



Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Temperaturentwicklung in der Umformzone beim Durchsetzen von Vergütungsstahl

Philipp Tröber^{*1}, Markus Welm¹, Hannes Alois Weiss¹, Peter Demmel², Roland Golle¹, Wolfram Volk¹

¹Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München, Walther-Meißner-Str. 4, 85748 Garching, Deutschland

²MAN Truck & Bus AG, Dachauer Str. 667, 80995 München, Deutschland

Abstract

Während der Kaltumformung von Blechwerkstoffen kommt es zu einem Temperaturanstieg in der Umformzone. Dieser resultiert neben Reibung hauptsächlich aus der Umwandlung plastischer Umformarbeit in Wärme. Die dabei auftretenden Temperaturen zeigen signifikante Auswirkungen auf den jeweiligen Fertigungsprozess, wie z.B. die Verschleißentwicklung des Werkzeuges oder das Umformverhalten des Blechwerkstoffes. Folglich ist die Kenntnis der auftretenden Temperaturen und deren Abhängigkeit von eingestellten Prozessparametern von hoher Bedeutung. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Vergütungsstahl C45LC unter variierenden Prozessparametern durchgesetzt bzw. schergeschnitten. Aufgrund hoher Flächenpressungen und Umformgrade wurden diese Fertigungsverfahren verwendet, da hier hohe Temperaturen entstehen. Variiert wurden hierbei sowohl der Durchsetzspalt als auch die Stempelgeschwindigkeit. Die dabei entstehenden Temperaturen wurden während des Prozesses instantan mit einem Werkzeug-Werkstück-Thermoelement gemessen. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss der Prozessparameter auf die ermittelten Temperaturen.

Keywords: Durchsetzen, Scherschneiden, Temperatur, Thermoelektrizität

1 Einleitung

Die Kaltumformung gehört zusammen mit dem Scherschneiden zu den wichtigsten Verfahren der Blechverarbeitung. Aufgrund kontinuierlich steigenden Anforderungen hinsichtlich Teilequalität, Takt- und Standzeit ist zur Erhöhung der Profitabilität ein präzises Verständnis des Umformprozesses unerlässlich.

Während der Blechumformung wird ein großer Teil der benötigten plastischen Arbeit in Wärme umgewandelt [1]. Nur ein kleiner Teil wird im Werkstoff als Versetzungen und Fehler im Kristallgitter gespeichert [2]. Darüber hinaus verstärkt Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück diesen Effekt. Aus diesem Grund können während der Umformung Temperaturen entstehen, welche signifikante Auswirkungen auf den Prozess zeigen.

Die auftretende Temperaturerhöhung beeinflusst neben dem Materialverhalten [3] auch das Verschleißverhalten der Werkzeuge [4]. Zusätzlich ist die Temperatur ein essentielles Kriterium zur Wahl einer Beschichtung oder des Schmierstoffes. Folglich ist die Kenntnis deren Höhe von signifikanter Bedeutung

Die in der Umformzone vorherrschende Temperatur wurde bislang in vielen Untersuchungen mit unterschiedlichsten Messverfahren ermittelt. Neben eingebetteten Thermoelementen, Strahlungsthermometern oder Simulationen wurden auch metallographische Analysen verwendet. Nicht nur aus diesem Grund zeigen die ermittelten maximalen Temperaturen eine große Diskrepanz. Sie variieren zwischen 50 °C [5] und 600 °C [6]. Der Unterschied der maximalen Temperaturen liegt jedoch in erster Linie in der nicht genau definierten geometrischen und zeitlichen Auflösung des Messsignals begründet. Demmel et al. gelang es durch den Aufbau eines speziellen Werkzeug-Werkstück-Thermoelementes die Temperatur instantan und in-situ an der Stempelkante zu erfassen. Beim Scherschneiden von S355MC ermittelte er Temperaturen von 250 °C bei 4 mm Materialstärke und etwa 300 °C bei 6 mm. Darüber hinaus konnte er einen starken Einfluss der Prozessparameter auf die Temperatur feststellen [7]. In Übereinstimmung mit diesen Untersuchungen konnte Tröber et al. ähnliche Temperaturen bei dem Werkstoff C45LC messen. Mit derselben Messmethode wurde eine maximale Temperatur von 264 °C bei 4 mm

Materialdicke ermittelt, welche ebenfalls am Ende des Glattschnittanteils entstand [8]. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde in der aktuellen Untersuchung der Fokus auf die Auswirkungen sich ändernder Versuchsparameter auf die entstehende Temperatur gelegt.

