



## In-situ Temperaturmessung beim schmierstofffreien Durchsetzen von Vergütungsstahl

Philipp Tröber<sup>\*1</sup>, Peter Demmel<sup>2</sup>, Hannes Alois Weiss<sup>1</sup>, Roland Golle<sup>1</sup>, Wolfram Volk<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>MAN Truck & Bus AG, Dachauer Str. 667, 80995 München, Deutschland

### Abstract

Die Kaltumformung gehört zusammen mit dem Scherschneiden zu den wichtigsten Blechbearbeitungsverfahren. Sie ermöglichen die Herstellung präziser Bauteile bei hohen Hubzahlen. Eine hohe Wirtschaftlichkeit kann dabei nur durch lange Wartungsintervalle und einem stabil laufenden Prozess erreicht werden. Einer der wichtigsten Faktoren in diesem Zusammenhang ist die bei der Umformung im Blech entstehende Temperatur. Diese steigt während des Prozesses aufgrund von in Wärme dissipierender plastischer Arbeit sowie Reibung stark an. Hohe Temperaturen können nicht nur die Bauteileigenschaften sowie deren Qualität, sondern auch den Werkzeugverschleiß signifikant beeinflussen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der vorherrschenden Temperaturen bei der Blechverarbeitung von enormer Wichtigkeit. Stellvertretend für andere Umformverfahren wurde in dieser Untersuchung die Temperaturentwicklung anhand von Scherschneidversuchen ermittelt.

**Keywords:** Durchsetzen, Scherschneiden, Temperatur, Thermoelektrizität

### 1 Einleitung

Die Kaltumformung zählt zusammen mit dem Scherschneiden zu den wichtigsten Massenfertigungsverfahren für Blechwerkstoffe. Um eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen, sind lange Wartungsintervalle und ein stabil laufender Prozess unumgänglich. Dies erfordert jedoch ein präzises Verständnis des jeweiligen Fertigungsprozesses.

Ein wichtiger Faktor in diesem Zusammenhang ist die vorherrschende Temperatur im Werkzeug. Gerade bei Verfahren mit hohen Flächenpressungen und Umformgraden, wie Durchsetzen oder Scherschneiden, ist das Blech starken Belastungen ausgesetzt, wodurch höchste Temperaturen entstehen. Bis zu 95 % der benötigten unelastischen Arbeit wird in Wärmeenergie umgewandelt [1]. Nur ein kleiner Teil verbleibt im Werkstoff in Form von Versetzungen und Fehlern in der Kristallstruktur [2]. Zusammen mit der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück steigt folglich die Temperatur in der Umformzone stark an.

Ergebnisse bisherige Temperaturmessungen beim Scherschneiden weichen stark voneinander ab. Demmel

et al. verwendete für seine Untersuchungen ein Werkzeug-Werkstück-Thermoelement, wodurch er Temperaturen direkt an der Schneidkante des Stempels messen konnte. Er ermittelte beim Scherschneiden eines Tiefziehstahls mit einer Blechdicke von 6 mm eine Temperatur von knapp 300°C. Bei einem 4 mm Blech derselben Güte entstand eine Temperatur von 250°C [3]. Andere Temperaturangaben in der Literatur reichen von unter 140°C [4, 5] bis 600°C [6]. Mitunter wurden sogar Werte bis zu 1000°C [7] ermittelt. Aufgrund der großen Streuung der ermittelten Werte kann demnach nur bedingt eine Aussage über lokal vorherrschende Temperaturen getroffen werden.

Diese hohen Temperaturen beeinflussen sowohl das Fließverhalten des Blechwerkstoffs als auch die Rissinitiierung und das Risswachstum [8, 9]. Folglich sind sie ein entscheidender Faktor für Größen wie die maximal erreichbare Durchsetztiefe. Darüber hinaus hat die Temperatur großen Einfluss auf den auftretenden Verschleiß und kann zu vorzeitigem Ausfall der Werkzeugaktivelemente durch Materialermüdung führen [10]. Aus diesem

Grund wird im Rahmen dieser Untersuchung die auftretende Temperatur an der Stempelkante beim Durchsetzen bzw. Scherschneiden untersucht.

