

Selbstlernende Steuerung des Kaltpressens reduziert Ausschuss während der Anlaufphase und der Serienfertigung



Die wiederkehrenden Anlaufphasen zu Beginn gewöhnlicher Serienproduktionsaufträge in der Kaltmassivumformung führen häufig zu erheblichem Ausschuss bis zum Erreichen stabiler Prozessbedingungen. Zur Entwicklung und Absicherung von Vorgehensweisen zur Verkürzung dieser Zeitphasen wurde am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart eine dreistufige Kaltfließpressfolge aufgebaut, die über eine Verstellmöglichkeit des Pressstempels in Arbeitsrichtung zwischen den Stößelhüben verfügt. Mit diesem Aufbau war es möglich, eine selbstlernende Steuerung einzelner Pressstempel in Abhängigkeit von Qualitätsmerkmalen des gepressten Werkstücks zu erarbeiten.

AUTOREN

**Tahsin Deliktas, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

**Papdo Tchasse, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

**Philipp Clauß**

ist Betriebsleiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA**

ist Institutsleiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

Angesichts der steigenden Energie- und Rohstoffkosten zählt das Kaltfließpressen zu den effizientesten Verfahren für die Massenproduktion metallischer, hochpräziser Bauteile für Massengüter in vielen Bereichen wie zum Beispiel Bauwesen, Haushaltswaren, Verbindungstechnik und Automobilindustrie. Die hohe Effizienz dieser Produktionsverfahren wird durch instationäre thermische Prozessbedingungen sowie durch das ähnliche, jedoch nicht dasselbe Halbzeug oftmals merklich beeinträchtigt, wenn auch dessen Eigenschaften innerhalb der Lieferspezifikation liegt. Solche Phasen treten auch nach einem Werkzeugwechsel auf und sind erst mit dem Erreichen stabiler Prozessbedingungen beendet. Hinzu kommt, dass seit 1. Januar 2024 größere Unternehmen in Bezug auf CO₂-Bilanz am Ende ihres Fiskaljahres berichtspflichtig werden und damit die mit jeglichem Ausschuss behafteten CO₂-Mengen erfasst werden müssen. Die Motivation des durchgeführten Projekts lag daher in der Analyse von Potenzialen der Schrottvermeidung in Prozessketten der Kaltmassivumformung, da (Primär-)Aluminium und Stahl als Werkstoff sehr hohe CO₂-Träger darstellen.

Das Projekt zeigte, dass die wesentlichen Haupteinflussfaktoren der Pressteilgenauigkeit die Werkzeugtempe-

ratur sowie die daraus resultierenden thermisch bedingten Dehnungseffekte aller Werkzeugkomponenten sind. In [1] wurde die Längenänderung von Pressstempeln unter gleichzeitiger thermischer und mechanischer Druckbelastung analysiert. Weitere wichtige Einflussfaktoren für die Ausprägung und die Dauer von Anlaufphasen stellen neben der ansteigenden Werkzeugtemperatur auch Schwankungen der mechanischen Eigenschaften und die Volumenkonstanz der Rohteile [2], die Steifigkeit des Kräftewirksamkeits [1] sowie die mit der Temperaturentwicklung verbundenen tribologischen Bedingungen [3] dar. Während der Anlaufphase treten zyklische Temperaturerhöhungen im Umformwerkzeug auf, welche erst nach mehreren hundert Umformhüben zu einem Gleichgewichtszustand zwischen abgeführter und induzierter Wärmeenergie führen [4, 5]. Erst dann wird eine quasistationäre Werkzeugtemperatur erreicht, was die Anlaufphase beendet.

In der industriellen Praxis werden derartige instabile Prozessbedingungen heute durch zeitaufwändige manuelle Anpassungen verkürzt, was die Entwicklung von Einstellhilfen oder sogar automatisierten Aktuatoren erforderlich macht. Derartige, sich selbsttätig an sich verändernde Prozessbedingungen anpassende Subsysteme bilden daher zukünftige