2 Messprinzip

Zur Messung der Temperatur wurde im Rahmen dieser Untersuchung ein thermoelektrisches Messprinzip verwendet. Thermoelektrizität beschreibt im Allgemeinen die Umwandlung von Wärme in Elektrizität und umgekehrt. Das im Folgenden beschriebene Werkzeug-Werkstück-Thermoelement basiert hierbei auf dem sogenannten Seebeck-Effekt. Dieser beschreibt die Entstehung von Thermoelektrizität in einem Stromkreis, welcher aus mindestens zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern besteht, und zusätzlich einem Temperaturgradienten unterliegt. Ist der Stromkreis offen, so entsteht eine thermoelektrische Spannung, ist der Kreis geschlossen entstehen thermoelektrische Ströme. Während diese Ströme von dem Übergangswiderstand zwischen beiden Leitern abhängen, ist die im offenen Kreis entstehende Spannung proportional zum Temperaturgradienten zwischen den Leiterenden. Proportionalitätsfaktor ist hierbei die Differenz der Seebeck-Koeffizienten beider Leiter. Die Seebeck-Koeffizienten charakterisieren hierbei die thermoelektrischen Eigenschaften der Leiter.

Abbildung 1 zeigt das Prinzip eines Werkzeug-Werkstück-Thermoelements entsprechend den vorangegangenen Untersuchungen von Tröber et al. [8]. Durch die unterschiedlichen thermoelektrischen Eigenschaften von Blech- und Werkzeugwerkstoff kann ein Thermoelement aufgebaut werden, welches exakt die Temperatur zwischen Verbindungsstelle und Umgebung misst. Durch spezielle Hinterschnitte am Stempel ist die Berührzone der beiden Leiter auf die Stempelkante reduziert und somit genau definiert. Die Berührzone stellt zugleich den Ort der Temperaturentstehung dar. So kann eine Verzögerung durch die Zeitkonstante der Wärmeleitung vermieden werden, da keine Masse eines zusätzlichen Sensors erwärmt werden muss.

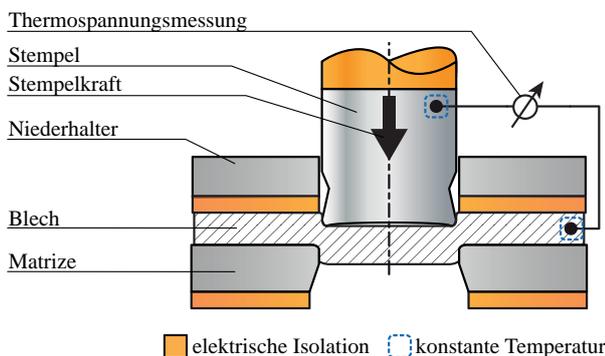


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Werkstück-Werkzeug-Thermoelements nach [8]

Um darüber hinaus eine hohe Qualität des Messsignals zu gewährleisten, sind alle Aktivelemente elektrisch isoliert. Da die Thermospannungen im Bereich weniger Millivolt liegen, wird das Signal direkt am Werkzeug verstärkt. Zur Kalibrierung des Thermoelements werden die verwendeten Werkstoffe zunächst hinsichtlich ihrer

thermoelektrischen Eigenschaften charakterisiert. Im Anschluss kann der Seebeck-Koeffizient des Werkzeug-Werkstück-Thermoelements berechnet werden. Erst dieses Verfahren ermöglicht die Bestimmung der absoluten Temperatur aus den elektrischen Spannungswerten. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens wird in [9] gegeben.

