

Merkblatt Nr. 5170

**FE-Modellierung der Halbwarmumformung
von 7000er-Aluminiumblech und Voraussage
der Bauteileigenschaften nach der
Auslagerung mit KNN**

EFB-Facharbeitskreis: Optimierung Prozesskette und digitale Fertigung

Stand: Juni 2025

Basierend auf Projekt(en): 01IF21645N

Dieses Merkblatt wurde durch die Forschungseinrichtung *Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen* erstellt und wird als wichtige Erkenntnisquelle empfohlen. Die Anwender:innen haben jeweils zu prüfen, inwieweit der Inhalt auf ihre speziellen Fälle anwendbar ist und ob die vorliegende Fassung Gültigkeit besitzt. Die Haftung der Erstellenden, der an der Ausarbeitung und Freigabe Mitwirkenden sowie der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. ist ausgeschlossen.

Bezug über www.shop.efb.de

© EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.
Lothringer Str. 1 | 30559 Hannover
Fon +49 (511) 971 75-0 | Fax +49 (511) 971 75-19 | www.efb.de

Nachdruck und Kopie, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers

Inhalt

Inhalt.....	2
Schlagworte.....	2
1 Ziel und Zweck des Merkblatts.....	3
2 Grundlagen.....	3
2.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....	3
2.1.1 Abkürzungsverzeichnis.....	3
2.1.2 Formelzeichen.....	3
2.2 Stand der Technik.....	4
3 Experimentelle und numerische Methoden.....	6
3.1 Funktionsprinzip der Experimente.....	6
3.1.1 Zugversuch.....	6
3.1.2 Nakajima-Versuch.....	7
3.1.3 Streifenzugversuch.....	7
3.1.4 Versuch zur Ermittlung der druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten.....	7
3.2 Softwareumgebung.....	7
3.2.1 Abaqus CAE.....	7
3.2.2 Spyder.....	8
4 Werkstoff.....	8
4.1 Materialcharakterisierung und -modellierung.....	8
5 Numerische Prozessauslegung.....	9
5.1 FE-Modelle für Umformung, Abkühlung und Rückfederung.....	10
5.2 RF zur Vorhersage der Gebrauchseigenschaften nach der KTL.....	12
5.3 Validierung.....	14
5.3.1 FE-Modell.....	14
5.3.2 Vollständiges Ersatzmodell inklusive RF.....	14
6 Anwendungsrichtlinien.....	14
6.1 Visualisierung der Bauteileigenschaften nach der KTL.....	14
6.2 Interpretation der vorhergesagten Bauteileigenschaften.....	14
7 Einsatzgrenzen, Gültigkeitsbereiche.....	15
8 Sonstige Randbedingungen.....	15
9 Schrifttum.....	15
9.1 Normen und technische Regeln.....	15
9.2 Literatur.....	15
Forschungseinrichtung.....	17
Beteiligte Unternehmen.....	17

Schlagworte

- 1 Halbwarmumformung, 7000, 7xxx, EN AW-7075-T6, 7075, Aluminium, Prozesssimulation, Ersatzmodellierung, KTL, Künstliche Intelligenz, KI, AI, Machine Learning, Materialcharakterisierung

2 Ziel und Zweck des Merkblatts

- 3 Das Merkblatt bietet verschiedenen Anwendergruppen der metallverarbeitenden Industrie sowie Softwareentwicklern und -anwendern einen methodischen Leitfaden zum Aufbau und Nutzen eines Ersatzmodells für Prozessketten der Halbwarmumformung (HWU) mit anschließender kathodischer Tauchlackierung (KTL) von Aluminium. Dazu wird einerseits die methodische Vorgehensweise zum Aufbau und zur Validierung eines thermo-mechanischen Finite Elemente (FE)-Modells der HWU erklärt. Andererseits wird die Entwicklung, experimentelle Datengenerierung, das Training und Testing sowie die Kopplung mit einem Random Forest Regressor (RF) zur Vorhersage der Gebrauchseigenschaften nach der KTL erläutert.
- 4 Die Beschreibung der notwendigen thermo-mechanischen Charakterisierung des Material- und Kontaktverhaltens ist ebenso Inhalt dieses Merkblattes. Mit Hilfe des Ersatzmodells können die Gebrauchseigenschaften des fertigen Bauteils schon bei der numerischen Auslegung des Umformprozesses berücksichtigt werden.
- 5 Die im Nachhinein aufgeführten Ergebnisse basieren auf Arbeiten im Rahmen des IGF-Vorhabens 01IF21645N zur „FE-Modellierung der Halbwarmumformung von 7000er-Aluminiumblech und Voraussage der Bauteileigenschaften nach der Auslagerung mit KNN“ [1]. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die hochfeste Aluminium-Zink-Legierung EN AW-7075-T6 untersucht. Dennoch kann das vorgestellte allgemeine methodische Vorgehen, unter Berücksichtigung sich ändernder Randbedingungen, auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden.

6 Grundlagen

6.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis

6.1.1 Abkürzungsverzeichnis

EFB	Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
HWU	Halbwarmumformung
IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
KNN	Künstliches neuronales Netz
KTL	Kathodische Tauchlackierung
ReLU	Rectified Linear Unit
RF	Random Forest
R_m	Verbleibende Zugfestigkeit
RMSE	Root mean square error
tanh	tangens hyperbolicus
WÜK	Wärmeübergangskoeffizient

6.1.2 Formelzeichen

F_z	N	Ziehkraft
F_N	N	Normalkraft
μ	-	Reibungszahl
$T(t)$	°C	Zeitabhängige Temperatur
T_0	°C	Initiale Blechtemperatur
T_s	°C	Stempeltemperatur
α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
A	mm ²	Fläche
c_p	Ws/kgK	Spezifische Wärmekapazität
m	kg	Masse
t	s	Zeit
T_u	°C	Umformtemperatur

