1.3 Modellbildung realer Schwingungssysteme.....	6
2.2 Eigenschaften von Schwingungssystemen .....	7
2.2.1 Lineare Schwinger mit einem Freiheitsgrad .....	7
2.2.2 Anregung von Schwingungssystemen.....	8
2.2.3 Dämpfung von Schwingungssystemen.....	10
2.2.4 Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden .....	11
2.2.5 Kontinuierliche Schwingungssysteme .....	12
2.3 Grundlagen des Fügens.....	13
2.3.1 Grundlagen des Lötens .....	13
2.3.2 Grundlagen des Klebens .....	15
2.4 Grundlagen des Scherschneidens .....	17
2.4.1 Einteilung und Begriffe von Schneidverfahren.....	17
2.4.2 Einteilung und Aufbau von Schneidwerkzeugen .....	18
2.4.3 Verfahrensablauf des Scherschneidens .....	20
2.4.4 Kräfte während des Schneidvorgangs.....	21

---

2.5	Dynamische Vorgänge beim Scherschneiden .....	22
2.5.1	Transiente Anregung durch Stoßvorgänge.....	22
2.5.2	Entlastungs- und Ausschwingvorgänge.....	24
2.6	Schneidstempel und Stempelbefestigung .....	26
2.6.1	Schneidstempelbauformen und ihre Eigenschaften .....	26
2.6.2	Stempelanbindungsarten und ihre Eigenschaften .....	27
2.6.3	Richtlinien zur Stempelbefestigung im Schneidwerkzeug .....	28
2.6.4	Standzeit und Versagen von Schneidstempeln .....	29
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Aufgabenstellung.....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsanlagen und -einrichtungen .....</b>	<b>33</b>
4.1	Universalprüfmaschine.....	33
4.2	Einrichtung zur Schwingungsmessung .....	33
4.3	Schnellläuferpresse .....	33
4.4	Schneidwerkzeug mit Messtechnik zur Prozesskraftermittlung.....	34
<b>5</b>	<b>Verwendete Blechwerkstoffe .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Verwendete Versuchsstempel .....</b>	<b>39</b>
6.1	Geometrien der Versuchsstempel.....	39
6.2	Verwendete Werkzeugwerkstoffe .....	41
6.3	Auslegung der Löt- und Klebeverbindung .....	42
6.3.1	Verwendete Lote und Fügespalte.....	42
6.3.2	Verwendete Klebstoffe und Fügespalte.....	43
6.4	Gesamtübersicht der verwendeten Versuchsstempel .....	44
<b>7</b>	<b>Versuchsplan.....</b>	<b>45</b>

---

<b>8</b>	<b>Bestimmung der Stempel- und Anbindungseigenschaften .....</b>	<b>47</b>
8.1	Statische Eigenschaften der Stempelanbindungen.....	47
8.1.1	Zug- und Druckversuche .....	47
8.1.2	Zugfestigkeit, Zugsteifigkeit und Drucksteifigkeit der Anbindungen.....	48
8.2	Dynamische Eigenschaften der Versuchsstempel .....	52
8.2.1	Ausschwingungsversuche .....	52
8.2.2	Eigenfrequenzen der longitudinalen Stempelleigenschwingungen .....	54
<b>9</b>	<b>Schneidversuche zur Messung der dynamischen Belastung .....</b>	<b>57</b>
9.1	Untersuchte Versuchsparameter .....	57
9.1.1	Variation der Hubfrequenz.....	57
9.1.2	Variation des Schneidspalts .....	57
9.1.3	Variation des axialen Kopfspiels.....	58
9.1.4	Variation der Stempelanbindung .....	59
9.2	Durchführung der Schneidversuche.....	59
9.3	Erfassung der Prozesskräfte .....	60
9.4	Datenverarbeitung und -auswertung.....	61
<b>10</b>	<b>Modellbildung und Simulation .....</b>	<b>63</b>
10.1	Mechanisches Ersatzmodell des Versuchsaufbaus.....	63
10.2	Finite-Elemente-Modell zur Variation der Kontaktbedingung .....	64
10.3	Analytisches Berechnungsmodell zur Variation der Anbindungssteifigkeit ..	66
<b>11</b>	<b>Modellverifizierung und Kalibrierung der Simulation .....</b>	<b>69</b>
11.1	Verifizierung des mechanischen Ersatzmodells.....	69
11.2	Kalibrierung der Simulations- und Berechnungsmodelle .....	71
11.3	Beurteilung des Finite-Elemente-Modells .....	72

