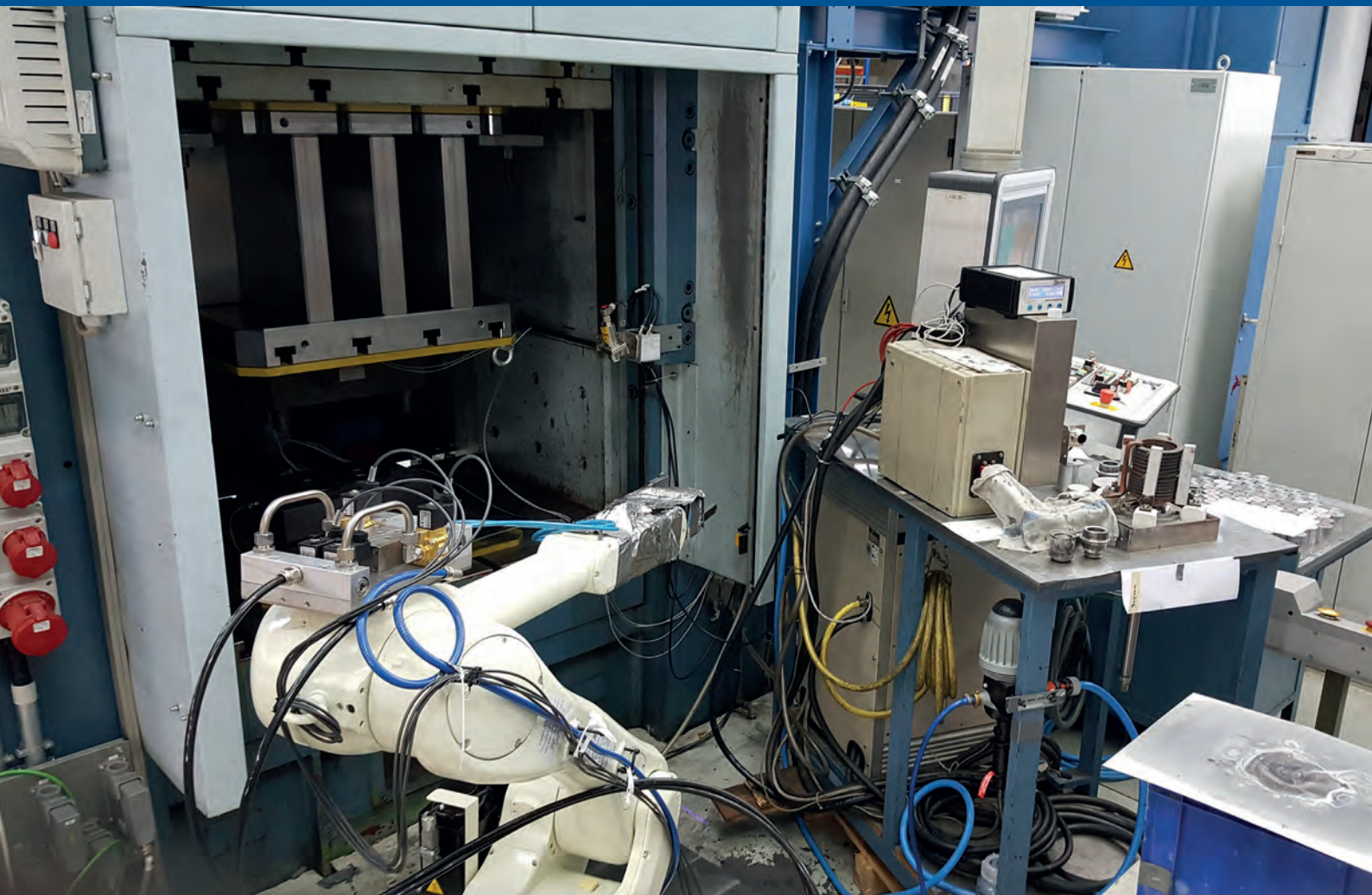


Werkstückverfolgung und adaptive Steuerung beim Gesenkschmieden

Industrie 4.0 ist mittlerweile in den großen Unternehmen in Deutschland angekommen. Allerdings sind die deutschsprachigen Industriebetriebe von einer flächendeckenden Einführung noch weit entfernt. Gerade die mittelständischen Branchen der Fertigungsindustrie tun sich mit der Einführung und Umsetzung dieser komplexen Strategie schwer.



