

# Schwingungsüberlagertes Stauchen von Aluminium

Hagen Schmidt

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Leibniz Universität Hannover (LUH)

An der Universität 2

30823 Garbsen

Verschiedenste Untersuchungen in der Vergangenheit lassen den Schluss zu, dass die Überlagerung von Umformprozessen mit Schwingungen die Herabsetzung von Prozesskräften und damit eine Vielzahl möglicher Vorteile bewirken kann. Über die Anwendung von Schwingungen im Hörschallbereich insbesondere für den Bereich der Massivumformung und über die Ursachen möglicher positiver Effekte ist noch wenig bekannt. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurden grundlegende Untersuchungen schwingungsüberlagerter Stauchprozesse unter für die Massivumformung typischen Bedingungen durchgeführt.

**Schlüsselwörter:** Schwingungsüberlagerung, Massivumformung, Stauchen, Reibungseinfluss

## **Einleitung**

Eine mögliche Beeinflussung des Umformverhaltens metallischer Werkstoffe durch die Nutzung von Schwingungen ist bereits seit Mitte der 1950er Jahre Gegenstand von Forschungsarbeiten. Untersuchungen diverser Umformprozesse haben in der Vergangenheit gezeigt, dass der Kraft- und Energiebedarf für die Umformung durch die Einbringung von Schwingungen in Werkzeuge bzw. Werkstücke reduziert werden kann. Einen umfassenden Überblick über frühe Arbeiten auf dem Gebiet gibt /1/. Neuere Untersuchungen werden in /2/ zusammengefasst.

In jüngsten Forschungsvorhaben konzentrierten sich die Autoren auf die Anwendung von Ultraschall beim Draht- bzw. Rohrziehen /3/ und bei der Umformung von Leichtmetallen /4/. Der Einfluss von Schwingungen im Hörschallbereich wurde dargestellt für das Pulverpressen mit schwingender Matrize /5/, das Umformen mit direkt angetriebenen Umformmaschinen /6/ und das Scheren mit oszillierenden Schermessern /7/. Dabei wird von den jeweiligen Autoren in /5/ und /6/ darauf hingewiesen, dass der Beeinflussung von Reibverhältnissen durch die Anwendung von Schwingungen erhebliche Bedeutung zugemessen wird.

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Untersuchungen zum Einfluss der Schwingungen auf den Warmmassivumformprozess“ sollte der Einfluss von solchen Schwingungen auf das Gesenkschmieden systematisch untersucht werden, deren Frequenzbereich unterhalb dem des Ultraschalls liegt.

## **Methode der Schwingungserzeugung**

Umformprozesse in der Warmmassivumformung sind gekennzeichnet durch hohe Prozesstemperaturen, da oberhalb der Rekristallisationstemperatur der bearbeiteten Werkstoffe gearbeitet wird. Damit ergeben sich, verglichen mit der Kaltumformung, zugleich niedrigere Presskräfte. Um die thermische Belastung der Werkzeuge durch den Kontakt mit den erwärmten Rohteilen gering zu halten, sind kurze Taktzeiten und entsprechend hohe Umformgeschwindigkeiten erforderlich. Typische Umformmaschinen sind beispielsweise hydraulische Pressen, Kurbelpressen, Spindelpressen und Hämmer.

Verschiedene Methoden der Schwingungserzeugung sind im Vorfeld auf ihre mögliche Eignung in der Warmmassivumformung hin geprüft worden. Dabei wurden Varianten mechanischer Schwingungsanregung (pneumatische Vibratoren bzw. Klopper, hydraulische Systeme) und elektro-magnetische Systeme (Piezoaktoren, magnetostriktive Erreger) insbesondere unter konstruktiven Aspekten verglichen.

Pneumatische Systeme schieden für Grundlagenuntersuchungen aus. Zwar erreichen kommerziell verfügbare Turbinenvibratoren Frequenzen bis 600 Hz und erzeugen Fliehkräfte bis zu 12 kN, jedoch verhalten sich beide Leistungsparameter umgekehrt proportional zueinander. Große Kraftentfaltung geht immer einher mit niedrigen Vibrationsfrequenzen. Durch die Abhängigkeit der Fliehkraft von der eingestellten Frequenz sind diese beiden Parameter nicht unabhängig voneinander einstellbar. Gleichbleibende Kräfte für verschiedene Anregungsfrequenzen waren jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit gefordert. Es sollte nach Abschluss von Grundlagenversuchen geprüft werden, ob für weiterführende Untersuchungen pneumatische Vibratoren Verwendung finden könnten.

Leistungsfähige und anwendungsbereite hydraulische Systeme zur Schwingungserzeugung waren zum Zeitpunkt der Versuchsplanung nicht erhältlich. Insbesondere die geforderten Frequenzen konnten mit verfügbaren Systemen nicht erreicht werden, Ideen zur Realisierung neuartiger Lösungen bestanden jedoch bereits. Innerhalb der hier besprochenen Untersuchungen war allerdings insbesondere zeitlich keine Möglichkeit zur Entwicklung eines entsprechenden Prototyps gegeben.

Für die geplanten Stauchversuche wurde entschieden, einen Piezoaktor einzusetzen, Leistungsdaten siehe Tabelle 1.

**Tabelle 1: Leistungsdaten Piezoaktor und Ladungsverstärker**

<b>Aktor</b>	<b>Ladungsverstärker</b>
PSt 1000/35/100 VS 45	LE 1000/100
max. Stellweg: 100 $\mu\text{m}$	mittlere Ausgangsleistung: 350 W
Kapazität: 4100 nF	Spannungsbereich: 0 .. 1000V
Steifigkeit: 350 N/ $\mu\text{m}$	
max. Blockierkraft: 35 kN (unipolar)	
Druckbelastbarkeit: 70 kN	

Die Vorteile von Piezoaktoren sind die freie Wahl von Schwingungsfrequenz und Amplitude innerhalb der technischen Spezifikation, ihre geringe Baugröße und die mittlerweile preiswerte Verfügbarkeit einer großen Modellpalette.