3 Versuchsanlagen und -aufbau

3.1 Werkzeug und Presse

Die Versuche wurden auf einem steifen, modular aufgebautem Umform- und Schneidwerkzeug durchgeführt. Die Keramikapplikationen zur elektrischen Isolierung der Aktivelemente besteht aus Zirkonoxid. So kann sichergestellt werden, dass auch Fertigungsverfahren mit höchsten Flächenpressungen, wie Durchsetzen oder Scherschneiden durchgeführt werden können.

An dem Stempel, mit einem Durchmesser von 70 mm, wurden Hinterschnitte angebracht, durch welche die Berührzone zwischen Stempel und Blech auf die Stempelkante reduziert wird. Die Geometrie des Stempels ist in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich wird durch das Einlegen eines Papiers zwischen Blech- und Stempelwerkstoff die Berührfläche an der Stempelstirnfläche reduziert. Das Papier verhindert bis zur Durchtrennung (Start der plastischen Werkstoffdeformation) einen elektrischen Kontakt zwischen Werkzeug und Blech.

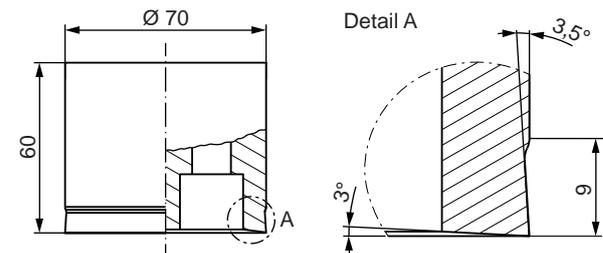


Abbildung 2: Geometrie des verwendeten Stempels nach [6]

Da das Messprinzip lediglich den an den Aktivelementen und dem Blech vorherrschenden Temperaturgradienten erfassen kann, wird die Umgebungstemperatur am Verstärker ebenfalls aufgezeichnet. Hierbei kommen hochpräzise Halbleiter-Tempersensoren zum Einsatz. Diese ermöglichen eine Temperaturmessung zwischen 5 und 45 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ °C.

Das Werkzeug wurde auf der hydraulischen, dreifachwirkenden Presse HFA 3200 plus der Firma Feintool, Lyss, Schweiz eingesetzt.

3.2 Versuchswerkstoffe

Als Stempelwerkstoff wurde die Hartmetallsorte CF-H40s gewählt. Durch die hohe Homogenität kann über das gesamte Stempelvolumen von konstanten thermoelektrischen Eigenschaften ausgegangen werden. Darüber hinaus wird diese Sorte aufgrund der hohen Härte von 1400 HV10 und der Korrosionsbeständigkeit sehr häufig im industriellen Umfeld eingesetzt.

Als Blechwerkstoff wird der Vergütungsstahl C45LC mit einer Dicke von 4 mm untersucht. Dieser besitzt eine Dehngrenze von 287 MPa sowie eine Streckgrenze von 482 MPa.

Die chemische Zusammensetzung beider Werkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe in Gew.-%

CF-H40s	Co		Wolframcarbid			
	11,8		Rest			
C45LC	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
	0,44	0,28	0,71	1,00	0,05	Rest

4 Versuchsergebnisse

Um den Einfluss variierender Prozessparameter auf die entstehende Temperatur in der Umformzone zu analysieren, wurden Scherschneidversuche unter variierenden Versuchsparametern durchgeführt und die dabei entstehende Temperatur in der Umformzone gemessen.

Da die maximale Temperatur, wie in der Einleitung aufgezeigt, mit Erreichen der Schubbruchgrenze auftritt, kann beim Scherschneiden von einem gleichen Temperaturverlauf wie beim Durchsetzen ausgegangen werden. So können Versuche ohne die Gefahr von Ausbrüchen an der Stempelkante aufgrund der Stempelklemmung beim Rückhub durchgeführt werden.