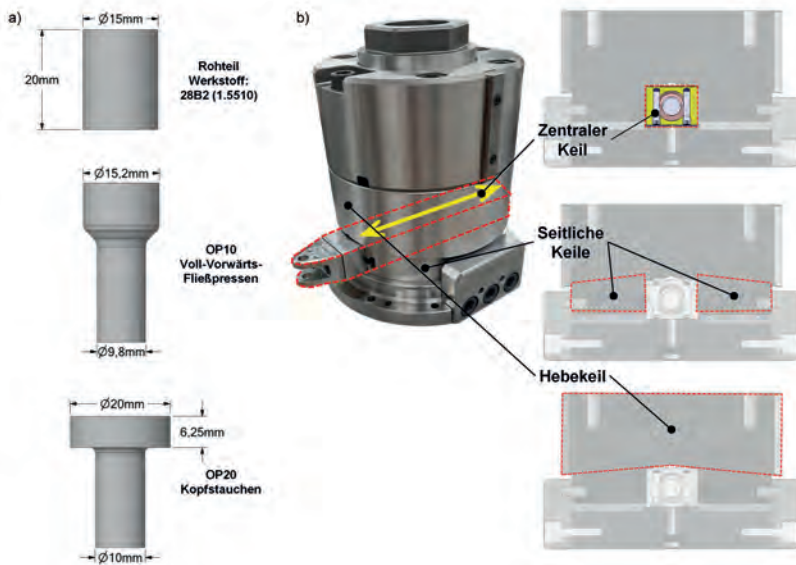


Bild 1: a) Stadienfolge des Laborversuchs, b) Keilversteleinheit

Entwicklungsziele auf diesem Gebiet. Dies erfordert jedoch ein vertieftes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Bauteileigenschaften und Umformmaschine.

Am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart wurde die Anlaufphase einer typischen Prozessfolge der Kaltmassivumformung im Rahmen eines AiF-Projekts (IGF 21635 N) methodisch untersucht. Zu Beginn des Projekts wurden Messdaten beim Projektpartner Arnold Umformtechnik GmbH & Co KG bei Produktionsstart aufgenommen, um die prinzipielle Vorgehensweise der Maschinenbediener während der Anlaufphase eines Serienauftrages zu verstehen. Nachfolgend wurden automatisierte Vorversuche mit einem einstufigen Napf-Rückwärts-Fließpressvorgang mit dem Werkstoff C15 im Versuchsfeld des IFU Stuttgart durchgeführt und dabei die Werkzeugtemperatur und Napfbodendicke ermittelt [6]. Schließlich erfolgte der Aufbau einer vollautomatisierten Demonstratoranlage, bestehend aus einem dreistufigen Kaltfließpressprozess mit integrierten Keilsystemen zur adaptiven Steuerung der Pressstempelposition in Arbeitsrichtung. Das Keilsystem wurde in der Schlussphase des Projektes in mehreren Anlaufproduktionen in der ersten und zweiten Umformstufe eingesetzt, um Trainingsdaten zu generieren und ein neuronales Netzwerk zu trainieren. Nach iterativer Optimierung des selbstlernenden Systems erfolgte eine

finale, öffentliche Vorstellung der adaptiven Prozesssteuerung im Juni 2024. Zukünftige Prozessanlaufphasen in der Kaltmassivumformung können damit verkürzt werden, sofern die Prozessfolge die konstruktive Integration des Keilsystems in die jeweilige Anwendung möglich macht.

WERKZEUGAUFBAU UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Die experimentellen Umformversuche erfolgten am IFU Stuttgart auf einer stehenden servomechanischen Presse (Schuler MSL 1-500-0,85-500) mit einer max. Presskraft von 5000 kN. Für die automatisierte Durchführung von mehrstufigen Kaltfließpressoperationen wurde ein dreistufiges Versuchswerkzeug entwickelt und aufgebaut. Zur Prozessdatenerfassung wurden Kraftmesssensoren zur Erfassung der Stempel- und Auswerferkräfte, Wegmesssensoren zur Bestimmung von Stempel- und Auswerferwegen sowie Temperatursensoren zur Messung der Matrizen Temperaturen in den Werkzeugsatz integriert. Zusätzlich wurde ein Laserprofilsensor des Herstellers Microepsilon („scanCONTROL-29“) zur Presseilvermessung in das Oberteil der 3. Umformstufe montiert, um damit die Kopfhöhe des Pressteils nach jedem Hub zu ermitteln. Beim eingesetzten Umformprozess handelt es sich um das Voll-Vorwärts-Fließpressen und das nachfolgende Kopfstauchen, um ein schraubenähnliches Pressteil zu