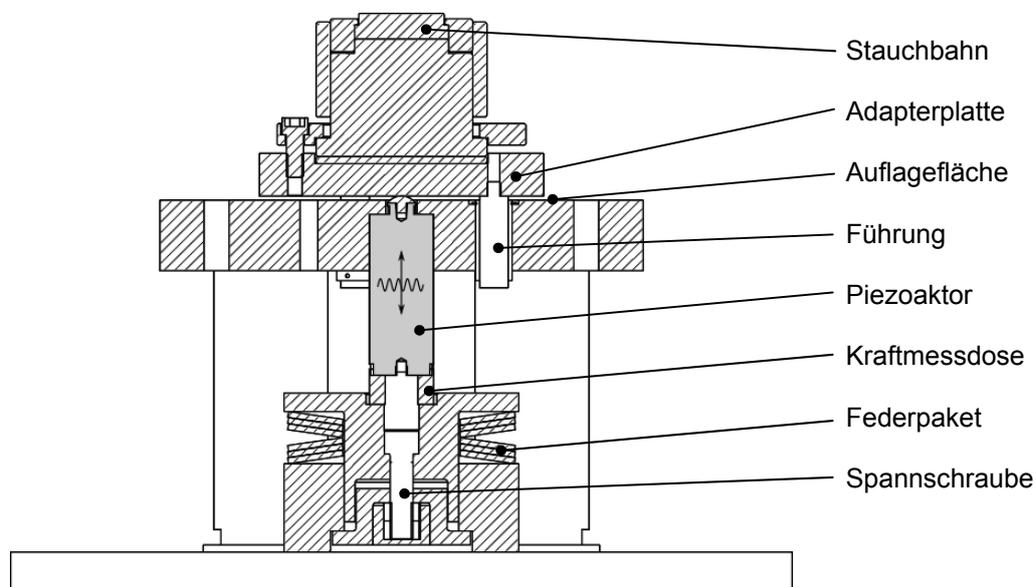
Es sind folgende Anforderungen an den Versuchsaufbau formuliert worden:

- die Vorbereitung jedes einzelnen Versuches und die Handhabung der Werkzeuge sollten einfach und innerhalb kurzer Zeit möglich sein,
- der verfügbare Einbauraum sollte den Einbau verschiedener, teilweise komplexer Werkzeugsysteme zulassen und
- empfindliche Komponenten, wie z.B. ein Piezoaktor im Kraftfluss, mussten vor Überlastung geschützt sein.

## Werkzeugaufbau

Zur Nutzung der Nennsteifigkeit und damit zur optimalen Ausnutzung der Leistung von Piezoaktoren ist die Aufbringung einer Vorspannung im Einbauzustand notwendig. Am einfachsten ist dies erreichbar, wenn der Aktor direkt im Kraftfluss montiert wird und somit der Umformvorgang selbst durch die wirkende Kraft die erforderliche Vorspannung bewirkt.

Die unmittelbare Belastung des Aktors durch die Umformkraft macht eine Überlastsicherung notwendig. Ein vorgespanntes Tellerfederpaket übernimmt im Versuchswerkzeug diese Aufgabe. Tellerfedern haben den Vorteil, sehr flexibel zu kompakten Paketen mit passender Federkennlinie zusammengestellt werden zu können. Sobald die Vorspannkraft des Federpaketes im Umformprozess überschritten wird, federt das Paket ein, die Adapterplatte des Unterwerkzeuges wird auf den Auflageflächen des Werkzeuggestells abgesetzt und die Ableitung der Überlast erfolgt direkt über das Gestell (Abb. 1).



**Abb. 1: Aufbau des Unterwerkzeugs**

Das Federpaket wurde so ausgelegt, dass ab einer Belastung von ca. 50 kN die Einfederung beginnt und der verfügbare Federweg bei einer Belastung von weniger als 70 kN ausgeschöpft wird, das Unterwerkzeug also auf dem Gestell aufliegt. Mit

70 kN ist die maximal zulässige Belastung des Aktors erreicht. Bei Überschreitung dieser Kraft können Beschädigungen des Aktors nicht ausgeschlossen werden. Das entsprechende Oberwerkzeug besteht im Wesentlichen aus einer Adapterkonstruktion zur Aufnahme der oberen Stauchbahn am Pressenstößel.

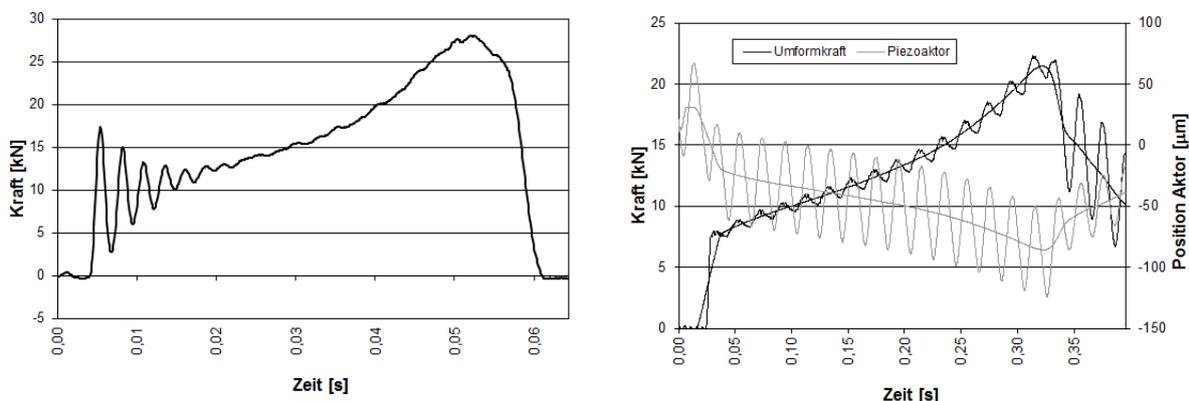
Das Versuchswerkzeug wurde in eine Kupplungsspindelpresse der Fa. Siempelkamp, Typ NPS 800/800/355, eingebaut. Die Versuchsparameter sind Tabelle 2 zu entnehmen.