Der Fokus wurde im Rahmen der Untersuchungen auf die beiden Parameter Stempelgeschwindigkeit und Durchsetz- bzw. Schneidspalt gelegt. Im Hinblick auf die Leistungskennzahlen der Presse wurde die Geschwindigkeit zwischen 10 mm/s, 30 mm/s und 70 mm/s variiert. Die Schneidspalte betragen 1,5 %, 6 % und 12 % der Blechdicke. Dies entspricht den effektiven Werten 0,06 mm, 0,24 mm und 0,48 mm. Da der Temperaturverlauf in [8] bereits im Hinblick auf die Prozessphasen dargestellt und erläutert wurde, liegt der Fokus im Folgenden auf den Auswirkungen sich ändernder Prozessparameter.

4.1 Einfluss des Schneidspaltes

Die Schneidspalte wurden jeweils bei einer Stempelgeschwindigkeit von 70 mm/s variiert. Abbildung 3 zeigt den Temperaturverlauf für einen Schneidspalt von 1,5 %. Mit dem elektrischen Kontakt zwischen Stempel und Blech startet die Temperaturmessung. Die initiale Temperatur liegt hierbei, aufgrund der Einebnung von Rauheitsspitzen, bereits etwas über Raumtemperatur. Anschließend steigt die Temperatur bis sie das Maximum von 256 °C mit der endgültigen Werkstofftrennung erreicht.

In Abbildung 4 ist der Temperaturverlauf bei einem Schneidspalt von 6 % dargestellt. Wie auch bei 12 % (Abbildung 5) startet die Messung mit dem elektrischen Kontakt zwischen Stempel und Blech. Im Anschluss an das erreichte Temperaturmaximum kann bei größeren Schneidspalten keine Temperaturmessung mehr realisiert werden, da der Kontakt zwischen Stempel und Blech aufgrund der besonderen Stempelgeometrie unmittelbar nach der Trennung verloren geht. Die Maximaltemperatur beträgt hier 163 °C, was einem Rückgang von 37 % im Gegensatz zu 1,5 % Schneidspalt entspricht.

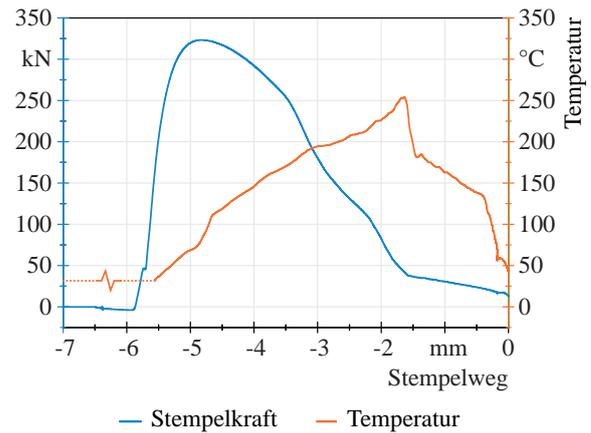


Abbildung 3: Repräsentativer Stempelkraft- und Temperaturverlauf eines Scherschneidvorgangs bei 1,5 % Schneidspalt und 70 mm/s Stempelgeschwindigkeit bezogen auf den Stempelweg

Insgesamt bestätigen die aufgenommenen Temperaturverläufe eine Senkung der Temperatur mit größer werdendem Schneidspalt. Dies ist vor allem auf den Glattschnittanteil der Schnittflächen zurückzuführen. Je höher dieser ist, desto höher ist auch die geleistete Arbeit, welche wiederum zu einem Großteil in Wärme umgewandelt wird. In Abbildung 6 sind die Schnittflächen des Stanzstreifens und des Butzens dargestellt. Aufgrund des Werkzeugaufbaus ist hierbei vor allem das Stanzgitter von entscheidender Bedeutung. Während bei einem Schneidspalt von 1,5 % der Glattschnittanteil bei annähernd 100 % liegt, nimmt der Glattschnittanteil mit größerem Schneidspalt sukzessive ab. Folglich nimmt der Umformgrad des Werkstoffes ab, was sich im Kraftverlauf in einer leichten Verringerung der maximalen Schneidkraft widerspiegelt. Darüber hinaus wird der Kraftabfall nach Werkstofftrennung steiler, da der Butzen nicht im Matrizenkanal geklemmt wird.