6.2 Stand der Technik

- 7 Die 7000er-Serie von Aluminiumlegierungen ist wegen ihrer ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften wie einer hohen spezifischen Festigkeit und Duktilität in der Luftfahrt und im Automobilsektor ein Substitutionsmaterial im Rahmen des stofflichen Leichtbaus [2]. Die Legierungen sind jedoch korrosionsanfällig, was durch spezielle Wärmebehandlungen wie der KTL verbessert werden kann, die auch die mechanischen Eigenschaften beeinflussen [3,4]. Aluminiumlegierungen werden in naturharte und aushärtbare Legierungen unterteilt, wobei letztere durch Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern behandelt werden. Das Lösungsglühen erfolgt bei 450 - 480 °C, gefolgt von einer schnellen Abkühlung, damit die Legierungsatome im Mischkristall verbleiben. Anschließend erfolgt das Auslagern, welches bei Raum- (T4-Zustand) oder erhöhter Temperatur (T6- oder T7-Zustand) stattfinden kann, wobei Ausscheidungen gebildet werden, die die Festigkeit erhöhen [5]. Eine Kaltauslagerung führt zu kohärenten Guinier-Preston Zonen, während Warmauslagerung größere, teilweise kohärente Ausscheidungen bildet [6]. Faktoren wie die Abkühltemperatur beeinflussen die resultierende Festigkeit, wobei zu langsames Abkühlen ein überaltertes Gefüge verursacht [7].
- 8 Für die Herstellung komplexer Leichtbauteile ist die HWU von Aluminium vielversprechend, da sie kürzere Erwärmungs- und Abkühlzeiten als die Warmumformung erfordert und somit die Prozesszeit um bis zu 51 % verkürzt. Durch die Anwendung von 7000er Legierungen in der Halbwarmumformung kann im Vergleich zur Warmumformung Energie eingespart und sowohl ökonomisch als auch ökologisch effizienter produziert werden [8]. Bei Temperaturen bis 300 °C verbessert die HWU das Umformvermögen durch erhöhte Duktilität und niedrigeren Fließwiderstand ohne Gefügeveränderungen durch Rekristallisation [6]. Wang et al. [9] haben gezeigt, dass die Festigkeit bei Temperaturen im Bereich von 220 - 260 °C leicht reduziert wird, die Umformbarkeit jedoch erheblich steigt. Bspw. zeigt die Arbeit von Polak et al. [8], dass die Zugfestigkeit nach der HWU bei 240 °C nur um 11 % reduziert wird, während Österreicher et al. [10] bei Temperaturen von 180 - 210 °C eine Festigkeitsminderung um lediglich 5 % beobachteten. Gleichzeitig geht mit der thermischen

Prozessführung ein Härteverlust einher, der mit einer Erhöhung von Temperatur und Haltezeit korreliert und bei einer Temperatur von 250 °C und einer Haltezeit von 30 min bis zu 35 % betragen kann [8]. Bei der Auslegung von Halbwarmumformprozessen muss im Automobilbau bspw. das anschließende Warmauslagern in der kathodischen Tauchlackierung berücksichtigt werden, um Überalterungseffekte zu vermeiden [11].

- 9 Zur kosten- und zeiteffizienten Prozessauslegung sind FE-Simulationen eine häufig verwendete Methode. Die numerische Analyse der Umformung von 7000er Aluminiumlegierungen ist aktuell nicht hinreichend erforscht. Der Fokus bisheriger Arbeiten liegt oft auf Kaltumformprozessen und experimentellen Warmumformungen, ohne diese in FE-Systeme zu integrieren [12]. Mit der Veröffentlichung von Noder et al. [13] existieren erste Ansätze zur vereinfachten numerischen Modellierung der HWU. Für die Prozessgestaltung sind genaue und detaillierte mathematische Beschreibungen des Werkstoffverhaltens unter prozessrelevanten Bedingungen erforderlich. Bisherige Modelle berücksichtigen jedoch nicht das gesamte Materialverhalten [14]. Ein Stoffgesetz besteht aus drei wesentlichen Bestandteilen: der Fließbedingung, der Fließregel und dem Verfestigungsgesetz. Zusätzlich kann zur Beschreibung des Umformvermögens ein Versagenskriterium hinzugefügt werden. Als Fließbedingung für Aluminiumwerkstoffe zeigen anisotrope Modelle wie Yld'03 und BBC05 die höchste Übereinstimmung mit experimentellen Versuchen [15]. Für die Bestimmung des lokalen Versagens sind Grenzformänderungskurven der Stand der Technik, deren Bestimmung für Raumtemperatur genormt ist [15]. Das tribologische Verhalten einer 7075 Aluminiumlegierung wurde von Lu et al. schmiermittelfrei, bis zu einer Temperatur von 400 °C mit dem „ball-on-plate“ Test untersucht [16]. Aufgrund unterschiedlicher tribologischer Bedingungen sind diese Erkenntnisse allerdings nicht auf die HWU übertragbar.
- 10 Die Prozessroute der HWU von 7000er Aluminium im Automobilbau umfasst die Erwärmung, temperierte Umformung, Abschrecken im Werkzeug und die KTL. Numerische Methoden können Erwärmungs- und Umformungsoperationen abbilden, jedoch fehlen in FE-Programmen Modelle für nachfolgende Wärmebehandlungen und finale mechanische Eigenschaften nach der Umformung. Künstliche neuronale Netze (KNN) haben großes Potenzial, komplexe thermo-mechanische Prozesse zu modellieren. Sie können trainiert werden, um finale Bauteileigenschaften nach Umformung und KTL vorherzusagen. KNN bestehen aus mindestens drei Schichten, der Eingabe-, der verdeckten und der Ausgabeschicht [17]. Informationen fließen in eine Richtung durch gewichtete Verbindungen, angepasst durch Lernprozesse wie Backpropagation. Die Auswahl optimaler Hyperparameter (z. B. Anzahl der Neuronen, Aktivierungsfunktion, Lernrate) sind entscheidend für die Effizienz des KNN. Typische Aktivierungsfunktionen sind die Funktionen Sigmoid, Tangens hyperbolicus (tanh) und Rectified Linear Unit- (ReLU) [18]. KNN lernen anhand von Trainingsdaten und können somit verallgemeinerte Vorhersagen treffen. Die Qualität der trainierten Modelle wird durch Validations- und Testdatensätze überprüft. In der Umformtechnik gibt es bisher wenige Studien zum

Einsatz von KNN. Mohr et al. [19] nutzten z. B. ein KNN zur Vorhersage des Formänderungsverhaltens und Decke et al. [20] zur Optimierung der Materialcharakterisierung. Aus dem Stand der Technik folgt die Notwendigkeit dieses Merkblatts zur Weiterentwicklung von Methoden zur experimentellen Charakterisierung sowie zur Modellierung der HWU und KTL mittels FEM und KNN.