**Tabelle 2: Versuchsparameter für Stauchversuche**

Probenwerkstoff	AlMgSi1
Probenabmessungen	Ø11 mm x 18 mm
Stößelgeschwindigkeit	250 mm/s (entspricht $\dot{\varphi} = 21 \text{ s}^{-1}$ )
Umformtemperatur	500°C
Schmierung	Trockenschmiermittel, Graphitbasis

## Versuchsergebnisse

Erste Versuche hatten das Ziel, die Überlagerung des Umformkraftverlaufes mit einer durch den Piezoaktor induzierten Schwingung deutlich aufzuzeigen. Für den Stauchversuch, dessen Kraft-Zeit-Verlauf in Abb. 2, links, dargestellt ist, wurde der Piezoaktor mit einer Frequenz von 200 Hz so angesteuert, dass sich eine Amplitude von +/- 10 µm einstellte. Die aufgezeichneten Messwerte zeigen keinen Einfluss dieser überlagerten Schwingung. Zu Beginn der Umformung tritt eine gedämpfte Schwingung auf, deren Frequenz sich mit ca. 360 Hz deutlich von der des Aktors, 200 Hz, unterscheidet. Die Ursache für die gedämpfte Schwingung beim Umformbeginn konnte nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Wesentliche Werkzeugkomponenten (Aktor, Überlastsicherung, Kraftmessdose, Hitzeisolierungen etc.) als Verursacher konnten durch Versuchsreihen ausgeschlossen werden. Vermutet wurde ein Einfluss der verwendeten Kupplungsspindelpresse. Der weitere Verlauf der Kraftkurve entspricht dem eines normalen Stauchversuchs.



**Abb. 2: Kraft-Zeit-Verläufe durchgeführter Stauchversuche**

Neben Versuchen mit unterschiedlichen Schwingungsparametern wurden einige Versuche im Einrichtbetrieb der Presse durchgeführt. Die Stößelgeschwindigkeit ist

dabei erheblich herabgesetzt. Bei einem Umformgrad der Proben von ca.  $\varphi = 1$  (Höhenreduktion von 18 mm auf 6 mm) und einer Dauer des Umformvorganges von  $\Delta t = 0,31$  s ergab sich die Umformgeschwindigkeit zu  $\dot{\varphi} = 3,2/s$ . Die Stößelgeschwindigkeit betrug ca. 38 mm/s. In Abb. 2, rechts, ist beispielhaft ein dabei erhaltener Kraft-Zeit-Verlauf dargestellt. Zusätzlich sind die jeweilige Aktorposition und gleitende Durchschnittswerte für beide Kurven eingetragen. Deutlich ist zu erkennen, dass der Umformkraft eine Schwingung überlagert ist, deren Frequenz mit der Schwingungsfrequenz des Aktors übereinstimmt. Die im Kraftverlauf ablesbare Amplitude, und damit die Variation der Stauchkraft, ist jedoch sehr gering.

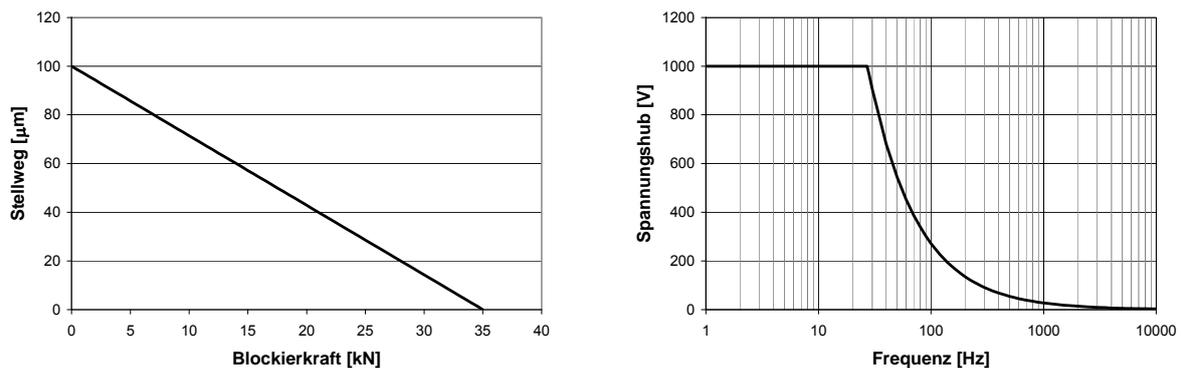
### Interpretation der Ergebnisse

Bei Betrachtung der Weg-Zeit-Verläufe von Aktorkopf und Stößel ergeben sich folgende Zusammenhänge: Die Stößelgeschwindigkeit ist konstant. Das Oberwerkzeug (obere Stauchbahn) vollführt somit eine geradlinige, gleichförmige Bewegung. Das Unterwerkzeug bewegt sich geradlinig, die Geschwindigkeit unterliegt jedoch einer zeitlichen Abhängigkeit und folgt der sinusförmigen Schwingung des Aktors. Der vom Aktorkopf (gemeinsam mit dem Unterwerkzeug) beschriebene Weg lässt sich als Funktion der Zeit wie folgt angeben:

$$s(t) = A_{\max} \sin(2\pi f t) \quad (\text{Gl. 1})$$

- $s$       Weg
- $A_{\max}$     maximaler Stellweg des Aktors
- $f$       Frequenz
- $t$       Zeit

Dabei ist zu beachten, dass sich der maximal erreichbare Stellweg des Aktors belastungsabhängig reduziert. Er verhält sich umgekehrt proportional zu der auf den Aktor wirkenden Belastung (Abb. 3, links).