## 2 Messprinzip

In der Literatur werden diverse Methoden der Temperaturbestimmung beim Scherschneiden beschrieben. Eine häufige Methode ist die Applikation dünner Thermolemente nahe der Stempelkante. Diese besitzen jedoch zwei entscheidende Nachteile: Neben dem langsamen Ansprechverhalten der Sensoren, bewirkt deren Einbettung in den Stempel durch Löcher oder Nuten eine Schwächung des Werkzeugs. Eine weitere Methode ist die Verwendung optischer Messsysteme. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit im Werkzeug, können solche Verfahren jedoch meist erst nach dem eigentlichen Umformvorgang angewendet werden. Auch verfallischen oxidierende Oberflächen der Werkstücke oder auch Schmierstoffreste die Messergebnisse. Generell ermöglicht keine dieser Messmethoden eine instantane Erfassung der Temperatur über den kompletten Schneidprozess.

Basierend auf unterschiedlichen thermoelektrischen Eigenschaften von Werkzeug- und Blechwerkstoff, kann eine Messmethode realisiert werden, welche die oben genannten Anforderungen erfüllt. In einem offenen Stromkreis aus zwei verbundenen elektrischen Leitern, welche einem Temperaturgradienten unterliegen, entsteht immer eine elektrische Spannung, die sogenannte Thermospannung. Diese ist proportional zur Temperatur der Verbindungsstelle. Grund hierfür ist der Seebeck Effekt, der in der technischen Temperaturmessung in Form von Thermolementen genutzt und analog in einem Umform- oder Scherschneidwerkzeug angewendet werden kann.

Abbildung 1 zeigt das Prinzip eines Werkzeug-Werkstück-Thermolements entsprechend den Untersuchungen von Demmel et al. [3] Hierbei bilden Stempel und Blechwerkstoff ein Leiterpaar, welches vom restlichen Werkzeug elektrisch isoliert ist. Die Umformzone stellt durch den innigen Kontakt zwischen Stempel und Werkstoff die Verbindungsstelle der beiden elektrischen Leiter dar. Da diese Zone gleichzeitig der Ort der Temperaturentstehung ist, werden Verzögerungen durch die Zeitkonstante der Wärmekonvektion vermieden. Im Gegensatz zur Verwendung eines Thermolementes muss so kein zusätzliches Material erwärmt werden. Eine spezielle Stempelgeometrie mit Hinterschnitten reduziert die Berührfläche zwischen Stempel und Blech auf die Stempelkante. Dies führt zu einer örtlich definierten Aufnahme der Temperatur.

Um aus der gemessenen thermoelektrischen Spannung Rückschlüsse auf die Temperatur ziehen zu können, muss das Werkzeug-Werkstück-Thermolement kalibriert werden. Hierfür werden sowohl der Stempel- als auch der Blechwerkstoff hinsichtlich ihrer thermoelektrischen Eigenschaften charakterisiert. Zunächst wird die Thermospannung eines jeden Werkstoffes bezogen auf ein Referenzmaterial unter Berücksichtigung des exakten Temperaturgradienten entlang der Probe ermittelt. Dies erfolgt in einer eigens für diesen Zweck entwickelten

Versuchsvorrichtung. Durch eine anschließende Verrechnung der Thermospannungskurven kann jedem Spannungswert im Werkzeug eine bestimmte Temperatur zugeordnet werden. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens wird in [11] gegeben.