11 Experimentelle und numerische Methoden

11.1 Funktionsprinzip der Experimente

12 Für die numerische Untersuchung der HWU einer 7075er Aluminiumlegierung wird eine spezifische Charakterisierung der plastischen, tribologischen und thermischen Vorgänge vorausgesetzt. Zur Charakterisierung des Verfestigungsverhaltens wird der uniaxiale Zugversuch verwendet. Um darüber hinaus eine anisotrope Fließbedingung zu parametrisieren, sind zusätzliche uniaxiale Zugversuche in 45° und 90° zur Walzrichtung und ein biaxialer Versuch durchzuführen. Für die Ermittlung der Kennwerte bei biaxialer Beanspruchung sind bspw. der Schichtstauchversuch, der Bulge-Test oder ein Kreuzzugversuch geeignet. Die Charakterisierung der dehnungsbasierten Schädigung kann über den Nakajima-Versuch erfolgen. Alternativ ist eine Bestimmung mit dem Marciniak-Test möglich. Die Reibungszahl zur Berücksichtigung der tribologischen Vorgänge kann allgemein im Streifenzugversuch ermittelt werden. Um den spezifischen Wärmetransport abzubilden sind weitere Versuche zur Ermittlung druckabhängiger Wärmeübergangskoeffizienten notwendig. Grundsätzlich sind alle beschriebenen Versuche für den Temperaturbereich der HWU durchzuführen. Daraus resultieren erhöhte Anforderungen an die Versuchsdurchführung. Außerdem sind die Versuche zur statistischen Absicherung mindestens fünfmal durchzuführen.

12.1.1 Zugversuch

- 13 Der uniaxiale Zugversuch ist nach DIN EN ISO 6892-2 [21] für die Durchführung bei erhöhten Temperaturen genormt. Um die Kriterien einer isothermen Versuchsführung zu erfüllen, kann bspw. ein Umformdilatometer mit miniaturisierten Zugproben verwendet werden [1]. Die Wahl der Versuchsanlage kann individuell variieren, folglich ist es ratsam folgende Kriterien zu beachten:
- 14 Werden aufgrund der thermischen Einflüsse der Versuchsraum und somit auch die Probengeometrie herunterskaliert, ist ein Nachweis der Insignifikanz der vorgenommenen Veränderungen ratsam. Methodisch kann dies über einen Vergleich der Fließkurven bei Raumtemperatur nach den Veränderungen und bei genormter Durchführung vorgenommen werden. Dazu kann das Vorgehen von Behrens et al. [22] für das Umformdilatometer am IFUM auf den spezifischen Fall adaptiert werden.
- 15 Eine zeitlich-isotherme Versuchsdurchführung muss gewährleistet und durch Messung überprüft werden.
- 16 Die Versuchsanlage muss eine Dehnratenregelung ermöglichen und

Kraft und Längenänderung müssen erfasst werden.

16.1.1 Nakajima-Versuch

- 17 Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Grenzformänderungskurve ist in DIN EN ISO 12004-1 für industrielle Bedingungen und in DIN EN ISO 12004-2 [23] für Laborbedingungen genormt. Analog zum Zugversuch ist die zeitliche Entwicklung der Temperatur zu messen. Im Gegensatz dazu müssen die Dehnungen jedoch flächig erfasst werden. Hierzu bietet sich eine optische inline Messung an. Dabei muss einerseits darauf geachtet werden, dass das aufgetragene optische Muster den Temperaturbereich standhält. Andererseits müssen die konkurrierenden Anforderungen nach isothermer Prozessführung und optischer Zugänglichkeit erfüllt werden. Eine mögliche Lösung ist das im Schlussbericht beschriebene Vorgehen, bei dem Probe und Werkzeug gemeinsam im Kammerofen auf die Untersuchungstemperatur erwärmt werden [1]. Außerdem ist das in der Norm definierte tribologische System auf die erhöhten Versuchstemperaturen anzupassen.

17.1.1 Streifenzugversuch

- 18 Im Vergleich zu den bisherigen Versuchen ist der Streifenzugversuch nicht genormt, dennoch entspricht das Vorgehen dem Stand der Technik [24]. Die Durchführung für erhöhte Temperaturen kann, wie im Schlussbericht beschrieben, durch ein beheizbares Werkzeug auf einer Universalprüfmaschine erfolgen [1]. Stehen spezifische Anlagen für den Temperaturbereich zur Verfügung, sind diese zu nutzen. Das tribologische System sollte aus dem Schmiermittel, Halbzeug- und Werkzeugwerkstoff des HWU Prozesses bestehen. Zur Verbesserung der Übertragbarkeit der Ergebnisse sollte die Endbearbeitung der Flachbacken für die Charakterisierung mit der des späteren Werkzeugs übereinstimmen, damit die Topologien übereinstimmen.

18.1.1 Versuch zur Ermittlung der druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten

- 19 Die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten ist ebenfalls nicht genormt. Die Versuchsdurchführung kann mit dem im Schlussbericht beschriebenen Versuchsstand erfolgen [1]. Bei der Entwicklung bzw. dem Betrieb eines Prüfstandes ist darauf zu achten, dass der Werkzeugwerkstoff dem des Prozesses entspricht. Zusätzlich ist es ratsam eine Vorrichtung im unteren Stempel vorzusehen, die die Kontaktfläche vom Zeitpunkt des Einlegens bis zum Aufbau des Druckes für die Messung und somit den Wärmeverlust minimiert. Die Blechprobe wird im Kammerofen auf die Umformtemperatur erwärmt und im Prüfstand mit dem gewünschten Druck belastet. Bei symmetrischen Aufbauten kann man unter der Annahme homogener Wärmeströme den zeitlichen Temperaturverlauf einseitig mit einem Thermoelement messen.

19.1 Softwareumgebung

19.1.1 Abaqus

- 20 Abaqus ist eine Softwareumgebung für die Finite-Elemente-Analyse (FEA). Im Vergleich zu anderen FE-Programmen bietet Abaqus

wesentliche Vorteile. Ein zentrales Merkmal von Abaqus ist die leistungsstarke Python 2-Schnittstelle. Diese ermöglicht die flexible und effiziente Automatisierung von Modellierungs- und Simulationsprozessen. Anwender können benutzerdefinierte Skripte erstellen, um Routineaufgaben zu automatisieren und komplexe Simulationsabläufe zu steuern. Diese Integration ist besonders vorteilhaft, um maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln, die über die Standardfunktionen hinausgehen. Zusätzlich bietet Abaqus eine nahtlose Integration von Pre- und Post-Processing, wodurch der Workflow optimiert und die Effizienz bei Simulationen erhöht wird.