**Abb. 3: Zusammenhang zwischen Aktorbelastung und Stellweg (links), maximaler Spannungshub des Ladungsverstärkers in Abhängigkeit von der Frequenz (rechts)**

Des Weiteren kann der volle Stellweg  $A_{\max}$  des Aktors abhängig von der Leistung des ansteuernden Ladungsverstärkers nur bis zu einer bestimmten Grenzfrequenz erreicht werden:

$$f_{\max} = \frac{i_{\max}}{\pi c U_{\max}} \quad (\text{Gl. 2})$$

$f$	Frequenz
$i_{\max}$	maximale Stromstärke
$c$	kapazitive Last
$U_{\max}$	benötigter maximaler Spannungshub

Für die hier verwendeten Komponenten (siehe Tabelle 1) kann der maximale Spannungshub – und damit Stellweg – bis zu einer Ansteuerfrequenz von 27 Hz erzielt werden.

Bei dieser Frequenz wird die vom Aktorkopf im Verlauf einer einzelnen Schwingung erreichte maximale Geschwindigkeit am größten, sofern die volle Amplitude anliegt. Höhere Frequenzen führen nicht zu einer höheren Geschwindigkeit. Im gleichen Maße, wie die Frequenz über 27 Hz zunimmt, sinkt - technisch bedingt – der maximale verfügbare Spannungshub, somit die Amplitude und entsprechend die Geschwindigkeit.

Als Ableitung der Gl. 1 nach t ergibt sich:

$$v(t) = 2\pi f A_{\max} \cos(2\pi f t) \quad (\text{Gl. 3})$$

Anhand dieser Gleichung lässt sich die Geschwindigkeit des Aktorkopfes in Abhängigkeit von Amplitude, Zeit und Frequenz errechnen. Die maximal auftretende Geschwindigkeit während einer einzelnen Schwingung ist für  $t = 0$  s vereinfacht anzugeben:

$$v_{\max} = 2\pi f A_{\max} \quad (\text{Gl. 4})$$

Bei  $f=27$  Hz beträgt  $v_{\max} = 16,965$  mm/s.

Die Addition der Geschwindigkeiten des Stößels und des Aktors führt zu einer resultierenden Geschwindigkeit ( $v_{\text{res}}$ ), welche um einen Mittelwert ( $v_{\text{Stößel}}$ ) mit einem gewissen Betrag schwingt ( $v_{\text{Aktor}}$ ).

Je nach Größe der beiden Geschwindigkeitskomponenten  $v_{\text{Stößel}}$  und  $v_{\text{Aktor}}$  ergeben sich mehrere mögliche Fälle. Die resultierende Geschwindigkeit kann in ihrem Verlauf:

- immer positiv bleiben,
- zwischenzeitlich bis auf 0 absinken (Grenzfall) oder
- teilweise negativ werden.

Der Verlauf der Stauchkraft im Kraft-Weg-Diagramm sollte diese Fälle wie folgt widerspiegeln:

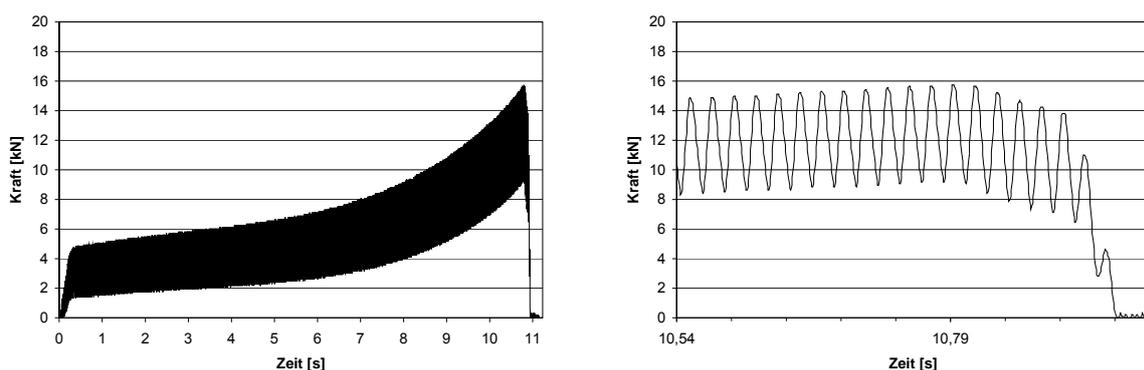
Fall a): Die Umformkraft weicht vom Mittelwert für nicht schwingungsüberlagertes Umformen nach oben bzw. unten nur jeweils um den geringen Betrag ab, der durch die Änderung der Umformgeschwindigkeit und die damit einhergehende Änderung der Fließspannung bewirkt wird.

Fall b): Die Stauchkraft verweilt für  $v_{\text{res}} = 0$  auf ihrem Niveau.

Fall c): Sobald  $v_{res}$  in den negativen Bereich gelangt, entspricht dies einer Umkehr der Bewegungsrichtung. Die zuvor gestauchte Probe wird zunehmend entlastet, wobei sich die elastischen Anteile der Verformung von Werkstück, Werkzeug und Presse zunehmend abbauen, bei entsprechender Geschwindigkeit und ausreichendem Rückstellweg bis hin zur vollständigen Entlastung. Dieser Effekt sollte deutlich im Verlauf der Umformkraft zu erkennen sein. Die anschließende Belastung verformt die Probe elastisch, bis die Fließspannung erneut erreicht ist und die Stauchprobe plastisch verformt wird. Dies hätte eine Beeinflussung der Reibverhältnisse in der Kontaktzone Werkstück-Werkzeug zur Folge. Veränderte Reibverhältnisse sind eine vermutete Ursache für die Veränderung des Umformverhaltens metallischer Werkstoffe unter Schwingungseinfluss. Eine periodische Entlastung der Stauchproben ist somit erwünscht. Anhand der Fallbeispiele ist zu erkennen, dass für eine Entlastung der Stauchprobe während der Umformung die resultierende Geschwindigkeit negativ werden muss. Das kann nur eintreten, wenn die vom Aktor erreichte maximale Geschwindigkeit entgegen der Bewegungsrichtung des Stößels gerichtet und betragsmäßig größer ist als die Geschwindigkeit des Stößels.