AUTOREN



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

ist Institutsdirektor des Instituts
für Umformtechnik (IFU)
der Universität Stuttgart



Dr. sc. techn. Celalettin Karadogan

ist Gruppenleiter „Hybride Werkstoffkonzepte/
Werkstoffcharakterisierung“
am Institut für Umformtechnik (IFU)
der Universität Stuttgart



Dr.-Ing. Alexander Felde

ist Abteilungsleiter Massivumformung
am Institut für Umformtechnik (IFU)
der Universität Stuttgart



Dr.-Ing. Nasser Jazdi

ist akademischer Oberrat
und stellvertretender Institutsleiter
am Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme (IAS)
der Universität Stuttgart



Benjamin Lindemann, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme (IAS)
der Universität Stuttgart



**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.
Michael Weyrich**

leitet das Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme (IAS)
der Universität Stuttgart

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) förderte im Zeitraum von Oktober 2016 bis März 2020 ein Projekt mit der Bezeichnung „Effizienzschub in der Massivumformung durch Entwicklung und Integration digitaler Technologien im Engineering der gesamten Wertschöpfungskette“ (EMuDig 4.0). Die Forschungsschwerpunkte dieses Gemeinschaftsprojekts bildeten unter anderem die Entwicklung und Erprobung eines ganzheitlichen cyber-physischen Produktionssystems zur Verfolgung von Halbzeugen und Werkstücken im Schmiedebetrieb sowie zur adaptiven Steuerung des Schmiedevorgangs. Das Institut für Umformtechnik (IFU) und das Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart befassten sich in einem Teilprojekt mit der Einführung digitaler Technologien in die Prozesskette der Massivumformung. Verwendung fanden dabei reale Daten aus Warm Schmiedeprozessen, die in einer Modellanlage unter Laborbedingungen ermittelt wurden.

Ein wesentliches Ziel des Verbundvorhabens im Rahmen der Programmausschreibung „Digitale Technologien für die Wirtschaft (PAiGE)“ bestand darin, einzelne Elemente der Prozesskette des Gesenkschmiedens, wie etwa die Erfassung der Halbzeugeigenschaften, die Erwärmung des Halbzeugs oder den Pressvorgang selbst, als cyber-physische Komponenten aufzubauen und zu befähigen. Mit dieser Zielsetzung entstand ein Hardware-/Software-Konzept für die Shop-Floor-Ebene im Schmiedebetriebs. Dieses Konzept wurde in einer modellhaft aufgebauten Prozesskette für die Warmumformung von Aluminium am IFU realisiert, um konkrete Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten hinsichtlich der Bauteilrückverfolgung und der adaptiven Steuerung eines Schmiedeprozesses durchzuführen [1]. Bild 1 zeigt die Modellanlage am IFU Stuttgart im Laborumfeld mit vollautomatisiertem Prozessablauf. Dabei wurden die Pressensteuerung, der Handlingsroboter, die integrierte Messtechnik, die Halbzeug- und Werkzeugerwärmung sowie ein weiterer PC zur Prozess-, Mess- und Materialdatenverarbeitung als cyber-physische Systemkomponenten ausgelegt.



Bild 1: Vollautomatisierte Modellanlage für das Gesenkschmieden von Aluminium am IFU Stuttgart