---

<b>12 Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>75</b>
12.1 Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen .....	75
12.2 Beeinflussung der Schnittschlagkraft durch die Schwingungsanregung .....	77
12.2.1 Einfluss der Hubfrequenz .....	77
12.2.2 Einfluss des Schneidspalts .....	79
12.3 Beeinflussung der Schnittschlagkraft durch den Ausschwingvorgang .....	83
12.3.1 Einfluss des axialen Kopfspiels .....	83
12.3.2 Einfluss der Anbindungssteifigkeit .....	91
12.4 Übertragung der Ergebnisse auf reale Schneidprozesse .....	95
12.4.1 Schwingungsanregung realer Entlastungsvorgänge .....	95
12.4.2 Berechnung der Stempelflugdauer .....	97
12.4.3 Abstimmung des axialen Kopfspiels .....	99
12.4.4 Bewertung von Stempelkopfformen und -anbindungen .....	104
<b>13 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>107</b>
<b>14 Verzeichnisse .....</b>	<b>111</b>
14.1 Abbildungsverzeichnis .....	111
14.2 Tabellenverzeichnis .....	116
14.3 Literaturverzeichnis .....	117
14.4 Normen und Richtlinien .....	128
14.5 Studienarbeiten .....	130

---

<b>15 Anhang</b> .....	<b>131</b>
15.1 Konstruktionszeichnungen Sonderstempel.....	131
15.1.1 Massiver Stempel.....	131
15.1.2 Gelöteter Stempel.....	132
15.1.3 Verstifteter Stempel.....	134
15.1.4 Geschraubter Stempel.....	136
15.1.5 Geklebter Stempel.....	138
15.1.6 Schaftgeometrie für Zug- und Druckversuche.....	140
15.2 Kraft-Dehnungs-Verlauf der Druckversuche.....	141
15.3 Schaltplan Messaufbau.....	142
15.4 Blockdiagramm des gekoppelten Kontinuumsschwingers.....	143
15.5 Tabellarischer Anhang der Schneidversuche.....	144
15.5.1 Daten der Schneidkraft bei verschiedenen Hubfrequenzen.....	144
15.5.2 Daten der Schneidkraft bei verschiedenen Schneidspalten.....	144
15.5.3 Daten der Schneidkraft bei verschiedenen Kopfspielen.....	144
15.5.4 Daten der Schneidkraft verschiedener Stempelanbindungen.....	145

## Verzeichnis der Kurzzeichen

### Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	mm	axiales Kopfspiel
$A$	%	Bruchdehnung
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung
$b$	mm	Fügespaltbreite
$b_E$	mm	Kanteneinzugsbreite
$c$	N/m	Federkonstante
$c_L$	N/m	longitudinale Steifigkeit
$c_A$	N/m	Anbindungssteifigkeit
$d$	mm	Schichtdicke
$D$	-	Dämpfungsgrad, Dämpfungsmaß nach Lehr
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$E_{kin}$	J	kinetische Energie
$E_{osz}$	J	Schwingungsenergie
$E_{pot}$	J	potenzielle Energie
$f$	1/s, Hz	Frequenz
$f_A$	1/s, Hz	Abtastrate
$f_H$	1/min	Hubfrequenz der Presse
$f_{max}$	1/s, Hz	maximale Auswertfrequenz
$f_M$	1/s, Hz	gemessene Frequenz
$f_S$	1/s, Hz	Signalfrequenz
$f_0$	1/s, Hz	ungedämpfte Eigenfrequenz
$f_{0,n}$	1/s, Hz	Eigenfrequenz der n-ten Schwingungsform; Grundfrequenz für $n = 1$
$F$	N	Kraft
$F_A$	N	Anbindungskraft
$\hat{F}_A$	N	Anregungsamplitude der Anbindungskraft