Für einen gegebenen Aktor ist die maximale Geschwindigkeit begrenzt, im hier vorliegenden Fall auf rund 17 mm/s. Übertragen auf die Zylinderstauchversuche bedeutet dies, dass nur Stößelgeschwindigkeiten unterhalb von 17 mm/s bzw. Umformgeschwindigkeiten unterhalb  $\dot{\varphi} = 1,4 \text{ s}^{-1}$  (für einen Umformweg von 12 mm) theoretisch zur periodischen vollständigen Entlastung der Stauchprobe führen können.

Um diese Annahme zu bestätigen, wurden Stauchversuche auf einer hydraulischen Presse durchgeführt (AP&T LPS-4000-13-10), welche das Stauchen bei sehr geringen Umformgeschwindigkeiten ermöglicht. Der Trockenschmierstoff auf Graphitbasis wurde auch hier eingesetzt, die Umformtemperatur betrug wie bei den vorherigen Versuchen  $500^\circ\text{C}$ . Um dem starken Auskühlen der Probe während des langen Umformvorganges entgegen zu wirken, wurden die Stauchbahnen mit der Probe zusammen in einem Wärmeschutzbehälter im Ofen erwärmt und verblieben während der Umformung in diesem Behälter.



**Abb. 4: Stauchversuche mit geringer Umformgeschwindigkeit (ca.  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ), Ausschnitt (rechts)**

In Abb. 4 ist ein bei diesen Versuchen ermittelter Kraft-Zeit-Verlauf dargestellt. Deutlich ist für den gesamten Verlauf eine periodische Abnahme der gemessenen Umformkraft um ca. 40-70 % zu erkennen. Die erreichte Umformgeschwindigkeit lag bei ca.  $\dot{\varphi} = 0,1 \text{ s}^{-1}$  und damit weit entfernt von den in der Massivumformung

typischerweise angewandten Umformgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse bestätigen jedoch die oben angeführten Betrachtungen und geben wichtige, grundsätzliche Hinweise auf einzuhaltende Randbedingungen hinsichtlich der Maschinen- und Aktorgeschwindigkeiten für Versuche mit Schwingungsüberlagerung.

### **Versuche auf einem hydraulischen Umformsimulator**

Basierend auf den Erkenntnissen, welche beim Einsatz des Piezoaktors zur Schwingungserzeugung gewonnen werden konnten, wurde ein zweiter Versuchsaufbau realisiert. Ein am IFUM zur Materialcharakterisierung genutzter hydraulischer Umformsimulator (Plastometer) erlaubt die freie Programmierung von Weg-Zeit-Verläufen des Umformstempels. Innerhalb der technischen Grenzen der Maschine ist somit eine präzise Vorgabe von Verfahrenswegen, Umformgeschwindigkeiten, Schwingungsfrequenzen und –amplituden möglich. Die im Simulator integrierte Messtechnik erlaubt die Aufzeichnung relevanter Messdaten zur späteren Analyse.

So wurde es möglich, niedrige Umformgeschwindigkeiten für Stauchversuche zu nutzen und zugleich die Amplituden der überlagerten Schwingungen so vorzugeben, dass eine zyklische Entlastung der Stauchproben gewährleistet war. Ein möglicher positiver Einfluss auf den Kraftbedarf für die Umformung durch veränderte Reibbedingungen in der Kontaktzone Werkzeug-Werkstück sollte so nachweisbar sein.

### **Versuchsprogramm**

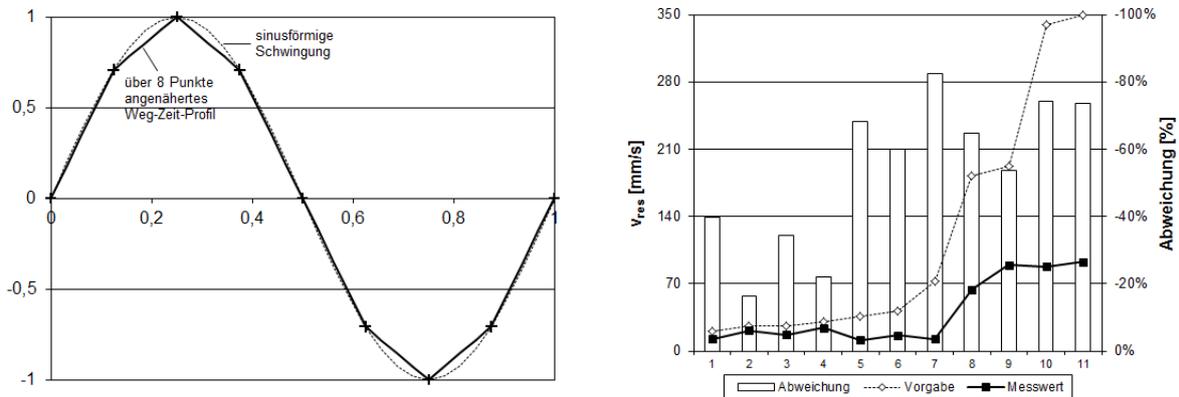
Im Versuchsprogramm wurden die Parameter Stempelgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude variiert. Darüber hinaus sind Versuche bei unterschiedlichen Reibverhältnissen durchgeführt worden: trocken bzw. vereinzelt mit eingelegter Teflonfolie zwischen Stauchprobe und Stauchbahnen (s. Tabelle 3). Die Umformung fand bei Raumtemperatur statt.