Im technologischen Ablauf wurden die zylindrischen Stangenabschnitte aus dem Werkstoff EN AW-6082 zunächst chargenspezifisch mittels einer ansteuerbaren induktiven Erwärmungsanlage auf die Zieltemperatur von 400 °C bis 520 °C temperiert. Danach folgte ein zweistufiger Umformprozess zur Erzeugung einer Vor- und Fertigform jeweils in einem geschlossenen bzw. offenen Gesenk mit einer hydraulischen Presse des Herstellers SMG (maximale Presskraft 6.000 kN). Beide Schmiedegesenke konnten einzeln mithilfe integrierter Heizpatronen spezifisch temperiert und mit Kühlschmiermittel kontrolliert besprüht werden. Ein Industrieroboter sorgte für den Transfer der Werkstücke und die Schmierstoffapplikation auf die Gesenkhälften zwischen den Hüben mittels getakteter Sprühköpfe. Während des Schmiedebetriebs wurden die Temperaturen der Schmiedegesenke, des Halbzeugs und des Schmiedestücks mithilfe von Thermoelementen bzw. optischen Pyrometern aufgezeichnet. Das Erfassen der Prozesskräfte erfolgte durch die Pressenhydraulik. Die Abmessungen der Vorform nach der ersten Umformstufe und des fertigen Schmiedeteils nach der zweiten Umformstufe ermittelte ein optisches Profilmeter.

Die Prozess-, Mess- und Materialdatenverarbeitung erfolgte auf einem zusätzlichen Prozessrechner mit hardware- und softwareseitigen Steuermodulen des Herstellers Beckhoff. Bild 2 zeigt die Einbindung des Rechners in die Systemarchitektur und dessen Kommunikation mit dem Factory-Cloud-Server, der Prozessperipherie und der Pressensteuerung. Auf Basis der an diesen Server gesendeten Prozess- und Werkstückdaten errechnete die Software zwischen den Hübren und in Abhängigkeit von den Messergebnissen der Werkstückgeometrien aus der Vorform aktualisierte Steuerbefehle (UT-Lage des Stößels, Schmiermittelmenge, Soll-Temperaturen) und übergab diese per Internet an die Pressensteuerung.

RÜCKVERFOLGUNG VON HALBZEUGEN UND SCHMIEDEWERKSTÜCKEN

Die ersten Arbeitsphasen des Projekts dienten unter anderem dazu, verschiedene Ausführungen zur Werkstück- oder Cloud-bezogenen Speicherung von Material- und Produktionsdaten zu analysieren und die Datenträger und Kommunikationsprotokolle zu bewerten, die für die extremen Produktionsbedingungen in Schmiedebetrieben infrage kommen. Dabei wurden zum einen die Datenträger betrachtet, die hohen Temperaturen widerstehen können. Zum anderen wurden Direktmarkierungssysteme bewertet, mit denen beliebige Informationen in Form eines QR-Codes direkt auf dem Halbzeug oder dem Werkstück gespeichert werden können. Schließlich wurden die QR-Codes, die durch Lasermarkierungssysteme binnen weniger Sekunden aufzubringen sind, als beste Markierungsmöglichkeit qualifiziert. Die Identität jedes Werkstücks kann kurz vor der Warmumformung mit einem entsprechenden Lesegerät im Durchlauf rasch erfasst und direkt nach dem Schmiedevorgang per Laser wieder aufgebracht werden. In Verbindung mit dieser Markierungstechnik wurde eine virtuelle Strategie zur Verfolgung der

Stangenabschnitte und der Werkstücke vor und während des Schmiedeprozessablaufs auf Basis einer modellierten, sequenziellen Bearbeitung von Werkstücken erarbeitet, die auf einer strengen Inline-Registrierung von Gutteilen und Ausschuss beruhte. Diese Funktion wurde durch jeweilige Triggersignale der Pressensteuerung, durch die Werkstückvermessung nach jedem Hub und durch einen Zählalgorithmus im Handlingsroboter unterstützt. Mithilfe einer vom IAS entwickelten Software entstand somit erstmalig ein neuartiges System, das die eindeutige Zuordnung von Prozess- und Werkstückdaten entlang der Schmiedeprozesskette für beliebige Werkstückmengen beziehungsweise Sequenzen von Fertigungsaufträgen realisierte [2]. Für geringe Umformgrade sowie für kleine Oberflächenvergrößerungen der Werkstücke ließ sich belegen, dass eine vor der induktiven Erwärmung aufgebrauchte Laserbeschriftung nach dem Schmiedevorgang noch lesbar bleibt (Bild 3). Alternativ kann die Laserbeschriftung mit der bis zu vier Ziffern umfassenden numerischen Identität bei hohen Oberflächenvergrößerungen im Bedarfsfall innerhalb von 3 bis 5 Sekunden direkt nach dem Schmiedevorgang erneut aufgebracht werden.