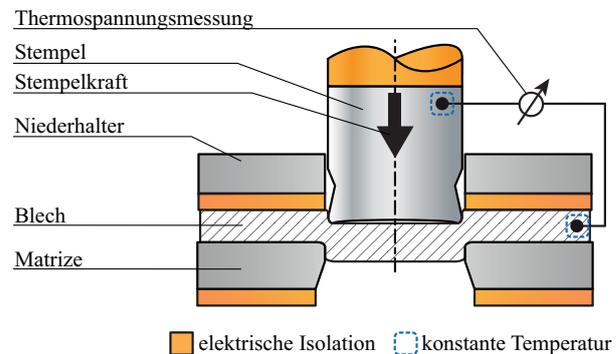


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Werkzeug-Werkstück-Thermolements nach [3]

## 3 Versuchsanlagen und -aufbau

### 3.1 Werkzeug

Für die Untersuchungen wurde ein steifes Werkzeug, welches sowohl für Umform- als auch Schneidoperationen mit hohen Prozesskräften ausgelegt ist, verwendet. Keramikapplikationen stellen eine elektrische Isolierung der Aktivelemente auch bei hoher Werkzeugbeanspruchung sicher. Dies verhindert eine Verfälschung der gemessenen Temperatur durch über den Pressenrahmen übertragene elektrische Störsignale. Der Stempel hat einen Durchmesser von 70 mm. Hinterschnitte an Mantel- und Stirnfläche wurden mittels FE-Simulationen ausgelegt, sodass während des Umformens lediglich zwischen Stempelkante und Blechwerkstoff elektrischer Kontakt besteht. Dies wird darüber hinaus durch Einlegen eines elektrisch isolierenden Papiers zwischen Stempelstirnfläche und Blech sichergestellt. Ein Stempelkantenradius von 25  $\mu\text{m}$  verhindert lokale Spannungsspitzen und reduziert folglich die Gefahr von Ausbrüchen.

Die entstehende Thermospannung liegt aufgrund ähnlicher thermoelektrischer Werkstoffeigenschaften zwischen Stempel und Blech im Bereich von wenigen Millivolt. Aus diesem Grund wird das gemessene Spannungssignal nahe am Werkzeug verstärkt. Eine zusätzliche Filterung gewährleistet eine möglichst hohe Signalqualität. Da die ermittelte Thermospannung nur Rückschlüsse auf den Temperaturgradienten der elektrischen Leiter zulässt, wird die Umgebungstemperatur durch hochpräzise Halbleiter-Temperatur Sensoren gemessen. Um Zusammenhänge mit dem Scherschneidprozess abzuleiten, werden Stempelkraft und -weg simultan zur Thermospannung erfasst.

Das Werkzeug wurde auf einer hydraulischen, dreifachwirkenden Presse bei einer Stempelgeschwindigkeit von 70 mm/s eingesetzt. Der relative Schneidspalt wurde auf 1,5 % der Blechdicke festgelegt, was einem absoluten Wert von 0,06 mm entspricht.

### 3.2 Versuchswerkstoffe

Um eine möglichst genaue Temperaturmessung zu garantieren, ist die Verwendung homogener Werkstoffe mit konstanten thermoelektrischen Eigenschaften über

das Volumen Voraussetzung. CF-H40s ist eine Hartmetallsorte, welche mittlere bis feine Korngrößen sowie ein sehr homogenes Gefüge aufweist. Mit einer Härte von 1400 HV10 eignet sich dieser Werkstoff hervorragend für die Verwendung in einem Werkzeug-Werkstück-Thermoelement.

Als Blechwerkstoff wurde der in der Industrie häufig zum Einsatz kommende Vergütungsstahl C45LC mit einer Dicke von 4 mm verwendet. Dieser besitzt eine Dehngrenze von 287 MPa sowie eine Streckgrenze von 482 MPa.

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

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

#### 4 Versuchsergebnisse

Mit den beschriebenen Versuchsaufbauten wurden stellvertretend für Umformverfahren wie dem Durchsetzen Temperaturmessungen am Beispiel des Scherschneidens durchgeführt. Der dabei aufgezeichnete Temperaturverlauf ist charakteristisch für Scherschneidoperationen, wie in Abbildung 2 ersichtlich ist.