**Tabelle 3: Versuchsplan**

Amplitude [mm]		Frequenz [Hz]			
		0	10	25	50
V <sub>Stempel</sub> [mm/s]	5		<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
	10		<b>0,25</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
	25		<b>0,5 / 0,75</b>	<b>0,25 / 0,5</b>	<b>0,15 / 0,5 / 1</b>
	25	<b>0*</b>		<b>1</b>	<b>1* / 1,5*</b>
	35	<b>0*</b>			<b>1,5*</b>
* - Versuche sowohl trocken als auch mit Teflonfolie					

Die Weg-Zeit-Profile mussten als Datensatz mit einer Folge von vom Umformstempel zu bestimmten Zeitpunkten zu erreichenden Wegpunkten vorgegeben werden. Diese wurden in Microsoft Excel unter Angabe von Umformgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude errechnet. Da die Menge verarbeitbarer Datenpunkte begrenzt war, sind die Profile durch 8 Datenpunkte je Schwingung an den Verlauf einer idealen Schwingung angenähert worden (Abb. 5). Basierend auf den Vorgabedaten wurde direkt überprüft, ob der im Verlauf einer einzelnen Schwingung realisierte Rückhub

ausreichend groß sein würde, um die vollständige Entlastung der Probe zu bewirken. Dafür musste jeweils mindestens ein Weg zurückgelegt werden, der größer als der elastische Anteil der Stauchung war.



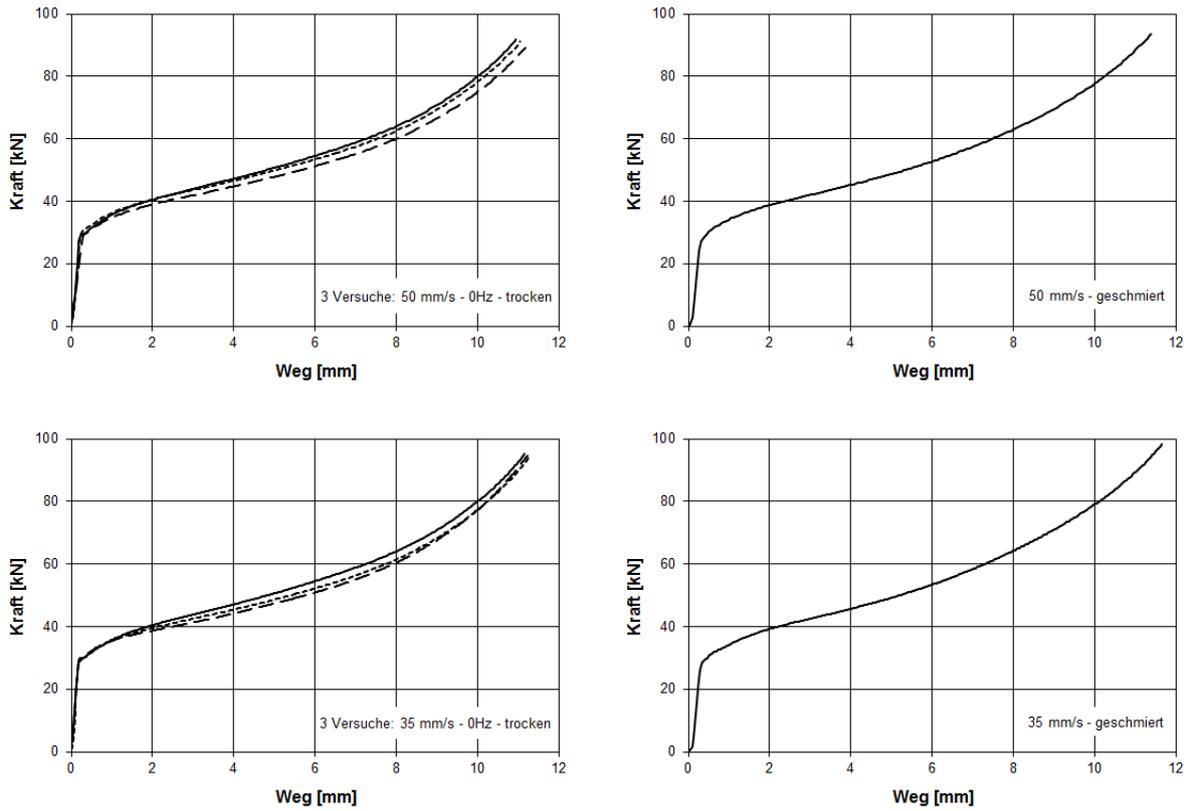
**Abb. 5: Annäherung der Weg-Zeit-Profile an eine ideale Sinusschwingung (links), Abweichungen von den Profilvorgaben im Versuch für 11 Parametersätze (rechts)**

Vorbereitend wurde untersucht, mit welcher Genauigkeit das Plastometer die vorgegebenen Weg-Zeit-Profile umsetzt. Frequenz und Umformgeschwindigkeit konnten sehr gut erreicht werden. Starke Abweichungen waren bei den Amplituden zu beobachten, welche zum Teil nur 20% der Vorgabewerte erreichten. Die relativen Abweichungen nahmen für höhere geforderte Dynamik (höhere Frequenzen in Verbindung mit höheren Geschwindigkeiten und Amplituden) zu, absolut wurde jedoch jeweils eine weitere Steigerung der Dynamik erreicht. Als Vergleichsgröße wird in Abb. 5, rechts, die Geschwindigkeit  $v_{res}$  gezeigt, die sich als Summe aus gleichförmiger und schwingungsüberlagerter Stempelbewegung ergibt.