Die Halbzeuge und Werkstücke lassen sich mittels solcher Markierungen bei niedrigen Produktionsgeschwindigkeiten auf Chargenebene oder einzeln verfolgen. Den Ausschreibungszielen des Förderprogramms entsprechend entstand für die Modellanlage ein Steuerungssystem, das die zahlreichen werkstoff- und halbzeugspezifischen Informationen, die aktuellen Prozesszustände sowie die Zustandsdaten der Anlagenperipherie mittels eines neu entwickelten Datenbanksystems organisierte. Unter Laborbedingungen waren dabei die Prozessschritte Erfassen vom Rohmaterial, Lagern, Trennen, Erwärmen, Schmieden in zwei Stufen und Vermessen vorgesehen. Für den

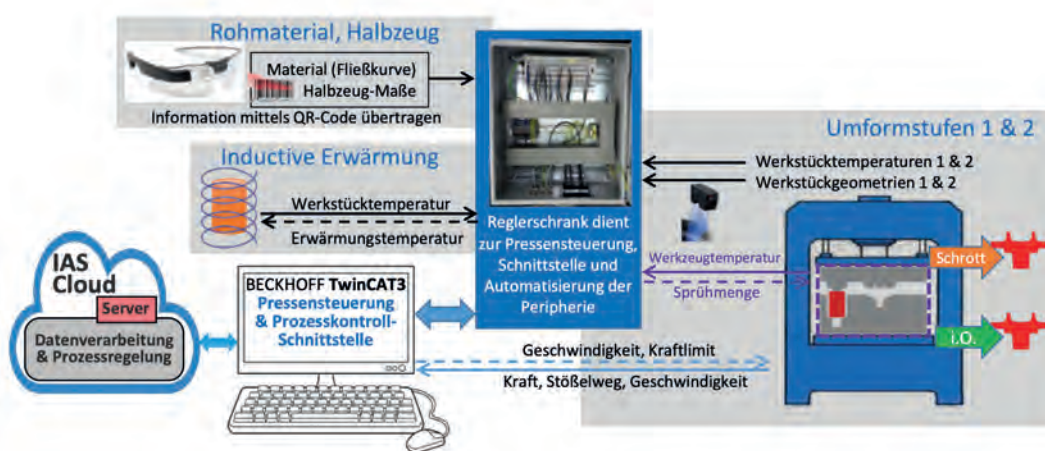


Bild 2: Konzept der realisierten Informations- und Kommunikationsstruktur der Modellanlage



Bild 3: Mit einem Faserlaser erzeugte, lesbare QR-Codes auf der Werkstückoberfläche vor der induktiven Erwärmung beschriftet (oben) sowie bei 500 °C geschmiedet und sandgestrahlt nach dem Abkühlen (unten).

Transfer des entwickelten Systems zu den Projektpartnern Otto Fuchs und Hirschvogel Umformtechnik wurden zudem die Prozessschritte Strahlen und Wärmebehandlung bestimmt. Der Prozessrechner speicherte kontinuierlich alle Zustandsdaten aus diesen Prozessschritten in der Factory-Cloud, sodass die Zuordnung der Werkstücke über eine hinterlegte Masteridentität stets möglich war. Dabei war es nicht notwendig, die vollständige Masteridentität in einem QR-Code auf der Werkstückoberfläche zu speichern. Lokale oder temporäre Identitäten konnten auf Maschinen- oder Prozessebene zugewiesen und wiederverwendet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die entsprechenden Masteridentitäten, das heißt die Zählweise im laufenden Schmiedebetrieb fehlerfrei abläuft. Die Verfolgung eines Werkstücks in Echtzeit über diese Masteridentität mit verschiedenen lokalen Identitäten in der gesamten Fertigungslinie erforderte die bereits genannte Vernetzung der Prozesskomponenten.