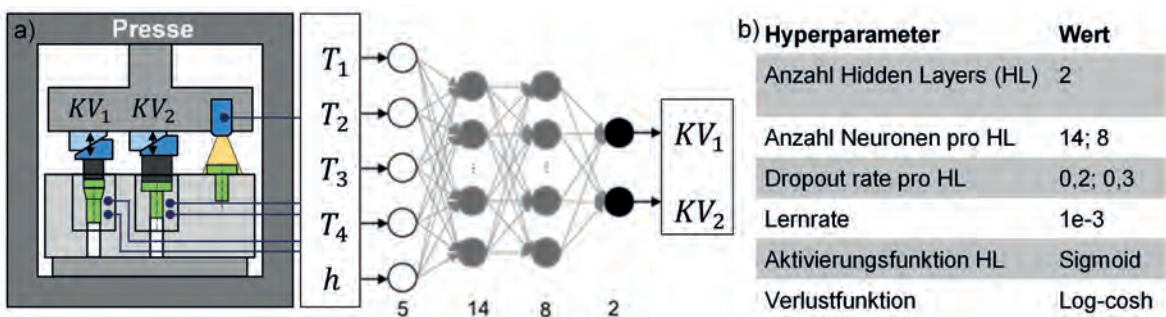


Bild 2: a) Aufbau des neuronalen Netzes für die adaptive Steuerung, b) Daten für das neuronale Netz

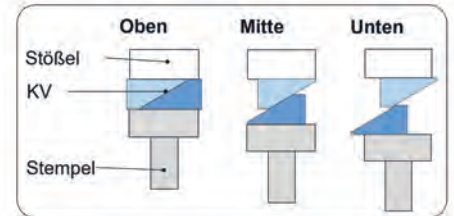
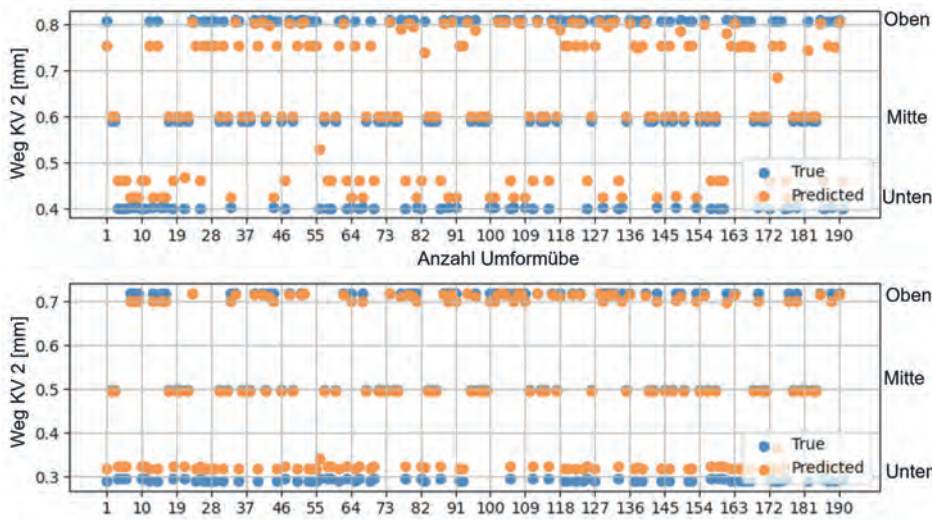


Bild 3: Vorhersage(orange)- und Validierungswerte (blau) jeweils für die unteren, mittleren und oberen Positionen beider Keilverstellereinheiten

fertigen (siehe Bild 1). Die Versuchsdurchführung erfolgte vollautomatisiert bei 25 Hub/min mit Drahtabschnitten aus 28B2 (1.5510) mit dem Schmier­system Phosphat und Seife.

Zur mechanischen Nachführung der Presstempelposition in den Umformstufen wurde am Institut ein neuartiges Keilsystem mit Selbsthemmung entwickelt. Im Vergleich zu bisherigen Keilverstellereinheiten ist dieses Keilsystem nicht nur mit einem, sondern mit mehreren, ineinander integrierten Keilen ausgestattet. Das extern angebrachte Spindelgetriebe nebst Schrittmotor bewegen einen zentralen Keil, der zwei seitliche Keile verdrängt und dabei einen größeren Hubkeil in Arbeitsrichtung verschiebt. Die maximale Hubhöhe der Einheit beträgt 0,5 mm und kann mit einer Auflösung von ca. 0,01 µm/Motorschritt bei insgesamt 55.000 Motorschritten zwischen den Umformhüben verstellt werden.