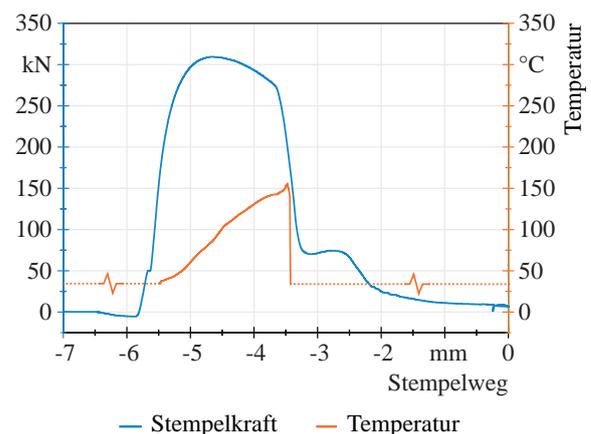


Abbildung 4: Repräsentativer Stempelkraft- und Temperaturverlauf eines Scherschneidvorgangs bei 6 % Schneidspalt und 70 mm/s Stempelgeschwindigkeit bezogen auf den Stempelweg

Die beiden größten Schneidspalte zeigen nur noch geringe Unterschiede der Glattschnittbereiche (Abbildung 6), was zu ähnlich hohen Temperaturen an der Stempelkante führt (Abbildung 4 und 5). Während bei 6 % eine Temperatur von 163 °C erreicht wird, beträgt diese bei 12 % noch 146 °C. Diese Senkung um etwa 10 % spiegelt sich exakt im Glattschnittanteil des Stanz-

gitters wider, welcher um 11 % abnimmt. Geringe Unterschiede sind auf die sich zusätzlich ändernde Schneideinflusszone, dem Werkstoffbereich zwischen den Schneiden, zurückzuführen. Mit größer werdendem Schneidspalt steigt das darin vorhandene Werkstoffvolumen, wodurch dieselbe Umformarbeit auf einen größeren Bereich verteilt wird und der Werkstoff folglich weniger erwärmt wird.

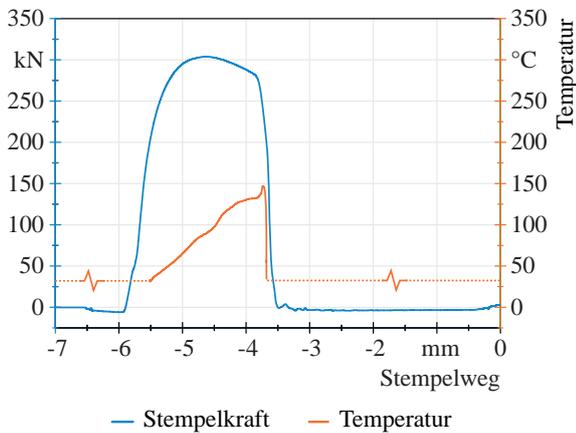


Abbildung 5: Repräsentativer Stempelkraft- und Temperaturverlauf eines Scherschneidvorgangs bei 12 % Schneidspalt und 70 mm/s Stempelgeschwindigkeit bezogen auf den Stempelweg

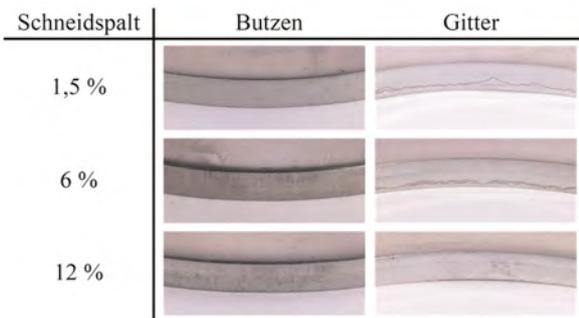


Abbildung 6: Schnittflächen des Stanzbutzens- und -gitters in Abhängigkeit des Schneidspalts bei einer Geschwindigkeit von 70 mm/s

4.2 Einfluss der Stempelgeschwindigkeit

Die Referenz dieser Prozessparametervariation stellt der Temperaturverlauf aus Abbildung 3 dar, welcher bei einer Geschwindigkeit von 70 mm/s ermittelt wurde. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit wurde ein Schneidspalt von 1,5 % bei allen Versuchen beibehalten.