Zu Beginn wird das Blech zwischen Niederhalter und Matrize geklemmt. Der noch offene Kontakt zwischen Stempel und Blech führt zu einer antennenähnlichen Schaltung, weswegen gemessene elektrische Spannungen durch elektromagnetische Störsignale und nicht durch den Seebeck-Effekt hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wurde die aus der Thermospannung berechnete Temperatur vor dem Kontakt nicht dargestellt.

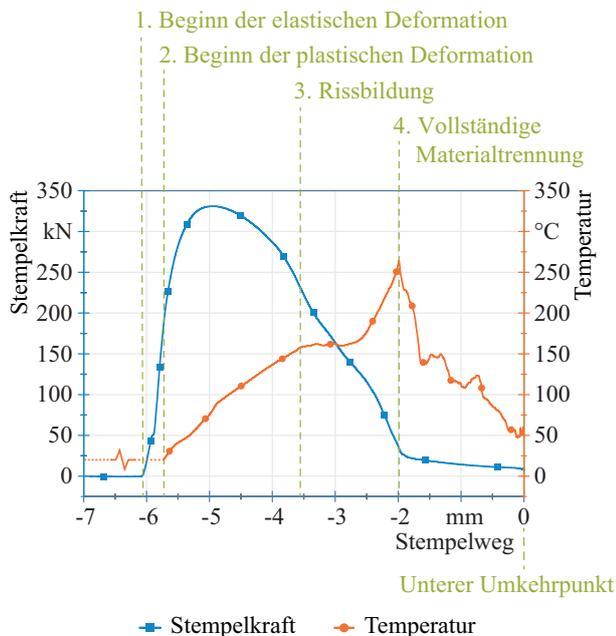


Abbildung 2: Repräsentativer Stempelkraft- und Temperaturverlauf für einen Scherschneidvorgang bezogen auf den Stempelweg (Blechwerkstoff C45LC mit 4 mm Dicke)

Der eigentliche Scherschneidvorgang beginnt mit dem Aufsetzen des Stempels auf dem Blech, was sich durch einen steilen Anstieg der Stempelkraft bemerkbar

macht (Phase 1). Während dieser Phase werden das Werkzeug, die Presse und das Blech elastisch verformt. Ein thermoelektrisches Signal erscheint mit Beginn der plastischen Deformation des Blechwerkstoffs, unmittelbar nach Durchtrennen des Isolatorpapiers (Phase 2). Die Temperatur zu Beginn liegt bei 24°C, was bereits über der Umgebungstemperatur liegt. Diese Starttemperatur des Schneidvorgangs begründet sich in der Einebnung von Mikrorauheiten, wodurch dissipierende Umformenergie bereits zu einer geringen Erwärmung führt. Ferner kommt es hierbei zu lokaler Reibung und somit zu zusätzlicher Wärmeeinbringung in den Werkstoff. Direkt im Anschluss steigt die Temperatur stark an, was auf das hohe Maß an verrichteter Arbeit, welche in Wärme dissipiert, zurückzuführen ist. Diese Arbeit entspricht der Fläche unter dem Stempelkraftverlauf. 3,5 mm vor dem unteren Umkehrpunkt erreicht die Temperatur ein Plateau, was sich ebenfalls in einer flacher werdenden Stempelkraftkurve widerspiegelt. In dieser Phase treten erste Risse im Werkstoff auf und breiten sich aus. Der erneute Anstieg hat mehrere Ursachen: Zum einen begründet sich die Erwärmung in der kleiner werdenden Scherzone zwischen Matrize und Stempel. Zum anderen kommt es zur Bildung von Sekundärglattschnitt und Verschmierungen, wodurch weitere Energie in Form von Wärme dissipiert. Die maximale Temperatur von 264°C wird mit der kompletten Werkstofftrennung erreicht (1,95 mm vor dem unteren Umkehrpunkt). Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von Demmel et al. [3]. Aufgrund ähnlicher Werkstoffkennwerte weichen die maximalen Temperaturen nur um 5 % voneinander ab. Der endgültige Abfall der Temperatur 1,95 mm vor dem unteren Umkehrpunkt kennzeichnet die komplette Materialtrennung. Diese erfolgt laut Diagramm 4 mm nach dem Aufsetzen des Stempels auf das Blech, was auf einen Glattschnittanteil von nahezu 100 % schließen lässt. Die dazugehörigen Schnittflächen aus Abbildung 3 bestätigen diese Ergebnisse. Auch lassen sich aus den Schnittflächen Rückschlüsse auf die Temperaturen beim Durchsetzen ziehen. Da das Ende des Glattschnitts die maximale Durchsetztiefe definiert, kann somit beim Durchsetzen von demselben maximalen Temperaturen ausgegangen werden.