20.1.1 Spyder

- 21 Spyder ist eine spezialisierte Open-Source-IDE, entwickelt für Wissenschaftler, Ingenieure und Datenwissenschaftler, die mit Python arbeiten. Ein wesentlicher Vorteil von Spyder im Vergleich zu anderen IDEs ist die nahtlose Integration wissenschaftlicher Bibliotheken wie NumPy, SciPy, Matplotlib und Pandas, die effiziente Datenanalysen und Visualisierungen ermöglicht. Die IDE verfügt über eine interaktive Python-Konsole und unterstützt Jupyter-Notebooks, was iterative Programmierprozesse erleichtert. Spyder zeichnet sich durch eine benutzerfreundliche Oberfläche aus, die MatLab-Funktionalitäten enthält. Der Editor bietet umfangreiche Debugging-Optionen und integriert Dokumentations- und Variablendarstellungstools zur effizienten Analyse.

22 Werkstoff

- 23 Das spezifische methodische Vorgehen im zugrundeliegenden Forschungsvorhaben wurde für die Aluminiumlegierung EN AW-7075-T6 mit einer Blechdicke von 2 mm entwickelt, weil es sich um einen vielversprechenden Substitutionswerkstoff im stofflichen Leichtbau handelt. Das allgemeine Vorgehen ist allerdings unter Beachtung der Hinweise ebenfalls auf andere Legierungen übertragbar.

23.1 Materialcharakterisierung und -modellierung

- 24 Die Fließkurve kann gemäß DIN EN ISO 6892-2 [21] anhand der initialen Probenabmessungen, der gemessenen Kraft und Längenänderung sowie unter Beachtung der Volumenkonstanz bestimmt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Fließkurve vom Fließbeginn bei 0,2 % plastischer Dehnung bis zur Fließspannung bei maximaler Kraft gültig ist. Darüber hinaus liegt aufgrund der Einschnürung der Zugprobe kein uniaxialer Spannungszustand vor. Während der industriellen HWU treten höhere Umformgrade als im uniaxialen Zugversuch auf. Folglich müssen numerische Verfestigungsgesetze parametrisiert werden. Mit den Modellen nach bspw. Swift, Gosh, Voce und Hockett-Sherby stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Zur Parametrisierung sind die Konstanten der jeweiligen Modelle solange iterativ anzupassen, bis die Abweichung zwischen der Funktion und den experimentellen Daten minimal ist. Abschließend wird das Modell mit der geringsten Abweichung ausgewählt und extrapoliert.

- 25 Um eine Fließbedingung zu modellieren, sind neben den bereits berechneten Fließbeginn, die senkrechten Anisotropien aus den Rohdaten des Zugversuchs zu bestimmen. Die Berechnung ist in DIN EN ISO 10113 genormt [25]. Auch hier können mehrere Ansätze für die Modellierung gewählt werden. Eine gute Übersicht bietet die Arbeit von Banabic [15]. Darin finden sich die notwendigen Parameter jedes Ansatzes, Informationen über den Anwendungsfall, Methoden zur Parametrisierung und Informationen über die Implementierung der Modelle in verschiedene FE-Programme. Modelle wie Yld'03 und BBC05 müssen mit numerischen Verfahren bspw. in Python oder Matlab gelöst werden. Die Auswahl des Modells richtet sich einerseits nach dem Anwendungsfall und andererseits nach den Möglichkeiten der vorhandenen FE-Programme.
- 26 Die Berechnung der Grenzformänderungskurve für den Zeitpunkt der Dehnungslokalisierung ist in DIN EN ISO 12004-2 [23] standardisiert. Als Auswertemethoden kann die genormte Schnittlinienmethode als konservative Abschätzung verwendet werden. Ebenso ist eine zeitabhängige Auswertung anhand der Dehnrate möglich [15].
- 27 Die Reibungszahl wird für verschiedene Temperaturen und Drücke der HWU aus der induzierten Normalkraft F_N und der gemessenen Ziehkraft F_z durch umstellen von Gleichung (1) [26] berechnet:

$$F_z = F_N \cdot 2\mu \quad (1)$$

- 28 Der druckabhängige Wärmeübergangskoeffizient α kann mit der gemessenen zeitabhängigen Temperatur $T(t)$, der initialen Blechtemperatur T_0 , der Stempeltemperatur T_s , der Fläche A , der spezifischen Wärmekapazität c_p aus der Literatur, der Masse m und der Zeit t durch Umstellen von Gleichung (2) [27] bestimmt werden.

$$T(t) = (T_0 - T_s) \cdot e^{-\alpha \frac{A}{c_p \cdot m} t} + T_u \quad (2)$$

29 Numerische Prozessauslegung

- 30 Die numerische Prozessauslegung für die HWU und anschließende KTL erfolgt durch ein Ersatzmodell aus einer FEM und einem RF entsprechend Abbildung 1.