Abbildung 7 illustriert die Temperaturverläufe der einzelnen Geschwindigkeiten. Da sich die Stempelkraft bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten lediglich marginal ändert, ist in der Graphik nur ein repräsentativer Kraftverlauf dargestellt. Ein Vergleich der Temperaturprofile zeigt hingegen, dass eine Reduzierung der Stempelgeschwindigkeit eine deutliche Senkung der maximal auftretenden Temperatur bewirkt. Während die maximale Temperatur bei 70 mm/s noch 256 °C beträgt, sinkt diese bei 40 mm/s auf 170 °C und letztendlich bei 10 mm/s auf 85 °C. Dieser Rückgang ist auf die Zeitkonstante der Wärmeleitung zurückzuführen. Lediglich unter sehr geringen Stempelgeschwindigkeiten kann beim Umformen von isothermen Verhältnissen in der Umformzone ausgegangen werden, da hier genügend Zeit

zum Temperausgleich mit dem restlichen Werkstoffvolumen bleibt. Im Gegensatz dazu kann der Prozess bei hohen Umformgeschwindigkeiten einen adiabatischen Charakter annehmen, da hier keine Zeit für die Konduktion der in Wärme dissipierende Umformarbeit verbleibt.

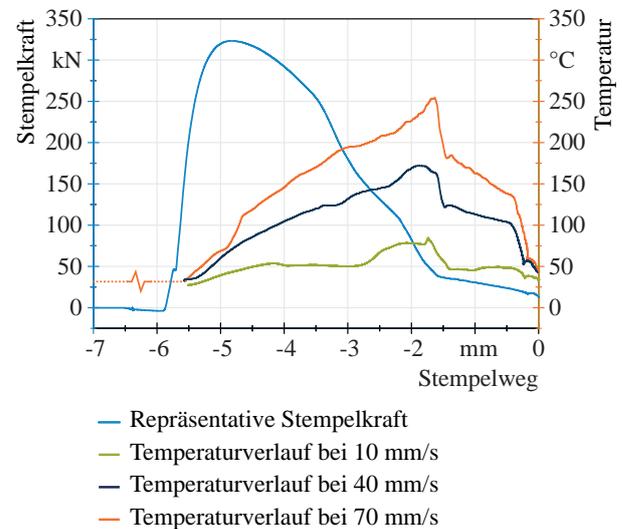


Abbildung 7: Repräsentativer Stempelkraftverlauf sowie Temperaturverläufe bei Stempelgeschwindigkeiten 10, 40 und 70 mm/s und einem Schneidspalt von 1,5 %

Auch die Temperaturverläufe der einzelnen Geschwindigkeiten weisen dieselbe bereits beschriebene Charakteristik auf. Alle Verläufe steigen nach dem elektrischen Kontakt zwischen Blech und Stempel an und fallen mit der endgültigen Werkstofftrennung stark ab. Grund hierfür ist die vergleichbare Schnittflächenausbildung bei der jeweiligen Geschwindigkeit. Folglich ist die unterschiedliche hohe Maximaltemperatur lediglich auf die zeitabhängige Wärmeleitung zurückzuführen.

5 Fazit und Ausblick

In diesen Untersuchungen wurden anhand eines Werkzeug-Werkstück-Thermoelements die Auswirkungen der Prozessparameter Stempelgeschwindigkeit und Schneid- bzw. Durchsetzspalt auf die in der Umformzone entstehende Temperatur untersucht. Im Rahmen verschiedener Scherschneidversuchen konnte gezeigt werden, dass die Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf die entstehende Temperatur aufweisen. Während der charakteristische Verlauf der Temperaturkurve vergleichbar ist, bewirken sowohl die Stempelgeschwindigkeit als auch der Durchsetz- bzw. Schneidspalt eine signifikante Änderung der maximalen Temperaturen. Diese treten unabhängig von der Wahl der Prozessparameter kurz vor der Werkstofftrennung und somit bei der maximalen Durchsetztiefe auf.