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$F_{Ab}$	N	Abrisskraft
$F_D$	N	Dämpfungskraft
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibungskraft
$F_{Rz}$	N	Rückzugskraft
$F_S$	N	Schneidkraft
$F_{Ss}$	N	Schnittschlagkraft
$F_{S,max}$	N	Schneidkraftmaximum
$h_E$	mm	Kanteneinzugshöhe
$h_G$	mm	Schnittgrathöhe
$h_B$	mm	Bruchflächenhöhe
$h_S$	mm	Glattschnitthöhe
$i$	-	mathematische Zählvariable der Schwingungsperioden
$I$	Ns	Kraftstoß, Impulsänderung
$k$	Ns/m	Dämpfungskonstante
$k_S$	N/mm <sup>2</sup>	Schneidwiderstand
$l$	m	Länge
$m$	kg	Masse
$n$	-	mathematische Zählvariable der Eigenschwingungsformen
$p$	kgm/s	Impuls
$p_K$	mbar	kapillarer Fülldruck
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{m,A}$	N	Festigkeit der Anbindung
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
$s$	m	Blechdicke
$S$	m <sup>2</sup>	Fläche, Querschnittsfläche
$t$	s	Zeit
$t_A$	s	Anregungszeit

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$T$	s	Schwingungsdauer
$u$	mm, %	Schneidspalt
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v_{Sk}$	m/s	mittlere Geschwindigkeit des Stempelkopfs
$v_{St}$	m/s	mittlere Geschwindigkeit des Stempels
$v_L$	m/s	Longitudinalwellengeschwindigkeit
$w$	1/Hz	spektrale Energiedichte
$x$	-	unabhängige Variable, Schwingungsvariable
$\hat{x}$	-	Amplitude der Schwingung
$x_m$	-	Mittellage der Variablen
$z$	m	Auslenkung, axiale Verschiebung

### Griechische Buchstaben

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\delta$	-	Abklingkonstante
$\lambda$	-	Eigenwert der Frequenzgleichung gekoppelter Kontinuumsschwinger
$\mu$	-	Reibungskonstante
$\nu$	-	Querkontraktionszahl; Poissonzahl
$\Pi$	-	Dimensionslose Kennzahl der Frequenzgleichung eines gekoppelten Kontinuumsschwingers
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_d$	N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit
$\tau_B$	N/mm <sup>2</sup>	Zugscherfestigkeit
$\varphi_0$	rad	Nullphasenwinkel
$\omega$	rad/s	Kreisfrequenz
$\omega_d$	rad/s	gedämpfte Eigenkreisfrequenz
$\omega_R$	rad/s	Resonanzkreisfrequenz
$\omega_0$	rad/s	ungedämpfte Eigenkreisfrequenz

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\omega_{0,n}$	rad/s	Eigenkreisfrequenz der $n$ -ten Schwingungsform; Grundkreisfrequenz für $n = 1$
$\Omega$	rad/s	Erregerkreisfrequenz
$\Omega_{\max}$	rad/s	maximale Erregerkreisfrequenz

### **Indizes**

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
--------------	------------------

(tiefgestellt)

$a$	axiales Kopfspiel
D	Druck
E295	unlegierter Stahl E295 nach DIN EN 10025-2
ges	gesamt
K	Klebeverbindung
Kf	Kopffläche
L	Lötverbindung
max	maximal
min	minimal
Ms	Masseschwerpunkt
$n$	Zählvariable der $n$ -Eigenformen
Sch	Schaft
Sensor	Sensor
Ss	Schnittschlag
Sf	Stirnfläche
Sk	Stempelkopf
St	Stempel
S235	unlegierter Stahl S235 nach DIN EN 10025-2
Z	Zug

## Abkürzungen

<b>Kürzel</b>	<b>Bedeutung</b>
Ag	Silber
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DMS	Dehnmessstreifen
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	<i>engl.</i> , Fast-Fourier-Transformation, schnelle Fourier-Transformation
HSS	<i>engl.</i> , High-Speed-Steel, Schnellarbeitsstahl
LSB	<i>engl.</i> , Least-Significant-Bit, niedrigstwertiges Bit
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Sn	Zinn
Zn	Zink
3-D	dreidimensional