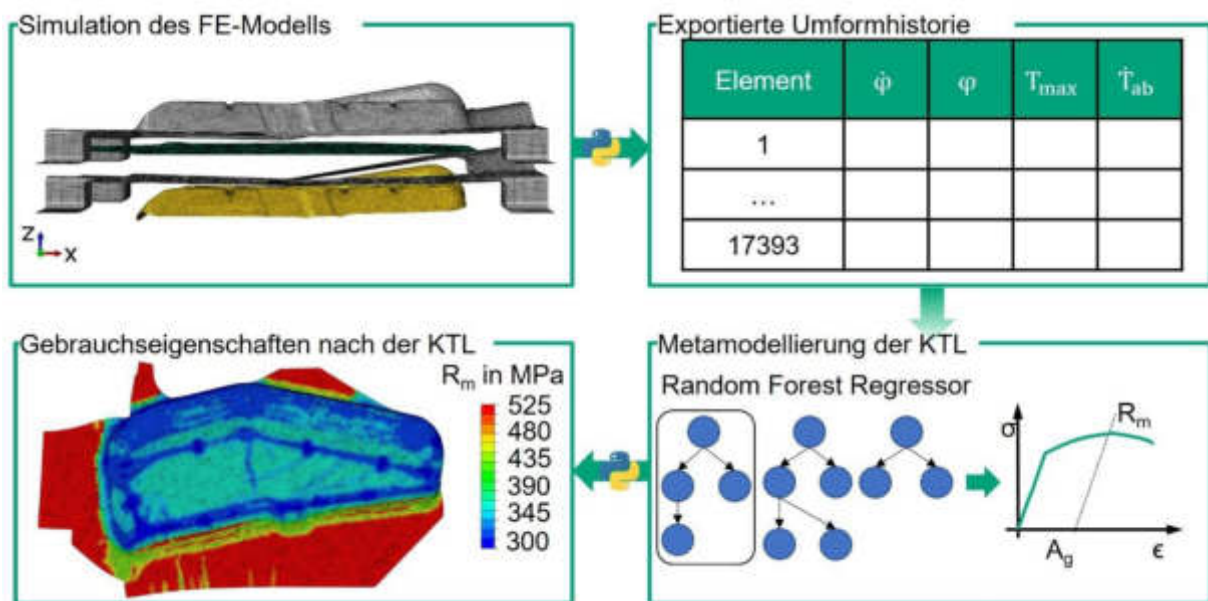


Abbildung 1: Ersatzmodellierung der Prozesskette bestehend aus HWU und KTL.

- 31 Der konkrete Aufbau des thermo-mechanischen FE-Modells für die HWU erfolgte in der Softwareumgebung Abaqus. Das allgemeine Vorgehen ist jedoch softwareunabhängig. Bei der konkreten Adaption in anderen Programmen können zusätzlich das Manual oder der Support des Softwareherstellers hilfreich sein.

31.1 FE-Modelle für Umformung, Abkühlung und Rückfederung

- 32 Der Aufbau des numerischen Modells entspricht in Teilen dem Stand der Technik. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten:
- 33 Diskretisierung: Bei komplexen Geometrien sind Teilbereiche mit engen Radien und Geometrien mit einer feineren Vernetzung zu versehen. Dabei ist darauf zu achten, dass die kleinste Elementkantenlänge den Zeitschritt und somit die Rechendauer definiert. Eine Parameterstudie ist eine Möglichkeit einen optimalen Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenaufwand zu ermitteln.
- 34 Elementauswahl: Die Schalenelemente des Werkstücks müssen sowohl mechanische als auch thermische Vorgänge ermöglichen. Letzteres gilt auch für die Werkzeuge, die häufig als starr definiert werden. Das allgemeine Vorgehen in der Blechumformung die Werkzeuge mit starren Elementtypen zu definieren, verhindert jedoch die Wärmeabfuhr aus dem Werkstück über die Werkzeuge. Dementsprechend sind die Werkzeuge ebenfalls mit thermomechanischen Elementen zu diskretisieren und die elastische Deformation ist ggf. durch eine Randbedingung zu unterdrücken, um die Berechnungszeit zu minimieren. Dadurch müssen den Werkzeugen allerdings auch Sections und Materialkarten zugewiesen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schalenelemente in Richtung des Werkzeuginneren integriert werden. Die Materialkarte, bestehend aus Dichte, E-Modul, Querkontraktionszahl, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität, kann mit Literaturwerten parametrisiert werden.

-
- 35 Sections: Um beim Werkstück den Export von Ergebnisgrößen unmittelbar an den Werkstückoberflächen zu ermöglichen, sind Integrationsregeln auszuwählen, deren äußerste Integrationspunkte auf der Oberfläche definiert sind. In Abaqus kann hierzu die Integration nach Simpson und in LS Dyna nach Lobatto gewählt werden. Außerdem kann die Auflösung über die Blechdicke über die Anzahl der Integrationspunkte festgelegt werden. Bei 2 mm Blechdicke sind mindestens 7 Integrationspunkte empfohlen.
- 36 Materialkarte des Werkstücks: Innerhalb der Materialkarte sind das temperatur- und dehnratenabhängige Verfestigungsverhalten (in Abaqus unter Plastic), der temperaturabhängige Fließort (Potential unter Plastic), die temperaturabhängige Grenzformänderungskurve (FLD Damage), die Elastizitätseigenschaften (Elastic), allgemeine physikalische Eigenschaften (Density) und thermische Eigenschaften (Conductivity und Specific Heat) entsprechend der experimentellen Charakterisierung und Modellierung zu definieren.
- 37 Kontaktverhalten: Innerhalb der als „General Contact“ definierten Kontakte sind die temperatur- und druckabhängigen Reibzahlen sowie der druckabhängige WÜK festzulegen.
- 38 Zeitskalierung: Bei der Zeitskalierung ist darauf zu achten, dass beim Kontakt keine Impulse entstehen, damit die dehnratenabhängigen Effekte richtig skalieren. Die Definition der Prozessabläufe als „Smooth step“ ist ein probates Mittel und sowohl in Abaqus als auch LS Dyna möglich.
- 39 Die Berechnung der HWU inklusive Abkühlung im Werkzeug erfolgte im zugrundeliegenden Vorhaben explizit. Eine separate Simulation der Abkühlung mit dem impliziten Verfahren ist ebenso möglich. Die abschließende Berechnung der Rückfederung erfolgte nach dem Stand der Technik implizit. Es ist durch Variation des Knotens für die starre Randbedingung sicherzustellen, dass die Ergebnisse nicht beeinflusst werden.
- 40 Der Export und die Weiterverarbeitung des Umformgrades, der Umformrate, der Umformtemperatur und der Abkühlrate für die Kopplung mit einem Random Forest Regressor ist im Schlussbericht detailliert und schrittweise für Abaqus erklärt [1]. Ein Programm öffnet über die Python2 Schnittstelle die Abaqus Ergebnisdatei und exportiert die Temperaturen und Umformgrade für jeden zeitlichen Frame. Daraus werden die Abkühlrate und Umformrate berechnet. Abschließend wird alles in einer txt-Datei abgespeichert. Die Weiterverarbeitung ist dabei softwareunabhängig, der Export allerdings nicht. Dementsprechend muss der Export entsprechend der Möglichkeiten der verwendeten Software angepasst werden. In LS Dyna kann der Export bspw. über interne Kommandodateien, sogenannte c.files, umgesetzt werden. Dazu wird die Auswertung für ein Element manuell vorgenommen. Nach dem Schließen des Programmes kann das automatisch generierte c.file zu einer allgemein gültigen Vorlage umfunktioniert werden, die dann automatisiert elementweise angepasst und ausgeführt werden kann. Für andere Software sind die entsprechenden Manuals oder der Softwaresupport zu konsultieren.

40.1 Random Forest Regressor zur Vorhersage der Gebrauchseigenschaften nach der KTL

- 41 Zur Entwicklung eines Metamodells werden Daten benötigt, deren Generierung im vorliegenden Fall experimentell erfolgte. Die thermo-mechanische Konditionierung für die experimentelle Datengenerierung muss der industriellen Prozessroute, wie bspw. in Abbildung 2 a) aufgeführt, entsprechen.

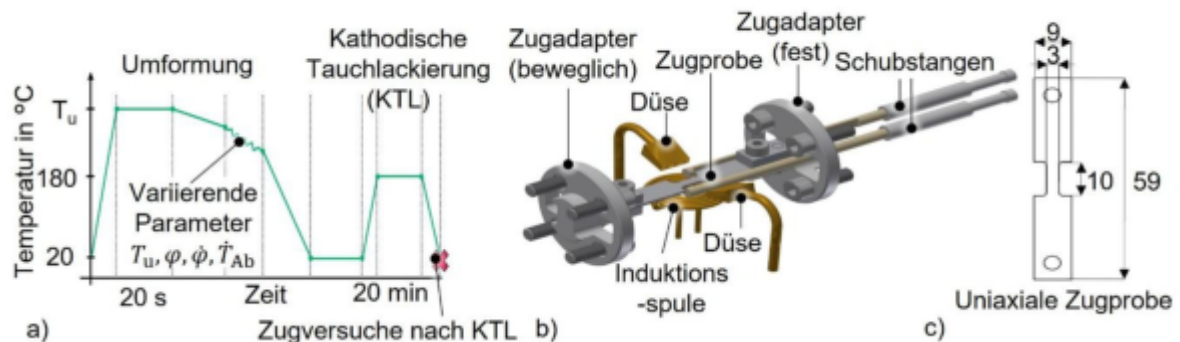


Abbildung 2: a) Prozessroute, b) experimenteller Aufbau und c) Probengeometrie für die Datengenerierung des Ersatzmodells.

- 42 Damit die Durchführung und der Transfer auf andere Anwendungsfälle gelingen, sind folgende Kriterien zu berücksichtigen. Für die Parametervariation sind signifikante Prozessgrößen auszuwählen und innerhalb der industriellen Prozessgrenzen zu variieren. Im vorliegenden Merkblatt wurden folglich für die HWU die Umformtemperatur zwischen 125 und 275 °C, der Umformgrad zwischen 0 und 0,1, die Umformrate zwischen 0,01 und 1 s⁻¹ und die Abkühlrate zwischen 30 und 100 K/s variiert. Die Schrittweite sollte so gewählt werden, dass mindestens drei unterschiedliche Variationen erfasst werden, um nichtlineare Effekte zu berücksichtigen. Für signifikante Parameter wie bspw. die Temperatur sind mehr Variationen zu empfehlen. Da die Datengenerierung auch aufgrund der statistischen Absicherung sehr aufwändig ist, kann der vollfaktorielle Versuchsplan mittels eines determinantenoptimalen Kriteriums in einen teilfaktoriellen Versuchsplan reduziert werden. Dieser Schritt ist sorgfältig abzuwägen, da mit einem Datenverlust häufig ein Verlust der Prognosegüte einhergeht. Ist der Versuchsplan definiert, kann ein experimenteller Aufbau wie in Abbildung 2 b) genutzt werden. Allgemein sollte der Versuchsaufbau eine isotherme Umformung ermöglichen. Weiterhin sollten die definierten Abkühlraten erzielt werden. Ein Nachweis durch Erfassung der Temperatur ist zu erbringen. Zusätzlich sollten die definierten Umformgrade mit den entsprechenden Umformraten induziert werden können, auch dies ist nachzuweisen. Entsprechend der Prozessroute sind alle Proben nach verschiedener Konditionierung der gleichen KTL ähnlichen Behandlung auszusetzen. Die resultierenden Eigenschaften in Abhängigkeit der verschiedenen Umformhistorien sind abschließend zerstörend im Zugversuch zu prüfen. Ähnlich wie bei der Materialcharakterisierung wird aufgrund der thermischen und mechanischen Anforderungen eine skalierte Probengeometrie, wie in

Abbildung 2 c) dargestellt, verwendet.

- 43 Um einen Random Forest Regressors in Python aufzubauen, ist es notwendig, die Bibliothek Scikit-learn zu installieren und im Code zu importieren. Der Import erfolgt über den Befehl ``from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor``. Zusätzlich empfiehlt es sich, die Bibliothek pandas zu verwenden, um den Umgang mit den Daten zu erleichtern. Die Daten sollten in einer Tabelle mit dem Format „Samples x Features“ vorliegen. Für den Random Forest Regressor ist eine Normalisierung der Daten nicht erforderlich, die Rohdaten können direkt genutzt werden. Um die Ergebnisse des Regressors adäquat beurteilen zu können, sollten die Daten allerdings in drei Sets aufgeteilt werden: Trainingsdaten (60 %), Validierungsdaten (20 %) und Testdaten (20 %). Der Random Forest Regressor kann durch den Befehl ``randomforestregressor = RandomForestRegressor(n_estimators=200)`` definiert werden, wobei ``n_estimators`` die Anzahl der Bäume angibt, die trainiert werden sollen. Eine größere Anzahl von Bäumen kann die Qualität der Vorhersage verbessern und das Modell robuster gegenüber Overfitting machen, führt jedoch zu einem erhöhten Zeitaufwand für Training und Vorhersage. Der Trainingsprozess erfolgt durch den Befehl ``randomforestregressor.fit(traindata, trainlabels)``, wobei ``traindata`` die Features und ``trainlabels`` die vorherzusagenden Zielwerte darstellen. Es besteht die Möglichkeit, durch weitere Parameter, wie z. B. ``max_depth`` zur Begrenzung der Baumtiefe oder ``criterion`` zur Festlegung des Kriteriums für den besten Split, das Modell weiter anzupassen. Detaillierte Informationen zu diesen Parametern finden sich in der scikit-learn Dokumentation [28]. Im Anschluss an das Training erfolgt die Optimierung des Modells mithilfe des Validierungssets. Hierfür muss ein geeignetes Qualitätsmaß definiert werden, um die Vorhersagegenauigkeit zu beurteilen und die Hyperparameter entsprechend anzupassen. Dies kann z. B. der RMSE zwischen Vorhersage und Sollwert sein. Daraufhin werden unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich ihres Qualitätsmaßes evaluiert, indem unterschiedliche Modelle trainiert werden und die Auswirkungen auf das Qualitätsmaß untersucht werden. Abschließend wird das optimierte Modell auf dem Testdatensatz evaluiert, um seine Leistungsfähigkeit final zu bewerten. Optional kann daraufhin noch ein weiteres Modell trainiert werden, welches auf sowohl den Trainings-, als auch den Validierungsdaten trainiert wird. Dieses Modell hat tendenziell eine höhere Vorhersagegenauigkeit, da es mit mehr Daten trainiert wurde. Anhand der Testdaten muss danach überprüft werden, ob das Modell nicht overfitted.
- 44 Nach dem erfolgreichen Testing kann das Modell für die Vorhersage mit FE-Daten verwendet werden. Im konkreten Vorhaben wurden die verbleibende Gleichmaßdehnung und Zugfestigkeit nach der KTL vorhergesagt. Die elementweise Zurückführung der Vorhersage in das Postprocessing von Abaqus ist schrittweise und detailliert im Schlussbericht [1] beschrieben. Dazu sind die prognostizierten Daten über die Python 2 Schnittstelle einzulesen und neu definierten Felddausgaben zuzuordnen. Die Implementierung in andere Software wie bspw. LS Dyna ist ebenfalls möglich. Hierzu

müssen die Daten in eine ASCII-Datei mit Knoten und Elementdaten überführt werden. Als Referenz kann das dynain-Dateiformat verwendet werden. Anschließend können die Ergebnisse in einer neuen Simulation als *Initial-Kontrollkartenset definiert und nach einer Scheinsimulation ohne konkrete Vorgänge visualisiert werden. Um solche individuellen Lösungen zu entwickeln, ist die Konsultation der Manuals oder des Softwaresupports eine Möglichkeit.

44.1 Validierung

- 45 Um sowohl die Vorhersage des FE-Modells als auch des vollständigen Ersatzmodells beurteilen zu können, sind die Modelle an Kenngrößen des industriellen Prozesses zu validieren.

45.1.1 FE-Modell

- 46 Bei weggesteuerten Prozessen wird häufig für die Validierung der gemessene Kraft-Weg-Verlauf des Stempels herangezogen und mit den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Eine absolute Bewertung über den RMSE oder eine relative durch Bezug des RMSE auf die Maximalkraft, verbessert die Beurteilung, besonders wenn unterschiedliche FE-Modelle validiert werden sollen. Sind die industriellen Anlagen nicht mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet, ist eine alternative Validierung über die Bauteilgeometrie für KMU eine Alternative. Wie im Schlussbericht detailliert ausgeführt, wird das industriell gefertigte Bauteil nach optischer Vermessung in einem CAD-Flächenvergleich gegen die STL-Datei aus der Simulation referenziert [1].

46.1.1 Vollständiges Ersatzmodell inklusive Random Forest Regressor

- 47 Um das vollständige Ersatzmodell zu beurteilen, müssen an unterschiedlichen Stellen des industriellen Bauteils nach der HWU und KTL Zugproben entnommen werden. Bei der Auswahl der Validierungsbereiche ist auf eine möglichst homogene Verteilung des Umformgrades, der Temperatur, der Blechdicke und der Triaxialität zu achten. Die Prüfung im Zugversuch sollte mit den gleichen Randbedingungen wie bei der abschließenden zerstörenden Prüfung im Rahmen der Datengenerierung für den RF erfolgen. Aufgrund der Dimensionen des industriellen Bauteils sind die entnommenen Zugproben analog zur Charakterisierung und Datengenerierung skaliert. Abschließend können die Vorhersagen der Zugfestigkeit und Gleichmaßdehnung des Ersatzmodells und der Zugversuche gegenübergestellt werden.

48 Anwendungsrichtlinien

48.1 Visualisierung der Bauteileigenschaften nach der KTL

- 49 Die Visualisierung der Bauteileigenschaften ist im Postprocessing von Abaqus anwenderfreundlich möglich und entspricht dem allgemeinen Vorgehen. Die Einträge zur Zugfestigkeit und Gleichmaßdehnung finden sich in dem beim Rückexport definierten Frame der Abaqus Ergebnisdatei.

49.1 Interpretation der vorhergesagten Bauteileigenschaften

- 50 Die vorhergesagten Eigenschaften können einer strukturmechanischen Simulation gegenübergestellt werden. Auf diese Weise kann eine Beurteilung erfolgen, ob das Bauteil den geforderten Belastungen standhält.

51 Einsatzgrenzen, Gültigkeitsbereiche

- 52 **Prozessroute:** Die Prozessroute ist aufgrund der Warmauslagerung in der KTL für aushärtbare Aluminiumlegierungen definiert. Eine Adaption auf andere aushärtbare Legierungen ist unter Berücksichtigung der metallurgischen Vorgänge denkbar.
- 53 **Materialcharakterisierung und -modellierung:** Die Methodik zur Charakterisierung und Modellierung ist allgemein gültig. Die verwendeten Normen bzw. die induktive Erwärmung in manchen Versuchsaufbauten beschränkt die Gültigkeit auf Metalle.
- 54 **FE-Modellierung:** Die allgemeine Vorgehensweise zum Aufbau und zur Validierung des FE-Modells sind auf andere Anwendungsfälle übertragbar. Die konkrete Schnittstellengestaltung und Kopplung innerhalb eines Ersatzmodells ist softwareabhängig und für Abaqus und LS Dyna beschrieben. Für die Übertragbarkeit auf andere Software ist das entsprechende Manual oder der Support zu konsultieren.
- 55 **Ersatzmodellierung:** Das methodische Vorgehen zur Datengenerierung kann in diesem konkreten Fall aufgrund der fehlenden Möglichkeiten, die Vorgänge während der KTL zu simulieren, nur experimentell erfolgen. In anderen Fällen kann die simulative Datengenerierung den Aufwand erheblich reduzieren. Das Vorgehen beim Aufbau des RF ist jedoch grundsätzlich übertragbar.

56 Sonstige Randbedingungen

- 57 Bei der Charakterisierung der Material- und Kontakteigenschaften mit erhöhten Temperaturen sind die zusätzlichen Vorschriften im Versuchsfeld zu beachten.

58 Schrifttum

58.1 Normen und technische Regeln

[5] Merkblatt W7: Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.

[21] DIN EN ISO 6892-2: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur

[23] DIN EN ISO 12004-2: Metallische Werkstoffe – Bestimmung der Grenzformänderungskurve für Bleche und Bänder – Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor

[25] DIN EN ISO 10113: Metallische Werkstoffe - Blech und Band - Bestimmung der senkrechten Anisotropie

58.2 Literatur

[1] Behrens, B.-A.; Jepkens, J.; Vasquez-Ramirez D.: FE-Modellierung der Halbwarmumformung von 7000er-Aluminiumblech und Voraussage der Bauteileigenschaften nach der Auslagerung mit KNN. EFB-Forschungsbericht 620; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover; ISBN-Nr. 978-3-86776-689-0; 2024

-
- [2] Wu, C.; Yuan, Y.; Kamat, R. A: New Approach to Implement High Strength 7075 Aluminum for Automotive Application. MATEC Web Conf. 2020, 326
- [3] Li, J.; Peng, Z.; Li, C.; Jia, Z.; Chen, W.; Zheng, Z.: Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008, 18, 755–762
- [4] Behrens, B.-A.; Vogt, H.; Jalanesh, M.; Bonk, C.; Maier, H.J.; Behrens, S.: Warmumformung von 7xxx-Aluminiumlegierungen. EFB-Forschungsbericht 501; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, ISBN 978-3-86776-554-1; 2018
- [6] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium; Springer, Berlin, 2014
- [7] Scharifi, E.; Sajadifar, S.V.; Moeini, G.; Weidig, U.; Böhm, S.; Niendorf, T.; Steinhoff, K.: Dynamic Tensile Deformation of High Strength Aluminum Alloys Processed Following Novel Thermomechanical Treatment Strategies. Adv Eng Mater. 2020, 22
- [8] Wang, H.; Luo, Y.; Friedman, P.; Chen, M.; Gao, L.: Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012, 22, 1–7
- [9] Polak, S.; Kaczyński, P.; Gronostajski, Z.; Jaskiewicz, K.; Krawczyk, J.; Skwarski, M.; Zwierchowski, M.; Chorzępa, W.: Warm forming of 7075 aluminum alloys. Procedia Engineering. 2017, 207, 2399–2404
- [10] Österreicher, J.A.; Tunes, M.A.; Grabner, F.; Arnoldt, A.; Kremmer, T.; Pogatscher, S.; Schlögl, C.M.: Warm-forming of pre-aged Al-Zn-Mg-Cu alloy sheet. Materials & Design. 2020, 193
- [11] Chen, W.-L.; Lee, R.-S.: Novel Aging Warm-Forming Process of Al-Zn-Mg Aluminum Alloy Sheets and Influence of Precipitate Characteristics on Warm Formability. Metals. 2024, 14
- [12] Merklein, M.; Degner, J.: *Fertigung hochfester Aluminiumbauteile durch Umformen unter Abschreckbedingungen*; EFB-Forschungsbericht 493, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, ISBN 978-3-86776-545-9; 2018
- [13] Noder, J.; Abedini, A.; Rahmaan, T.; DiCecco, S.; Butcher, C.; Worswick, M.: An Experimental and Numerical Investigation of Non-isothermal Cup Drawing of a 7XXX-T76 Aluminum Alloy Sheet. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018, 418
- [14] Sotirov, N.; Simon, P.; Waltenberger, T.; Uffermann, D.; Melzer, C.: Verbessertes Umformverhalten von höchstfesten 7xxx-Aluminiumblechen durch Halbwarmumformen. HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 2011, 66, 37–43
- [15] Banabic, D.: *Sheet Metal Forming Processes*. Springer, Berlin, 2010
- [16] Lu, J.; Song, Y.; Hua, L.; Zhou, P.; Xie, G.: Effect of temperature on friction and galling behavior of 7075 aluminum alloy sheet based on ball-on-plate sliding test. Tribology International. 2019, 140
- [17] Dörn, S.: Programmieren für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Intelligente Algorithmen und digitale Technologie. Springer Vieweg, Berlin, 2018
- [18] Mueller, J.P.; Massaron, L.: Deep Learning kompakt für dummies. Wiley-VCH, Weinheim, 2020
- [19] Gorji, M.B.; Mohr, D.: Towards neural network models for describing the large deformation behavior of sheet metal. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019, 651
- [20] Decke, J.; Engelhardt, A.; Rauch, L.; Degener, S.; Sajadifar, S.V.; Scharifi, E.; Steinhoff, K.; Niendorf, T.; Sick, B.: Predicting Flow Stress Behavior of an AA7075 Alloy Using Machine Learning Methods. Crystals. 2022, 12
- [22] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Kammler, M.; Schrödter, J.; Hadifi, T.; Götze, T.: Assessment of a Modified Tensile Specimen Geometry for the Characterization of 22MnB5 with a Quenching and Deformation Dilatometer. IDDRG Conference. Mumbai, 2012
- [24] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Springer, Berlin, 2016
- [26] Domitner, J.; Silvayeh, Z.; Shafiee Sabet, A.; Öksüz, K.I.; Pelcastre, L.; Hardell, J.: Characterization of wear and friction between tool steel and aluminum alloys in sheet forming at room temperature. Journal of Manufacturing Processes. 2021, 64, 774–784
- [27] Merklein, M.; Lechler, J.; Stoehr, T.: Investigations on the thermal behavior of ultra high strength boron manganese steels within hot stamping. Int J Mater Form. 2009, 2, 259–262

[28] scikit-learn. RandomForestRegressor. Online verfügbar: <https://scikit-learn.org/1.5/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (überprüft am 9 Oktober 2024)

Forschungseinrichtung

Prof. Dr. Ing. B.-A. Behrens
Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
An der Universität 2
30823 Garbsen

Beteiligte Unternehmen

AutoForm Deutschland GmbH
Automotive Center Südwestfalen GmbH
KBW GmbH & Co. KG
DYNAmore GmbH
SCALE GmbH
Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH
simufact engineering GmbH
Novelis Switzerland SA
Benteler International AG
GEDIA Gebrüder Dingerkus GmbH

Offenlegung