Bis zum Ende des Schneidvorgangs am unteren Umkehrpunkt der Presse wird der Butzen durch den Matrizenkanal gedrückt. Aufgrund des kleinen Schneidspalts und der elastischen Rückfederung des Butzens, entstehen hierbei Reibung und undefinierte Kontaktbedingungen zwischen Stempel und Blech, welche zu einem sehr unregelmäßigen Abfall des Temperaturverlaufes führen.

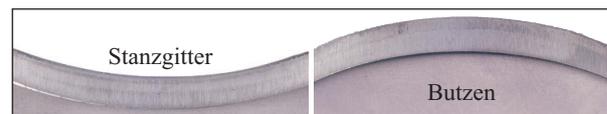


Abbildung 3: Stanzgitter und Butzen (Durchmesser 70 mm) des Werkstoffs C45LC mit einer Dicke von 4 mm

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen wurde die Temperatur beim Scherschneiden des Vergütungsstahls C45LC mit 4 mm Dicke durch ein Werkzeug-Werkstück-Thermoelement gemessen. Die Ergebnisse zeigten einen charakteristischen Temperaturverlauf über den kompletten Scherschneidvorgang hinweg. Eine maximale Temperatur von 264°C wurde am Ende des Glattschnitts mit der kompletten Werkstofftrennung ermittelt. Die Höhe der Temperatur kann die Blech- und Werkzeugwerkstoffeigenschaften deutlich beeinflussen, weswegen weitere Untersuchungen der auftretenden Temperaturen zukünftig von großer Bedeutung sein werden.

### Danksagung

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

### Literaturverzeichnis

- [1] J.-L. Chaboche: Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations. *Journal of Applied Mechanics*, 60 (1993) 913-828
- [2] A.T. Zehnder: A model for the heating due to plastic work. *Mechanics Research Communications*, 18 (1991) 23-28
- [3] P. Demmel: In-situ Temperaturmessung beim Scherschneiden. *Dissertation: Technische Universität München* (2014)
- [4] J.-W. Raedth: Grundlagen für das schmiermittelreduzierte Tribosystem bei der Kaltumformung des Einsatzstahles. *Dissertation: RWTH Aachen* (2002)
- [5] M. Vaz, J.D. Bressan: A computational approach to blanking processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002) 206-212
- [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. Huml: Hochgeschwindigkeitsschneiden. *Draht-Fachzeitschrift*, 27 (1975) 207-211
- [8] B. Ortner, H.-P. Stüwe: Dynamische Rekristallisation. *Zeitschrift für Metallkunde*, 67 (1976) 672-677
- [9] A.T. Zehnder, A.J. Rosakis: On the temperature distribution at the vicinity of dynamically propagating cracks in 4340 steel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 39 (1991) 385-415
- [10] H. Uetz, K. Sommer: Grenzflächentemperaturen bei Gleitbeanspruchung und deren Wirkung. *Mineralöltechnik*, 12-17 (1982) 3-25
- [11] P. Demmel, P. Tröber: Characterization of the thermoelectric behavior of plastically deformed steels by means of relative Seebeck coefficient, *Materials Science Forum*, 755 (2013) 1-7