AUFBAU DES NEURONALEN NETZES

Die Messdaten des Versuchswerkzeugs wurden mittels eines neuronalen Netzwerkes verarbeitet, das die Stellgrößen für die Schrittmotoren der beiden Keilsysteme als Ausgabe bereit­stellte. Das Netzwerk wurde mittels „Supervised Learning“ trainiert. Als Eingabewerte wurden die Werkzeugtemperaturen T1 bis T4 (je zwei Temperatursensoren pro Umformmatrize) sowie die mittels des Laserprofilsensors ermittelte Kopfhöhe h des

Pressteils verwendet. Die Ausgabewerte des Netzes dienten als Stellgrößen für die Keilverstellereinheiten KV1 und KV2. Basierend hierauf wurde ein neuronales Netz bestehend aus fünf Eingangsparametern, zwei versteckten Schichten und zwei Ausgangsparametern aufgebaut (siehe Bild 2a). Für die Aktivierung der versteckten Schichten wurde die Sigmoid-Funktion verwendet und als Verlustfunktion die logarithmische Funktion des hyperbolischen Kosinus. Die Einstellgrößen des neuronalen Netzes sind in Bild 2b zusammengefasst.

Zur Generierung einer Datenbasis für das Training dieses neuronalen Netzes wurden Versuchsreihen mit zwei Strategien aufgezeichnet. Die erste Strategie bestand darin, für jede Umformstufe acht unterschiedliche, feste Stempelpositionen einzustellen und jeweils 300 Pressteile pro Versuchsreihe umzuformen. Die zweite Strategie bestand darin, zufällige Stempelpositionen für jeden Hub innerhalb vorgegebener Grenzen zu generieren. Durch diese beiden Ansätze und die Aufzeichnung der Messdaten Werkzeugtemperatur und Kopfhöhe konnte ein geeigneter Trainingsdatensatz generiert werden. Vor der Nutzung der Daten für das Netztraining erfolgte noch ein Preprocessing der Daten. Das Bestimmtheitsmaß R^2 zeigte nach dem Training Werte von 84 Prozent für Stempelposition 1 und 98 Prozent für Stempelposition 2. Bei der Validierung erreichte das Netz Werte für R^2

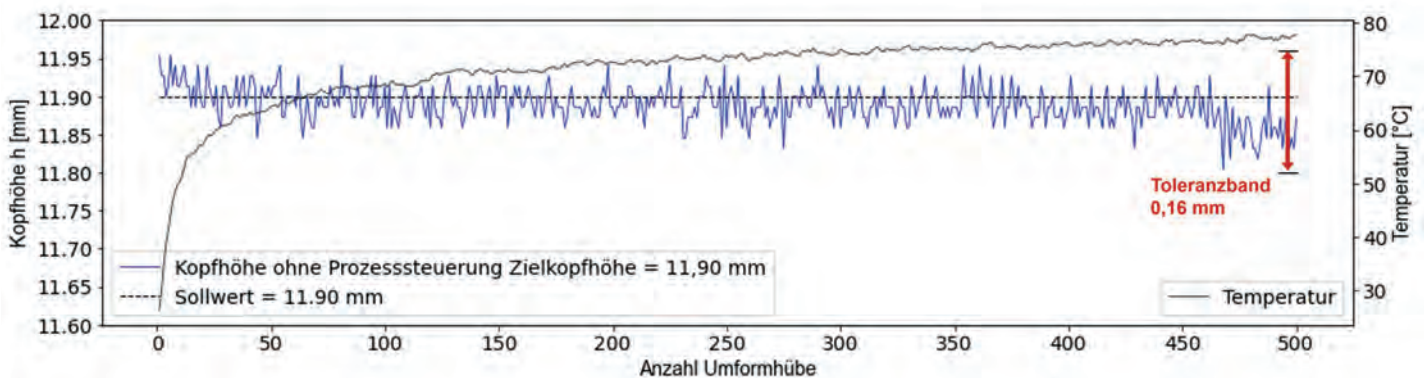


Bild 4: Experimentell ermittelter Temperaturanstieg der 2. Umformstufe mit zeitgleicher Messung der Bauteilkopfhöhe (ohne adaptive Steuerung der Keilverstellereinheiten)

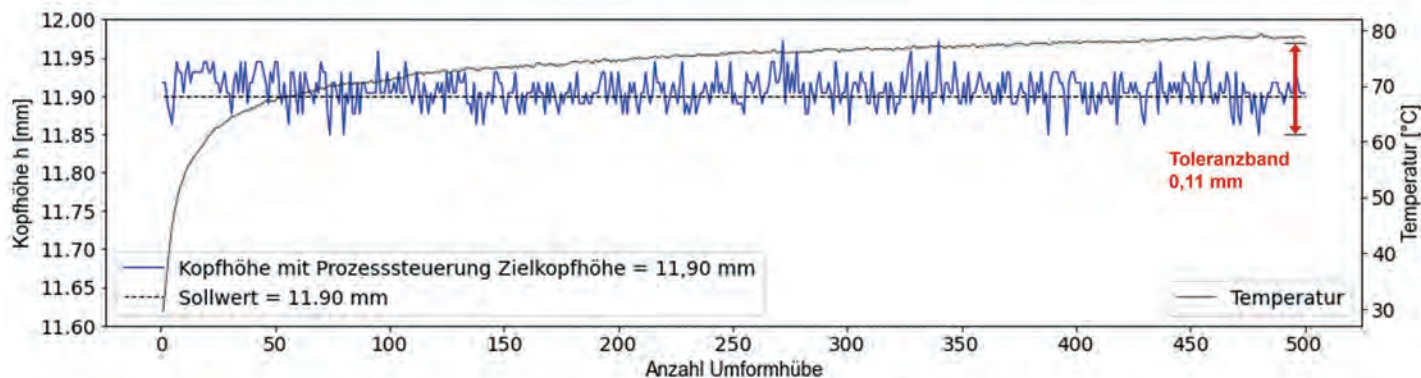


Bild 5: Experimentell ermittelter Temperaturanstieg der 2. Umformstufe mit zeitgleicher Messung der Bauteilkopfhöhe (mit adaptiver Steuerung der Keilverstelleinheiten)

von 79 Prozent für Stempelposition 1 und von 98 Prozent für Stempelposition 2. Diese Ergebnisse wurden durch zusätzliche Umformversuche bestätigt, wie in Bild 3 dargestellt.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Zu Beginn der experimentellen Untersuchungen erfolgten zunächst mehrere Anlaufphasen mit und ohne Eingriff der adaptiven selbstlernenden Steuerung, um weitere Erkenntnisse über die Wechselwirkung transienter Prozesskenngrößen untereinander und schließlich auch über Einflüsse auf die Kopfhöhe der Bauteile zur Erlangung. Repräsentativ wird dazu die nahe an der Umformzone gemessene Temperatur der zweiten Matrize (Temperatursensor 4) in Bild 4 dargestellt. Die Keilverstelleinheiten wurden dabei in beiden Umformstufen fixiert und der Prozess auf eine Zielkopfhöhe von 11,90 Millimetern eingestellt.

Der in Bild 4 gezeigte Temperaturanstieg in der zweiten Umformmatrize zeigte sich im Folgenden als typisch für die untersuchte Prozessfolge. Die Werkzeugtemperatur erhöht sich dabei ausgehend von der Raumtemperatur innerhalb von etwa 50 störungsfrei realisierten Umformhüben relativ rasch. Anschließend flacht die Steigung der Temperaturkurve ab und nähert sich dann nach ca. 500 bis 600 Hüben einer Sättigungstemperatur von fast 80 °C an. Dieser charakteristische Temperaturverlauf führt zu einer kontinuierlichen Veränderung der Kopfhöhen der Pressteile, die in Kombination mit den Volumenschwankungen des umgeformten Rohteils eine Gesamttoleranz von 0,16 Millimetern zur Folge hat. Weiterhin ist ein leicht abnehmender Trend der Kopfhöhen der Pressteile erkennbar, der mit zunehmender Anzahl an Umformhüben zu einer kumulativen Vergrößerung der Gesamttoleranz führte.

Im Anschluss wurde der gleiche experimentelle Versuch unter Verwendung der entwickelten adaptiven Steuerung der Keilverstelleinheiten durchgeführt. Die erste Funktion der Steuerung bestand darin, eine Zielkopfhöhe von 11,90 Millimetern konstant zu halten. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Bild 5 dargestellt. Durch Einsatz der selbstlernenden Steuerung konnte im Laborversuch eine Reduktion der Gesamttoleranz des Pressteils um bis zu 30 Prozent erreicht werden (Toleranzband

konstant bei 0,11 mm). Dieses Ziel konnte durch das Training des neuronalen Netzes mit einer Datenbank bestehend aus den Daten aus insgesamt 1.500 vorangegangenen Umformhüben erreicht werden.

Durch zusätzliches Training des Netzes mit Daten aus weiteren Anlaufphasen besteht zukünftig das Potenzial, die Leistung des neuronalen Netzes weiter zu erhöhen und ausschussverursachende Effekte bereits zu Beginn des Serienauftrages zu kompensieren. Die Gesamttoleranz der Pressteile würde dann lediglich von Volumenschwankungen des Rohteils abhängen. Diese Arbeiten sollen in Fortsetzungsprojekten erfolgen.

Zur Bewertung der Reaktionsschnelligkeit der adaptiven Steuerung wurde weiterhin testweise eine periodische Anpassung der Zielkopfhöhe vorgegeben und verfolgt, inwieweit sich eine solche Vorgabe auf die messtechnisch nachweisbare Kopfhöhe des Bauteils auswirkt. Dabei wurde sichergestellt, dass die adaptive Steuerung nicht nur die aktuelle Kopfhöhe verarbeitet, sondern auch Vorhersagen der Stempelpositionen auf Basis der Matrizentemperaturen berücksichtigt. In den dazu durchgeführten Testläufen wurde jeweils nach 15 Hüben eine gezielte Veränderung der Zielkopfhöhe zwischen 11,90 und 11,70 Millimetern emuliert, wie in Bild 6 dargestellt. Das System berechnete daraufhin situativ die neuen Sollpositionen der Stempel für den nächsten Hub, um die vorgegebene Kopfhöhe zu erreichen. Es wurde dabei festgestellt, dass die Keilverstelleinheiten mit ihren derzeitigen Antriebslogiken etwa 5 bis 7 Hübe benötigen, um die neue gewünschte Zielkopfhöhe zu erreichen. Das System erreicht demnach bei einer Hubzahl von 25 Hub/min und einer Sprungfunktion von hier 0,2 Millimetern eine Reaktionszeit von 12 bis 17 Sekunden, um die gewünschte Zielkopfhöhe realisieren zu können. Diese Reaktionszeit kann durch ein weniger stark untersetztes Antriebssystem der Keilverstelleinheiten verkürzt werden, bisher ist dieser „Schleppabstand“ der Steuerung von der Motorleistung und der Übersetzung des Getriebes abhängig. Trotz der fluktuierenden Messwerte der Kopfhöhe, die im Wesentlichen durch Volumenschwankungen der Rohteile verursacht wurden, lieferte das neuronale Netz im Rahmen des durchgeführten Projektes recht zufriedenstellende Ergebnisse und ist zudem mit der Funk-