Die höchste Temperatur von 256 °C wurde bei einer Stempelgeschwindigkeit von 70 mm/s und einem Schneidspalt von 1,5 % der Blechdicke gemessen. Mit zunehmendem Schneidspalt sank diese bis auf 146 °C bei 12 % ab. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf den geringeren Glattschnittanteil der Schnittfläche zurückzuführen. Da folglich geringere Umformgrade im Werkstoff erreicht werden, dissipiert weniger Umformarbeit in Wärme und die Temperatur bleibt auf einem geringeren Niveau. Darüber hinaus vergrößert sich die Umformzone

mit steigendem Schneidspalt, wodurch die Wärmezufuhr auf ein größeres Volumen verteilt wird.

Im Gegensatz dazu verringert sich die Temperatur bei niedrigeren Stempelgeschwindigkeiten. Hierbei wurde eine Temperatur von 85 °C bei 10 mm/s gemessen, was einer Senkung auf 33 % im Vergleich zu 70 mm/s entspricht. Ursache hierfür ist die Wärmeleitung. Mit zunehmender Geschwindigkeit fehlt die Zeit für einen Ausgleich der eingebrachten Wärme im Werkstoff. Aus diesem Grund steigen die Temperaturen trotz vergleichbarer Schnittflächen in der Umformzone deutlich.

Grundsätzlich konnten die von Demmel et al. erzielten Erkenntnisse hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und der auftretenden Temperatur bei dem Blechwerkstoff S355MC [7] auch für den Vergütungsstahl C45LC bestätigt werden.

Derzeit wird die hier verwendete Messmethode auf andere Stempelgeometrien ausgeweitet, um die Auswirkungen kleinerer Stempeldurchmesser und Schneidspalte zu untersuchen. Weitere Werkstoffe wie Aluminium und rostfreier Edelstahl werden aktuell hinsichtlich maximal auftretender Temperaturen sowie ähnlicher Tendenzen bei der Parametervariation untersucht.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung unter der Nummer VO 1487/6.

Literaturverzeichnis

- [1] G.I. Taylor, H. Quinney: The Latent Energy Remaining in a Metal after Cold Working. *Proceedings of the Royal Society of London*, 413 (1933) 307-325
- [2] P. Rosakis, A.J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany: A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (2000) 581-607
- [3] P. Demmel, H. Hoffmann, C. Intra, R. Golle, W. Volk: Interaction of heat generation and material behaviour in sheet metal blanking. *Cirp Annals – Manufacturing Technology*, 64 (2015) 249-252
- [4] H. Uetz, K. Sommer: Grenzflächentemperaturen bei Gleitbeanspruchung und deren Wirkung. *Mineralöltechnik*, 12-17 (1982) 3-25
- [5] S.H. Kim, J.J. Kang, K.-Y. Lee, H.-Y. Kim: The Effect of Temperature Rise in a Fineblanking Tool. *AIP Conference Proceedings*, 908 (2007) 877-882
- [6] Z.H. Chen, L.C. Chan: An investigation on the formation and propagation of shear band in fine-blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*, 138 (2003) 610-614
- [7] P. Demmel: In-situ Temperaturmessung beim Scherschneiden. *Dissertation: Technische Universität München* (2014)
- [8] P. Tröber, P. Demmel, H.A. Weiss, R. Golle, W. Volk, In-situ Temperaturmessung beim schmierstofffreien Durchsetzen von Vergütungsstahl, *Dry Metal Forming OAJ FMT*, 3 (2017) 13–16
- [9] P. Demmel, P. Tröber, T. Kopp, R. Golle, W. Volk, H. Hoffmann: Characterization of the thermoelectric behavior of plastically deformed steels by means of relative Seebeck coefficient, *Materials Science Forum*, 755 (2013) 1-7.