ADAPTIVE STEUERUNG VON SCHMIEDEPROZESSEN

In der Konzeptphase des Teilprojekts zum Aufbau der oben beschriebenen Modellanlage wurden die wesentlichen Anforderungen sowie alle relevanten Randbedingungen aus der Sicht von möglichen Anwendern eines adaptiven Steuerungssystems für das Gesenkschmieden zusammengestellt. Bild 4 zeigt

die Struktur der Regelkreise, die auf Basis der gesammelten Anforderungen erarbeitet wurden. Die dargestellte Struktur enthält drei soft- und hardwareseitig realisierte Regelkreise für das zweistufige Gesenkschmieden mit der realisierten Modellanlage. Die dargestellte „Echtzeit-Online-Strategie“ verfolgte das Ziel, auf Basis der Daten der involvierten cyber-physischen Komponenten die Parameter des nächsten Prozessschritts für das zuletzt bearbeitete Werkstück zu ermitteln. Der korrigierende Eingriff erfolgte demnach vor Ausführung des nächsten Stößelhubes für das Fertigformen desselben Werkstücks oder das Vorformen des nächsten. Die „Langzeit-Online-Strategie“ berücksichtigte zudem jene Prozessparameter, die nur langsam verändert werden können, wie etwa die Werkzeugtemperatur. Die „Langzeit-Offline-Strategie“ verwendete alle Produktionsabläufe und alle verfügbaren Qualitätsparameter des Werkstücks für nachträgliche Analysen der Anlageneffizienz und des Ausschusses in einzelnen Fertigungsaufträgen. Ziel war eine technologisch verbesserte Auslegung zukünftiger Schmiedeteile und -prozesse.

Für die Umsetzung der adaptiven Prozesssteuerung des Warm Schmiedens wurde eine flexible Plattform genutzt. Dies ermöglicht den Einsatz bekannter Strategien des Internets der Dinge (IoT) – in diesem Fall die Speicherung des Werkstückzustands



Bild 4: Struktur der in der Modellanlage realisierten, geschlossenen Datenrückführung

Funktion	Vorwahl Presse	MAX	MIN	aktuelle Vorgabe	Wert Übernahme	Cloud Werte
Gewicht [kg]	100	100	50	100	Übernahme	100
Produkt [tH]	311	311	300	311	Übernahme	311
Einbaueinstellwert [mm]	969,5	969,5	969,0	970,5	Übernahme	970,5
Spritzzyklen 1	2	2	1	2,0	Übernahme	2,0
Spritzzyklen 2	2	2	1	2,0	Übernahme	2,0
Programmeinstellwert Öffn.	21	21	1	21	Übernahme	21

Bild 5: Bedienoberfläche Bilder: Autoren

und der umfangreichen Prozessdaten an einem gemeinsamen Ort. Der Vorteil solcher Plattformen liegt in der relativ problemlosen Handhabung und den Analysemöglichkeiten großer Datenmengen, um starke oder schwache Korrelationen auch zwischen heterogenen Datensätzen identifizieren zu können. Diese Korrelationen eröffnen den Weg zu einem tieferen Verständnis von Prozesszusammenhängen, die auf der empirischen Ebene nicht erkennbar sind. Die dezentrale und internetbasierte Handhabung von Daten und die Nutzung geeigneter Dienste stellt überdies einen flexiblen Ansatz dar, um Produktionsdaten an verschiedenen Orten beziehungsweise in mehreren Produktionswerken in unterschiedlichen Formaten je nach Bedarf verfügbar zu halten.

Die Hard- und Softwarestruktur wurde so ausgelegt, dass Prozessdaten, Zustandswerte der Anlage und Kennzahlen der Auftragserfüllung auf dem Bedienfeld der Anlage oder auf beliebigen Endgeräten mit entsprechender Visualisierung dem Maschinenbediener, Produktionsingenieur, Planer oder Qualitätssicherungsmitarbeiter zur Verfügung standen. Eingesetzt wurde zu diesem Zweck die Cloud-Technologie der Extract-Transform-Load (ETL) für die Datenspeicherung, Modellierung, Berechnung, Überwachung und Verfolgung von Prozessdaten bzw. regelnden Eingriffen. Eine standardisierte Speicherschnittstelle auf dem Factory-Cloud-Server übertrug dabei die gemessenen Prozessparameter in eine übergeordnete, relationale Datenbank. Letztere umfasste ein Datenbank-Managementsystem mit entsprechenden Analysetools, so konnten mit dem heutigen Entwicklungsstand der adaptiven Prozesssteuerung für das Warmschmieden unter Zuhilfenahme einer Echtzeit-Datenbank umfangreiche Ad-hoc-Berechnungen und schließlich auch die analytische Online-Verarbeitung (OLAP) durchgeführt werden [3, 4]. Die Echtzeit-Datenbank diente dabei der Zuordnung von Werkstückidentität und Prozessparametern entlang der