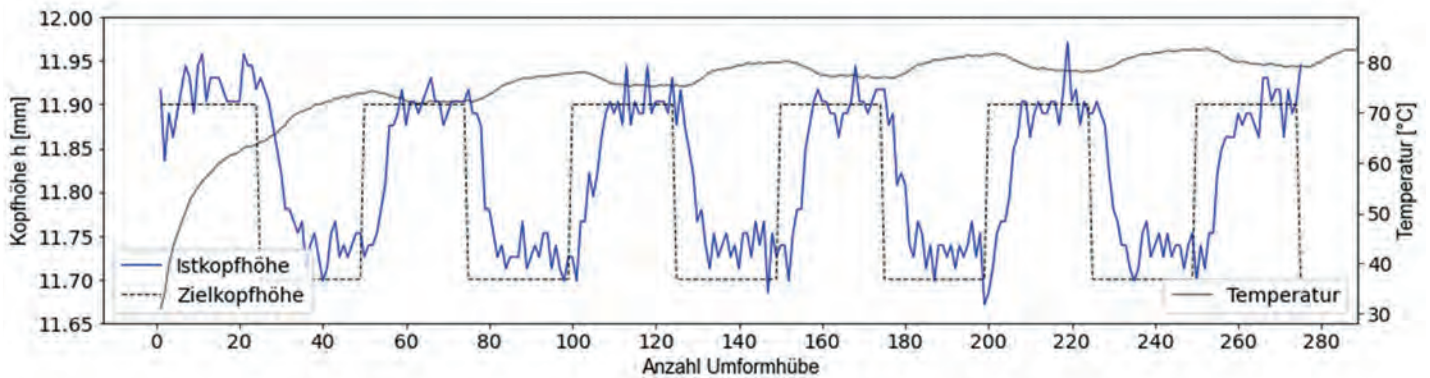


Bild 6: Zyklische Ansteuerung von zwei Zielkopfhöhen, gemessene Kopfhöhen in jedem Intervall und zeitgleich erfasste Temperaturverläufe, Bilder: Autoren

tion des periodisch durchführbaren „Nachtrainierens“ ausgestattet. Bei einem möglichen Transfer dieser entwickelten Nachrüstlösung für Werkzeugsätze der Kaltmassivumformung auf schnelllaufende Industrieprozesse könnte die Leistung des Netzes weiter gesteigert werden, wie die nachlaufenden Analysen der aufgenommenen Datensätze im Projekt zeigten. Auch erkennt man, dass die Dynamik der im Selbsthemmungsbereich arbeitenden Keilverstelleinheiten an die Hubzahl der Umformmaschine angepasst werden muss.

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die experimentellen Ergebnisse wichtige Erkenntnisse über die Auswirkungen der Stempelpositionen auf die Temperaturentwicklung und die

Kopfhöhe des Bauteils liefern. Die adaptiven Steuerungsstrategien und die Reaktionsfähigkeit des Systems haben sich in den durchgeführten Tests als effektiv erwiesen. Die Ergebnisse unterstützen die Nutzung der adaptiven Steuerung und des neuronalen Netzes zur Optimierung derartiger Prozessfolgen für die Praxis. Zukünftige Untersuchungen sollten weitere Dauerlaufversuche mit Rohteilen ohne Volumenschwankungen umfassen, um den thermischen Effekt der Prozessanlaufphase isoliert analysieren zu können. Zudem besteht erhebliches Potenzial zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des neuronalen Netzwerks durch Anpassungen der Trainingsstrategie, beispielsweise durch den Einsatz von „Reinforcement Learning“.



Der Schlussbericht zu diesem Vorhaben ist unter Angabe des Förderkennzeichens 01IF21635N bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen (info@fsv-hagen.de) für die interessierte Öffentlichkeit in Deutschland verfügbar. Das Institut für Umformtechnik bedankt sich bei dem projektbegleitenden Ausschuss für dessen wertvolle und anhaltende Unterstützung während der Bearbeitungszeit des Projekts zwischen 2021 und 2024.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



[1] Kuzman, K.: Problems of accuracy control in cold forming, J. Mater. Process. Technol., vol. 113, no. 1 – 3, pp. 10 – 15, 2001

[2] Long, H.: ‘Dimensional errors of cold formed components using FE simulation’, J. Mater. Process. Technol., vol. 151, no. 1 – 3 SPEC. ISS., pp. 355 – 366, 2004

[3] Müller, C.; Groche, P.; Oehler, O.; Scherzinger, P.; Twickler, M.: ‘Temperaturentstehung und die tribologischen Folgen bei Produktionsbeginn der Kaltmassivumformung’, Schmiede-Journal, pp. 28 – 32, 2014

[4] Qin, Y.: ‘Forming-tool design innovation and intelligent tool-structure/system concepts’, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 46, no. 11 SPEC. ISS., pp. 1253 - 1260, 2006

[5] Volke, P.; Groche, P.: ‘Interfacial heat transfer coefficients in cold forging of stainless steel’, Int. J. Mater. Form., vol. 15, no. 3, p. 32, 2022

[6] Böhm, J.; Liewald, M.; Clauß, P.: ‘Study on Scrap Reduction in Cold Forging During Ramp-Up Phases Through Actuator Control’, in Production at the Leading Edge of Technology, 2024, pp. 326 – 334