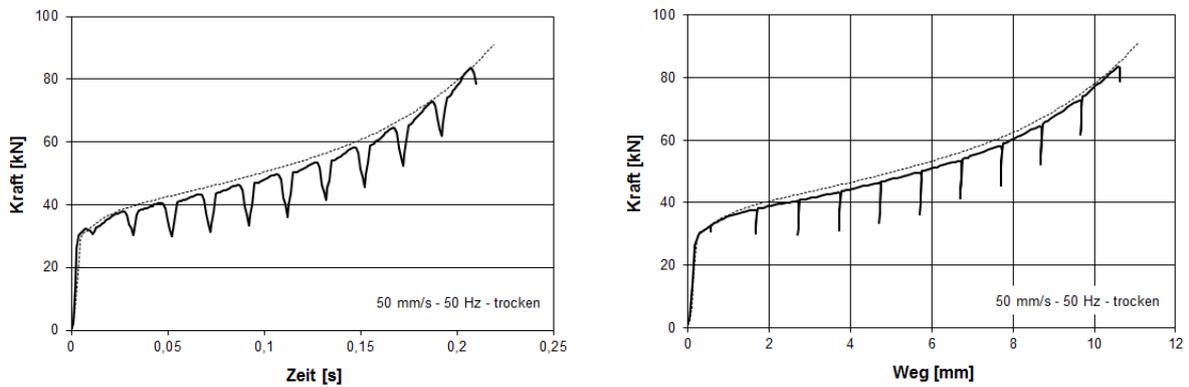
## Versuchsergebnisse

Referenzversuche ohne Schwingungsüberlagerung zeigten, dass eine gute Wiederholgenauigkeit gegeben war. Die Kraft-Weg-Kurven jeweils dreier Versuche unter identischen Bedingungen verlaufen nahezu deckungsgleich (Abb. 6, links oben und unten). Des Weiteren sind keine Unterschiede in den Kraftverläufen für unterschiedliche Stempelgeschwindigkeiten zu beobachten gewesen (Abb. 6, links oben: 50 mm/s und unten: 35 mm/s). Die Anwendung von Teflonfolie als Schmierstoffersatz hatte keinen Einfluss auf die Umformkraft (Abb. 6, rechts).

Bei der Überlagerung der Stempelbewegung mit Schwingungen spiegelt der erhaltene Verlauf der Messwerte die oben beschriebene Abweichung zwischen vorgegebener und tatsächlich erreichter Amplitude wider. Bei guter Einhaltung der gewünschten Umformgeschwindigkeit und Schwingungsfrequenz wird die gewünschte Amplitude nicht erreicht. Trotzdem werden die Stauchproben periodisch deutlich entlastet. Diese Entlastung ist in Abb. 7 im Kraft-Zeit-Verlauf (links) und im Kraft-Weg-Verlauf (rechts) zu erkennen. Kraftverläufe für Referenzversuche ohne Schwingungsüberlagerung sind in beiden Diagrammen angegeben und verdeutlichen, dass die Umformkraft durch die Schwingungsüberlagerung nicht reduziert werden konnte.

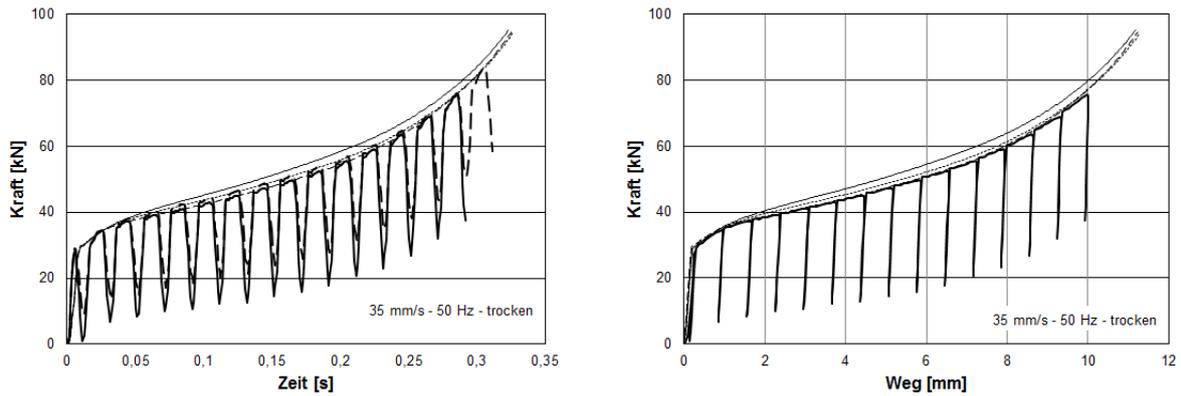


**Abb. 6: Versuche ohne Schwingungsüberlagerung**



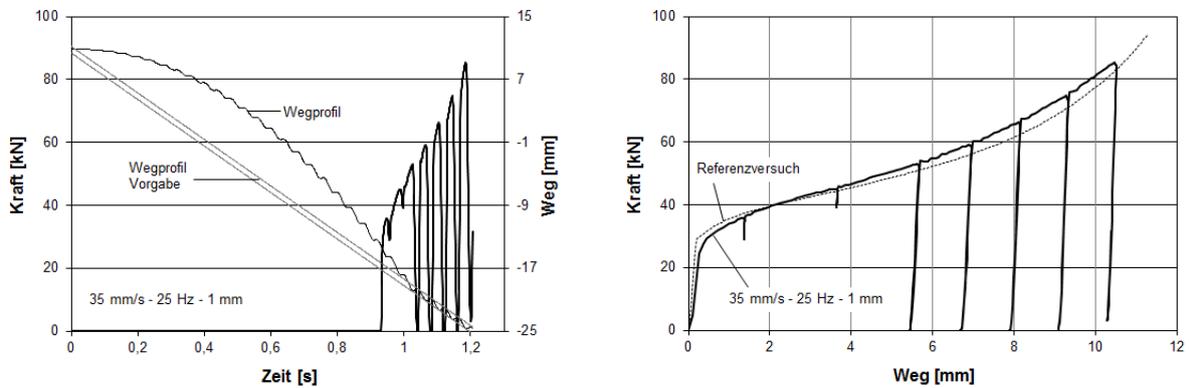
**Abb. 7: Stauchversuche mit Schwingungsüberlagerung, Stempelgeschwindigkeit 50 mm/s**

Eine Absenkung der Stempelgeschwindigkeit (auf  $v=35$  mm/s, von  $v=50$  mm/s) führt zu einer besseren Realisierung geforderter Amplituden (Abb. 8), die Schwingungsüberlagerung hat jedoch ebenfalls keine Auswirkung auf die Umformkraft. Bei der Betrachtung des Kraft-Weg-Verlaufes wird zudem klar, dass auch eine Reduzierung des Energiebedarfes der Umformung nicht eintritt, da sich die von der Kraft-Weg-Kurve eingeschlossene Fläche gegenüber den Referenzversuchen nicht verändert.



**Abb. 8: Stauchversuche mit Schwingungsüberlagerung, Stempelgeschwindigkeit 35 mm/s**

In Abb. 9 ist beispielhaft ein Stauchversuch dargestellt, in dessen Verlauf mehrfach eine vollständige Entlastung der Probe stattfand. Dargestellt ist links neben dem Kraft-Zeitverlauf der vom Plastometer abgefahrene Weg-Zeit-Verlauf. Das Plastometer erreicht innerhalb der ersten Sekunde des Versuches nicht das vorgegebene Profil (im Diagramm markiert durch „Wegprofil Vorgabe“). Erst nach Beginn der Umformung werden die Vorgaben eingehalten, was deutlich im Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Verlauf zu sehen ist. In Abb. 9, rechts, ist zu Vergleichszwecken der Kraft-Weg-Verlauf für den schwingungsüberlagerten Versuch und der Verlauf eines Referenzversuches ohne Schwingungsüberlagerung eingetragen. Eine reduzierte Umformkraft auf Grund der Schwingungsüberlagerung kann trotz zwischenzeitlicher, vollständiger Probenentlastung auch in diesem Versuch nicht nachgewiesen werden.



**Abb. 9: Stauchversuch mit vollständiger Probenentlastung**

Eine anschließende Durchsicht aktueller Literatur speziell unter dem Aspekt der verwendeten Umformgeschwindigkeiten bestätigte die hier getroffenen Annahmen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen resultierender Stempelgeschwindigkeit und Beobachtbarkeit einer Schwingungsüberlagerung. In /4/ arbeiteten die Autoren beim ultraschallüberlagerten Warmstauchen von Aluminiumlegierungen mit Umformgeschwindigkeiten zwischen  $\dot{\varphi} = 0,003$  und  $0,03 \text{ s}^{-1}$  bei Probengrößen von  $\varnothing 6 \times 6 \text{ mm}$ . Dies ergibt eine Stößelgeschwindigkeit zwischen  $0,012$  und  $0,12 \text{ m/s}$ . Überlagert wurde der Umformvorgang mit einer Ultraschallschwingung ( $f = 20 \text{ kHz}$ ,  $A = 5,6 \text{ }\mu\text{m}$ ). Die resultierende maximale Geschwindigkeit der Werkzeuge auf Grund der Ultraschallüberlagerung beträgt  $0,7 \text{ m/s}$ .

Im SFB 543 der Universität Stuttgart /3/ sind ultraschallüberlagerte Zugversuche mit Dehnraten zwischen 0,004 und 6 s<sup>-1</sup> durchgeführt worden. Realisiert wurden Amplituden von 10 µm bei einer Frequenz von 22 kHz. Stauchversuche an Ti99.5-Proben (Ø5 x 7,5 mm) fanden bei Geschwindigkeiten zwischen 0,02 und 0,2 mm/s statt.

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde untersucht, ob sich die Überlagerung von Schwingungen auf den Kraftbedarf von Stauchprozessen günstig auswirkt. Die Randbedingungen für die Untersuchungen lehnten sich an typische Prozesse der Massivumformung an. Für die untersuchten Parameter konnte ein positiver Einfluss nicht nachgewiesen werden. Stauchkräfte, Umformenergie und Formänderung zeigten keine Abhängigkeit von überlagerten Schwingungen. Da zugleich in der Literatur immer wieder von erfolgreichem Einsatz der Schwingungsüberlagerung bei verschiedensten Umformprozessen berichtet wird, sollte in Zukunft verstärktes Augenmerk darauf gerichtet werden, die Prozessgrenzen für schwingungsüberlagertes Umformen zu identifizieren.

### **Danksagung**

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden zum Teil im Rahmen des Forschungsprojekts „Untersuchungen zum Einfluss der Schwingungen auf den Warmmassivumformprozess“ am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover (LUH). Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

### **Autor**

Dipl.-Ing. Hagen Schmidt studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar. Von 2003 bis 2010 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am IFUM.

### **Literatur**

/1/ Hansen, N.

Metallumformung unter Anwendung von Schwingungen  
Bänder, Bleche, Rohre; Heft 10 (1968), S. 573-584

/2/ Schöck, J.

Schall reduziert die Umformkräfte  
Technica, Heft 18/2000, S. 20-25

/3/ SFB 543

Ultraschallbeeinflusstes Umformen metallischer Werkstoffe  
Abschlussbericht 1.1.1998-30.6.2002, Universität Stuttgart, 2002

/4/ Hung, Jung-Chung; Hung, Chinghua

The influence of ultrasonic-vibration on hot upsetting of aluminum alloy  
Ultrasonics 43 (2005), S. 692–698

/5/ Behrens, B.-A.; Kammler, M.; Gastan, E.; Lange, F.

Numerische Untersuchungen zum schwingungsüberlagerten Pressen von Aluminiumpulver

UTFscience, Online-Ausgabe 1/2010, [www.utfscience.de](http://www.utfscience.de) (vom 21.8.2010)

/6/ Schultheis, V.

Oszillierendes Umformen mit direkt angetriebenen Umformmaschinen

Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen, 2007

/7/ Krause, A.; Lücke, M.; Nickel, R.

Erhöhte Scherflächenqualität durch ein oszillierendes Schermesser

Schmiede-Journal, März 2010, [www.metalfarm.de](http://www.metalfarm.de) (vom 21.8.2010)