gesamten Prozesskette. Um eine effiziente Überwachung von Prozessdaten zu erreichen, wurde ein OLAP-Datenmodell unter Berücksichtigung der Datenräume und der entsprechenden Prozessschritte erstellt. Die Modelldimensionen Zeit, Raum und Produktinformationen enthielten eine interne, hierarchische Struktur, in der jede Verzweigung durch ein Element beschrieben wurde. Die Grundelemente waren mit Datenvektoren verbunden und markierten die innerste Schicht des Datenmodells. Höhere Schichten kumulierten die Informationen der unteren Schichten durch Anwendung von Aggregationsverfahren. So wurden heterogene Daten in ein homogenes Modell integriert, da verschiedene Schichten mit unterschiedlicher Auflösung assoziiert werden konnten.

Das Assistenzsystem für manuelle Eingabemöglichkeiten des Maschinenbedieners wurde auf dem Bedienpult der Pressesteuerung realisiert. Bild 5 zeigt die dafür entwickelte Bedieneroberfläche mit Parameterüberwachungs- und Dateneingabebereichen. Das Eingabebereich der Maske zeigt die vom Factory-Cloud-Server vorgeschlagenen Prozessparameter für den verbesserten nächsten Hub an und ermöglicht es dem Bediener, diese Werte zu kontrollieren, zu akzeptieren oder zu ändern, bevor diese an die Presse oder die Anlagenperipherie (zum Beispiel Schmierung) weitergesendet werden. Diese Vorgehensweise gewährleistete, dass der Datensatz des Werkstücks mit den aktuellen Parametern aus dem Umformvorgang selbst erweitert werden konnte. Die realisierte Datenstruktur stellte sicher, dass eine werkstückbezogene fehlerfreie Rückverfolgung digitalisierter Prozesszustände in Verbindung mit den Informationen zur Werkstückhistorie in einem Datensatz redundant zur Verfügung stand.



[1] Liewald, M.; Karadogan, C.; Lindemann, B.; Jazdi, N.; Weyrich, M.: Performance Increase in Forging Through Workpiece Tracking, Adaptive Control and Machine Learning. New Developments in Forging Technology 2019, 14 – 15 May 2019, pp. 177 – 196

[2] Liewald, M.; Karadogan, C.; Lindemann, B.; Jazdi, N.; Weyrich M.: On the tracking of individual workpieces in hot forging plants. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 22, pp. 116 – 120, 2018

[3] Liewald, M.; Karadogan, C.; Lindemann, B.: New Approaches in Adaptive Control and Machine Learning in Forging. EUROFORGE-1 st conFAIR 2018 the future of forging, Berlin 13 – 15 November 2018

[4] Lindemann, B.; Karadogan, C.; Jazdi, N.; Liewald, M.; Weyrich, M.: Cloud-based Control Approach in Discrete Manufacturing Using a Self-Learning Architecture, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 10, 2018, pp. 163 – 168
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.255>



Die Teilprojekte Umformprozess und Logistikprozess des Verbundvorhabens EMuDig 4.0 – „Effizienzschub in der Massivumformung durch Entwicklung“ und „Integration digitaler Technologien im Engineering der gesamten Wertschöpfungskette“ wurden aus Fördermitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Programms Digitale Technologien für die Wirtschaft (PAiCE) gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann von der Webseite des Industrieverbandes Massivumformung e. V. heruntergeladen werden: <https://www.massivumformung.de/forschung/emudig-40/>

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages