

# Optimierung der Flachdrahtherstellung mittels Finite-Element-Analyse – Teil 1: Erstellung eines validen Modells

Hertweck, B. (1, 2); Vetter, N. R. (2); Seeger, C. (1)

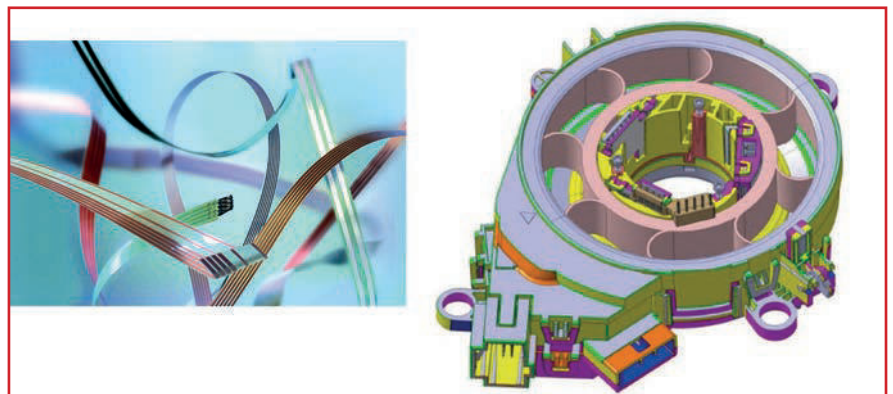
Im Bereich der Kupferwerkstoffe sind neben Reinkupfersorten wie Cu-ETP1 (CW003A) oder Cu-OF1 (CW007A) auch niedriglegierte Werkstoffe, z. B. auf CuMg-Basis, von immer größerer Relevanz bei der Herstellung von Feinkabeln. Die experimentelle Annäherung an die Fertigung dieser und weiterer Legierungen erfordert jedoch einen hohen Versuchsaufwand. Auf Basis eines verifizierten Modells dient die Finite-Elemente-Simulation (simufact.forming 15.0) als direkte Grundlage zur Festlegung einzelner Stichpläne. Eine systematische und umfassende Analyse des Fließverhaltens unterschiedlicher Abmessungen für verschiedene Legierungsgruppen bildet den Schwerpunkt der Studie. Hieraus sollen Erkenntnisse hinsichtlich idealer Stichabnahme, -anzahl und Leistungsaufnahme einzelner Walzblöcke methodisch generiert werden. Diese sollen dem Fertigungsplaner als Empfehlungen für die Festlegung zukünftiger Arbeitspläne übergeben werden.

Flachleiter aus Kupfer sind besonders im Automotive-Umfeld eine wichtige Komponente des Kabelbaums, als Beispiel sind clockspring Anwendungen im Lenkrad oder die Kontaktierung von Verbrauchern in Bereichen mit limitiertem Bauraum, wie unter der Einstiegsleiste, zu nennen (Bild 1).

Darüber hinaus werden Ansätze zur Automatisierung der Kabelbaumherstellung verfolgt, die auf flat flexible cables (FFC/Flachleiterkabel) basieren, da der Flachdraht im Gegensatz zum biegeschlaffen Runddraht einen räumlichen Freiheitsgrad weniger aufweist. [3]

Die Herstellung der Flachleiter erfolgt bis zu einem Dicke-zu-Breite-Verhältnis von  $d/b \approx 1/80$  wirtschaftlich über das Flachwalzen von Runddrähten. Für Querschnittsbereiche im sub-Millimeterbereich ist die Beschaffung von Runddraht in einem standardisierten Durchmesser sinnvoll. Um ein möglichst großen Abmessungsbereich abdecken zu können, wird der Runddraht vor dem Walzprozess auf ein geeignetes Vormaß gezogen. Für die Fertigung der gewünschten Drahtabmessung kann dann auf eine Vielzahl von Walzlinien mit

unterschiedlicher Anzahl von Walzgerüsten sowie unterschiedlichen Walzendurchmessern zurückgegriffen werden. Daneben kann die Kaltverfestigung durch Rekristallisationsglühen abgebaut werden. Zur Umsetzung von engen geometrischen Toleranzen kommen gleitgelagerte Walzgerüste zum Einsatz. Die Prozesskontrolle wird mittels inline-Dicke- und Breitemes-



**Bild 1:** Links: Exemplarische Darstellung eines flexiblen Flachkabels; Rechts: Das clockspring-Modul verbindet den Stator des Lenkrads mit dem Rotor. Die flexiblen Flachkabel (engl.: flexible flat cables / FFC) (hellblau angedeuteter Kanal) ermöglichen die Übertragung der elektrischen Energie für Antrieb der Lenkung oder die Steuersignale (Graphik entnommen aus [1]) auch bei Rotation des Lenkrades.

sung sowie durch mechanische Charakterisierung realisiert.

Zur Auslegung des Arbeitsplans für Reinkupfersorten wird auf eine Datenbank mit experimentell gewonnenen Daten zurückgegriffen, deren Basis Produktionsprotokolle sind. Bei der Erweiterung des firmenspezifischen Produktportfolios um Legierungen wie niedriglegierte Kupfermaterialien, Bronzen oder Messingen, kann auf eine deutlich geringere Anzahl an Erfahrungswerten zurückgegriffen werden. Wie in Bild 2 zu sehen ist, unterscheidet sich das Verfestigungsverhalten der Messinge und Reinkupfer jedoch bedeutend. Die optimale Auslegung der Stichfolge hinsichtlich Materialfestigkeit, Querschnittsgeometrie und elektrischer Leitfähigkeit ist in diesem Bereich somit mit hohem Aufwand verbunden.

## Limitierungen in der experimentellen Auslegung der Arbeitspläne

### ■ Ziehen

Wie bereits oben erwähnt, kommt dem Ziehen als vorgelagertem Prozess eine zentrale Rolle zu. Falls nach dem Ziehen keine Rekristallisationsglühung erfolgt, stellt diese Umformung eine variable Vorverfestigung je nach gewähltem Abzugsverhältnis dar.

### ■ Walzen

Bei der Erstellung eines Arbeitsplans wird zunächst auf die elementare Plastizitätstheorie zurückgegriffen. Das Verhalten der Querschnittsgeometrie wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Besonders die Wahl und Anordnung der Walzendurchmesser hat großen Einfluss. Große Durchmesser bewirken

hohe Reibwerte im Walzspalt und erlauben somit Kraftübertragung in axialer Richtung. Die Stiche, welche der Feinstellung der Dicke dienen, werden somit tendenziell mit kleineren Walzdurchmessern realisiert. Weitere Faktoren, die sich auf die Breitung auswirken, sind die Kaltverfestigung, Umformtribologie sowie Walztemperatur und -geschwindigkeit. Hieraus erwachsen in der Praxis gegenseitige Abhängigkeiten, welche bei einem experimentellen Ansatz hohen Versuchsaufwand mit sich bringen, da einzelne Einflussgrößen nur abgeschätzt werden können. [2]

Semi-empirische Modelle des Walzenprozesses ermöglichen zunächst ein vereinfachtes Vorgehen bei der Stichfolgenauslegung. Eine Vorhersage der Fließeigenschaften auf Basis von Werkstoffkennwerten kann durch numerische Berechnungsverfahren mittels Finiten Element Modellen erfolgen. [4,5]

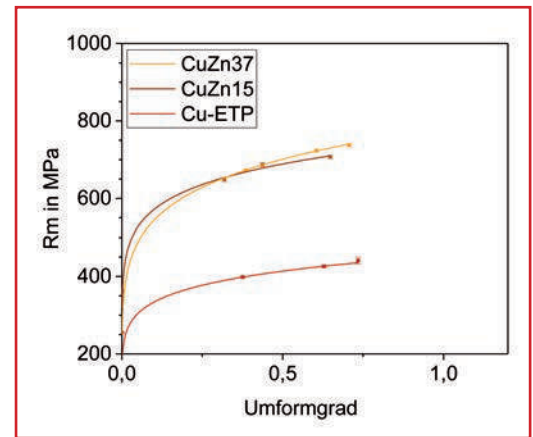
**Ermittlung der Fließkurve**

Die Fließkurven sind zentrale Eingabeparameter für jedes Simulationsmodell in der Umformung. Jedoch ist die Fließkurve des Materials keine intrinsische Materialeigenschaft, sondern auch durch das Messverfahren und die Versuchsbedingungen wie Spannungszustand oder Umformgeschwindigkeit bestimmt. Einfache und häufig verwendete Methoden, die Fließkurve beim Flachwalzen zu ermitteln, sind Zug- und Druckversuch. Dabei wird entweder primär der Walzdruck oder die Tänzerspannung als signifikanter Parameter abgebildet. Der Zugversuch ermöglicht darüber hinaus die Ermittlung am real verwendeten Werkstoff, dem Rund- oder Flachdraht, mit ausreichender Genauigkeit. Hier werden die Fließkurven mit einer Universalprüfmaschine (Z005; AllroundLine / Zwick GmbH & Co KG) unter Verwendung von Dehnungsfineßgeräten (makroXtens Extensometer / Zwick GmbH & Co KG) aufgenommen. Aus Kraft- und Dehnungsmessung errechnet die Software Testexpo 14 dabei die wahre Spannung  $\sigma_w = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$  und wahre Dehnung  $\epsilon_w = \ln(1 + \epsilon)$  als Ausgabeparameter. Diese ermöglichen die Erstellung der Fließkurve für den einachsigen Zugversuch. Dort kann die Fließspannung nach  $k = \sigma_w$  und der Umformgrad nach  $\phi = \epsilon_w$  gesetzt werden. Dabei ist der elastische Teil der Dehnung für den Umformgrad nicht relevant.

Exemplarisch zeigt dies Bild 3 an zwei niedrig legierten Kupfer-Legierungen (CuSn0,15; CuMg0,30), sowie an drei Fließkurvenansätzen von reinem Kupfer (Cu-ETP1) [6,7]. Die ermittelten Fließkurvenwerte werden mittels Fit-Routine nach Levenberg-Marquardt entsprechend dem Ansatz von Ludwik  $k = k_0 + B \cdot \phi^N$  stetig zu höheren Umformgraden extrapoliert. Dabei ist  $k_0$  der Anfangswert der Fließspannung,  $B$  die Verfestigung bei  $\phi = 1$  und  $N$  der Verfestigungsexponent.

**Erstellung eines Modells**

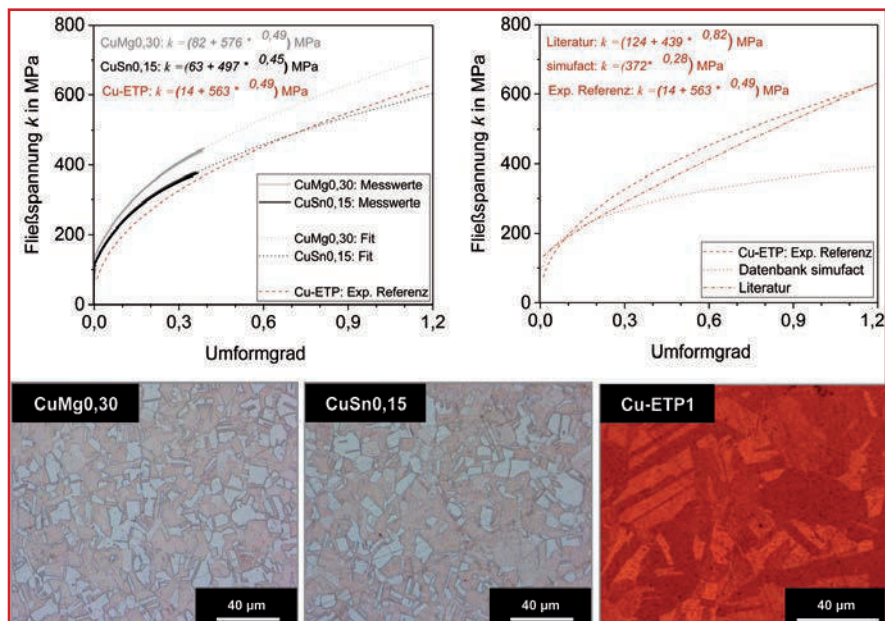
Für die Simulation des Zieh- und Walzprozesses wird das Berechnungsprogramm simufact.forming15.0(MSC,partofHEXAGON) mit dem Finite Elemente-Solver von Marc verwendet. Standard-Ergebnisse sind bspw. Bauteilgeometrie, Umformgrad, (Vergleichs-) Spannungen, Temperaturen, Dehnraten und Materialflüsse. Als exemplarischer, benutzerdefinierter, programmierbarer Ergebnisparameter ist die Materialhärte zu nennen. Zur Validierung des Modells ist die messtechnische Ermittlung der Ergebnisse essentiell. Direkt zugängliche Parameter wie Geometrie, Härte, Streckgrenze, Prozessgeschwindigkeit oder Umformgrad lassen sich jederzeit, teils sogar inline, ohne hohen Zusatzaufwand messtechnisch ermitteln. Unzugängliche Parameter wie Temperatur im Walzspalt, Reibungs- und Tribologieeigenschaften



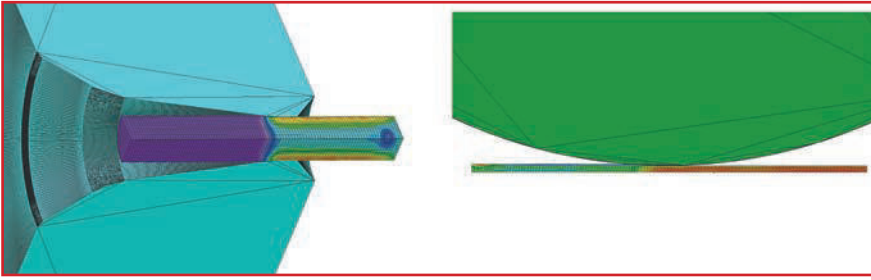
**Bild 2: Verfestigungsverhalten von niedriglegierten Kupferwerkstoffen beim Walzen. Die Ziehstufen vor den Walzstichen sind hierbei nicht als Messpunkte aufgenommen.**

und Tänzerkräfte sind experimentell nicht mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Daher erfolgt ein empirisches Vorgehen mit Plausibilitätsprüfungen.

**Preprocessing** beschreibt zusammengefasst die Vorbereitung des FE-Modells für den mehrstufigen Zieh-Walz-Prozess. Neben Aufbau und Anordnung von Werkstück und Werkzeugen, sowie den Materialmodellen, müssen Randbedingungen entsprechend dem Produktionsprozess möglichst realitätsnah und doch in idealisierter Weise für einen gewählten Ausschnitt des Gesamtsystems betrachtet werden. Bild 4 zeigt den grundsätzlichen Modell Aufbau basierend auf Axialsymmetrie.



**Bild 3: Fließkurven der untersuchten niedriglegierten Werkstoffe (oben) in Korrelation zum Ausgangsgefüge (unten) mit Kupfer Cu-ETP1 als Referenz. Die Schwierigkeit bei der Anwendung von Fließkurven zeigt sich in den unterschiedlichen Verläufen, die in unterschiedlichen Quellen zu finden sind.**



**Bild 4: Prozessmodelle in simufact für den Zieh- (links) und Walzprozess (rechts) mit entsprechender Axialsymmetrie zur z-Achse [2]**

Aufgrund der Axialsymmetrie werden Werkzeuge und Werkstück als 90°-Elemente erstellt. Einfache Bauteile werden direkt in simufact erstellt, für komplexe Geometrien eignet sich Siemens Solid Edge ST9. Alle Werkzeuge werden als Starrkörper ohne deformierbaren Anteile und Wärmeleitung erstellt.

Die Vernetzung der Geometrien wird über Hexaeder-Elemente durchgeführt, da sie bei einfachen Geometrien einen geringeren Rechenaufwand und stabilere Simulationen gewährleisten.

Über den Zieh-Walz-Prozess wird eine relativ grobe Elementgröße von 0,05 mm fast komplett aufrechterhalten. Eine Verkleinerung der Elementgröße erfolgt in 0,01 mm-Schritten, sofern eine Mindestanzahl von 2-3 Elementen über die Bauteildicke nicht mehr gegeben ist. Die Vernetzung wird, mit zunehmenden Umformgrad, inline, entsprechend den Neuvernetzungen, automatisch erneuert, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten.

Die auftretende Reibung an den Kontaktflächen wird über ein kombiniertes Coulomb-Schubreib-Gesetz von simufact, welches die Überschreitung physikalischer Grenzen verhindert, realisiert (Reibkoeffizient  $\mu = 0,08$ ; Reibfaktor  $m = 0,12$ ). Die Prozessgeschwindigkeit

wird nach dem letzten Walzstich experimentell ermittelt. Die thermischen Daten, sprich die Umgebungs-, Werkzeug- und Werkstücktemperatur liegen bei 25 °C bei einem Wärmeübergangskoeffizient von  $50 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Zur **Analyse** der Kaltmassivumformung wird der ‚Iterative Solver‘ ausgewählt. Neben der Eignung für große Modelle durch geringe Ausnutzung des Hauptspeichers ist dieser optimiert für 3D-Prozesse mit Hexaeder-Elementen und elastoplastischem-Materialverhalten.

Das **Postprocessing** beschreibt die Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse. Geometrie bzw. Umformgrad sind primäre Ergebnisgrößen der Umformtechnik. Dieser wird lokal über die inkrementelle Integration der Umformgrade an den Knotenpunkten der FE-Elemente berechnet und per Mittelwertbildung auf ein neues Netz übertragen, da die Elemente durch Krafteinwirkung umgeformt werden und eine Neuvernetzung notwendig machen.

Der **Aufbau eines verketteten Prozesses** im validen Simulationsmodell als Gesamtmodell auszuführen, ist im vorliegenden Fall unpraktikabel. Die Nutzung eines Stufenablaufs sowie die Nutzung eines Fixpunktes im Koordinatensystem ermöglicht die Vereinfachung und Zeitein-

spaarung der Rechnung des verketteten Zieh-Walz-Prozesses. Ebenfalls lassen sich Schnitte einfacher erstellen und Neupositionierungen durchführen. So lässt sich ein durchschnittlicher Zieh-Walz-Prozess mit 10-12 Prozessschritten in 4-8 h erstellen, simulieren und erste Ergebnisse sind nach ca. 1 d auswertbar. Der Zusammenschluss der Umformstufen ist jedoch nicht trivial. Neben ständiger Überwachung und Korrekturen des Prozesses ist zudem die Reduktion der Zieh- und Walzstufen unter Umständen schwer abzuschätzen.

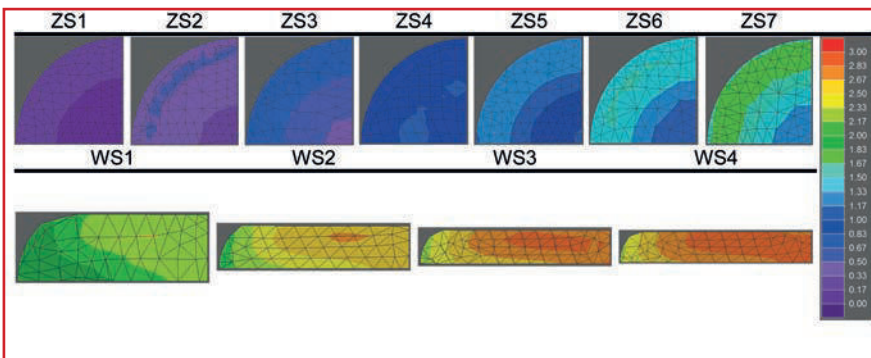
**Gültigkeit des Modells**

Entsprechend den Beschreibungen zur Erstellung eines validen Modells wurde eine Versuchsreihe mit mehreren Zieh- und Walzstufen aufgebaut. In Bild 5 sind die typischen Ergebnisse eines verketteten Prozesses aufgezeigt. Als Bewertungskriterien für das Simulationsergebnisse und damit auch des Modells werden hierbei die Querschnittsgeometrie, und der Umformgrad herangezogen.

Konkret dargestellt sind die zweiten Quadranten der orthogonalen Schnitte des Drahts. Nach sieben Ziehstufen mit einer annähernd konstanten Stufung von 19 % (Reduktion der Querschnittsfläche je Ziehstufe) wird der vorverfestigte Kupferdraht über vier Walzstufen auf die Endabmessungen gewalzt. Der Dickenumformgrad der Walzstufen sinkt bei Soll-/Ist- und Simulationenwerten von  $|\varphi_{d,1}| = \ln(d_{neu}/d_{alt}) = 0,734$  bei der ersten Walzstufe bis zu  $|\varphi_{d,4}| = 0,081$  bei der letzten Walzstufe. Der Breitenumformgrad sinkt im Sollwert von  $|\varphi_{b,1}| = \ln(b_{neu}/b_{alt}) = 0,427$  auf  $|\varphi_{b,4}| = 0,017$ . Diese Ergebnisse sind für die in Tabelle 1 und Bild 3 dargestellten Werkstoffe annähernd gleich.

Die Ergebnisse einer Berechnungsroutine sind für die Werkstoffe Cu-ETP1, CuSn0,15 und CuMg0,30 in Tabelle 1 exemplarisch dargestellt. Aufgrund der geschlossenen Umformung ist die Dickenabnahme einfach mit hoher geometrischer Genauigkeit zu bestimmen und bewegt sich geometrisch in marginalen Abweichungen. Die Berechnung der Breitung kann aufgrund der vorher beschriebenen Abhängigkeiten mit deutlich größeren Fehlereinflüssen einhergehen.

Die Optimierung der Berechnungsroutine für die experimentell ermittelte Fließkurve von Cu-ETP1 ist in Tabelle 2 exemplarisch berechnet worden. Ziel ist hierbei,



**Bild 5: Oben: Simulation der Ziehstufen mit Darstellung des Umformgrades (auf Radius skaliert). Unten: Simulation der Walzstiche mit Darstellung des Umformgrades (auf Breite skaliert). Datengrundlage: ermittelte Fließkurve von Cu-ETP1**

die relative Abweichung der Breitung auf einen Wert nahe Null zu verbessern. Hierzu sind über mehrere Iterationsschleifen die Parameter Reibung, Walzgeschwindigkeit und Temperatur beispielhaft verändert worden.

In diesem Fall besitzt eine Absenkung der Walzgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Qualität und Quantität der Geometrie. Einzig die Stabilität der Berechnung bzw.

setz, definiert wird, zeigt während der Iterationsschleifen eine Geometrieänderung. In Übereinstimmung mit der Literatur wird mit steigendem Reibkoeffizienten  $\mu$  und Reibfaktor  $m$  die Breitung des Materials verstärkt. Die relative Abweichung der Simulationswerte zu Soll-/Ist-Werten nimmt auf bis zu 0,404 % in der ersten Walzstufe ab. Der Dickenumformgrad der Walzstufen bleibt wie zuvor beschrieben

Cu-ETP1 angewendet werden. Des Weiteren können über eine Einstellung der Reibfaktoren bei niedrig legierten Kupferwerkstoffen CuSn0,15 und CuMg0,30 ebenfalls geringere Abweichungen erzielt werden.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Nachdem in diesem ersten Artikel der Modellaufbau, die Bedeutung der Werkstoffdaten für den Praktiker und eine erste Validierung des Simulationsmodells beschrieben wurde, wird der zweite Teil verstärkt auf konkrete Anwendungsbeispiele eingehen. Das sind beispielsweise die Optimierung von Arbeitsplänen hinsichtlich Reduktion der Stichanzahl oder Optimierung der Leistungsaufnahme der einzelnen Walzblöcke. Darüber hinaus werden Drähte aus Hybridmaterialien betrachtet.

**Literatur**

- [1] M. Harrer und P. Pfeffer (Eds.), *Steering Handbook*, Springer International Publishing, Schweiz, 2017.
- [2] R. Kopp und H. Weigels, *Einführung in die Umformtechnik*, Verlag Mainz, Aachen, 1999.
- [3] M. Spahr, *Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme*, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2017.
- [4] H. G. Bauer und W. Schadt (Eds.), *Walzen von Flachprodukten*, Springer-Verlag GmbH, Deutschland, 2017.
- [5] J. Lohmar et al., *Inverse modeling techniques for the precise prediction of rolling forces and torques in heavy plate rolling*, 9th International Rolling Conference & 6th European Rolling Conference, Venice (Italy), 2013
- [6] R. Hinkfoth, *Massivumformung*, Verlag Mainz, Aachen, 2003.
- [7] MSC.Software GmbH, part of HEXAGON, *simufact.forming (Version V15)* (Software), 2018, Elektronische Quelle.

(1) Bruker-Spaleck GmbH, Hardt  
 (2) Hugo Kern und Liebers GmbH & Co. KG, Schramberg

Relative Abweichungen in %										
	Cu-ETP1 (simufact)		Cu-ETP1 (experimentell)		Cu-ETP1 (Literatur)		CuSn0,15		CuMg0,30	
	d <sub>rel</sub>	b <sub>rel</sub>	d <sub>rel</sub>	b <sub>rel</sub>	d <sub>rel</sub>	b <sub>rel</sub>	d <sub>rel</sub>	b <sub>rel</sub>	d <sub>rel</sub>	b <sub>rel</sub>
WS4	0,0	-14,2	+1,2	-12,9	+1,2	-12,0	0,0	-12,8	+1,2	-12,2

**Tabelle 1: Vergleich der relativen Abweichung der Dicken- und Breitenabmessungen von der Simulation zum Soll-/Istwert nach Walzstich 4 [6, 7].**

die Anzahl auftretender Simulationsabbrüche, sinkt mit steigender Walzgeschwindigkeit. Die Ergebnisse des Parameters Temperatur basieren unter anderem auf der experimentell ermittelten Fließkurve. Da diese jedoch nur bei konstanter Raumtemperatur aufgenommen wurde, sind Extrapolationen der Fließkurvenwerte in

konstant, da die Walzstraße keine Veränderungen durch die Iterationen erfährt. Der Breitenumformgrad liegt aus der Simulation bei  $|\varphi_{b,I-Sim}| = 0,431$ .

Die Ergebnisse einer Berechnungsroutine des ersten Walzstiches beim Werkstoff Cu-ETP1 stimmen somit inhaltlich mit der empirischen Messung überein und

Relative Abweichungen in % von Cu-ETP1 (experimentell) bei Variation verschiedener Parameter								
Iteration		01	02	03	04	05	06	07
Parameter			$\mu \uparrow \uparrow$	$\mu \uparrow$	$v_{Walzen} \downarrow \downarrow$	$v_{Walzen} \downarrow$	$\mu \uparrow \uparrow \uparrow$	$T \downarrow$
WS1	d <sub>rel</sub>	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	b <sub>rel</sub>	-10,9	-2,6	-7,27	-13,0	-13,0	0,4	-13,0

**Tabelle 2: Vergleich der relativen Abweichung der Dicken- und Breitenabmessungen von der Simulation zum**

andere Temperaturbereiche nicht aussagekräftig. [2]

Einzig die Variation der Reibung, welche nach dem Coulombschen-Schubreib-Ge-

können damit als valide angesehen werden. Die Variationen der Reibung können somit für die restlichen Walzstiche, sowie für die zwei weiteren Materialmodelle des

**RoHS-Richtlinie 2011/65/EU**

Die RoHS-Richtlinie 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten hat mit Wirkung vom 3. Januar 2013 die alte RoHS-Richtlinie 2002/95/EG abgelöst. Damit gehen für Hersteller, Importeure, Bevollmächtigte

und Händler neue Pflichten einher, die in diesem Buch detailliert beschrieben werden. Insbesondere die neuen Gerätekategorien, die Übergangsfristen sowie Anforderungen in der Lieferkette stellen dabei für die Wirtschaftsakteure eine Herausforderung dar. Das Buch gibt diesbezüglich

einen praxisnahen Überblick und erläutert die zentralen Begrifflichkeiten der Richtlinie sowie der deutschen Umsetzung (ElektroStoffV).

C. Ebeling, *Beuth* 2017, 220 S., br., 24,80 Euro, ISBN 978-3-410-26781-2