

Potenziale der umformtechnischen Fertigung

Nachhaltige Herstellung von Rundsteckverbindern

M. Meerkamp, H. Voigts, M. Müller, T. Herrig, T. Bergs, S. Hoppe

ZUSAMMENFASSUNG Die Herstellung von rotations-symmetrischen Crimpkontakten für Rundsteckverbinder muss ökologische Nachhaltigkeit und hohe Produktivität vereinen. Im Vergleich zur derzeit eingesetzten Zerspanung von Rundsteckverbinder ermöglicht das Kaltfließpressen eine nahezu vollständige Werkstoffausnutzung und reduziert den CO₂-Fußabdruck erheblich. Dieser Beitrag zeigt Potenziale, Herausforderungen und Entwicklungsbedarfe bei der Umstellung von zerspanender auf kaltfließpressende Fertigung auf.

STICHWÖRTER

Umformtechnik, Kupfer, Crimpen

Sustainable production of circular connectors – Potential linked to forming technologies

ABSTRACT The production of circular connectors must combine ecological sustainability with high productivity. Cold forging offers almost complete material utilization compared to currently used machining processes and significantly reduces the CO₂ footprint. This paper highlights potential, challenges, and development needs for transitioning from machining to cold forging in connector manufacturing.

1 Einleitung

Rundsteckverbinder werden bereits heute in hohen Stückzahlen gefertigt. Die fortschreitende Elektrifizierung, beispielsweise in der Mobilität, sowie die wachsende Bedeutung der Informatstechnologie führen zu einer stetig steigenden Nachfrage. Für den Steckverbindermarkt wird in den kommenden Jahren eine jährliche Wachstumsrate von knapp 7 % prognostiziert [1]. Die konventionelle, zerspanende Fertigung von Rundsteckverbinder erzeugt durch das hohe Spanvolumen große Mengen an Späneschrott, der aufwendig rückgeführt und wieder eingeschmolzen wird. Der damit verbundene thermische Prozess wirkt sich negativ auf den ökologischen Fußabdruck der rotationssymmetrischen Kontakte in Rundsteckverbinder aus. Im Gegensatz dazu bietet das Kaltfließpressen als umformtechnisches Fertigungsverfahren eine hohe Werkstoffeffizienz und somit signifikante Potenziale zur Reduzierung des Werkstoffeinsatzes und zur Verbesserung der ökologischen Bilanz. Die Umstellung von zerspanend hergestellten auf kaltfließgepresste Rundsteckverbinder ist jedoch mit spezifischen Herausforderungen verbunden. Einerseits weisen derzeit eingesetzte Rundsteckverbinder Geometrieelemente auf, die aufgrund verfahrenstechnischer Grenzen des Kaltfließpressens nicht ohne Weiteres umformtechnisch hergestellt werden können. Andererseits besitzen kaltfließgepresste Steckverbinder andere Eigenschaften, beispielsweise hinsichtlich ihrer Crimpbarkeit, da der Umformprozess bereits zu einer Kaltverfestigung führt.

Die Potenziale von kaltfließgepressten gegenüber konventionell gedrehten Rundsteckverbinder werden in drei Schritten bewertet. Im ersten Schritt wird eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für zerspanend und kaltfließgepresst hergestellte Rundsteckver-

binder durchgeführt, um den Product Carbon Footprint (PCF) zu berechnen und darzustellen, wie sich unterschiedliche Fertigungsverfahren auf die ökologische Bilanz auswirken. Im zweiten Schritt werden die Geometrieelemente aktuell eingesetzter Rundsteckverbinder analysiert und untersucht, wie diese mit umformtechnischen Verfahren oder durch Designanpassungen realisierbar sind. Abschließend werden erste Abschätzungen zum Vergleich der Funktionseigenschaften getroffen, mit Fokus auf der Crimpbarkeit, da diese eine zentrale Eigenschaft von Rundsteckverbinder ist und maßgeblich durch die beim Umformen eingebrachte Kaltverfestigung beeinflusst wird. Hierzu wird die jeweilige Fertigungsroute (Zerspanen und Kaltfließpressen) sowie der Crimp-Prozess mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) numerisch abgebildet. Die FEM erlaubt es, die Spannungs-Dehnungs-Zustände in den gecrimpten Hülsen zu analysieren und die Steckverbinder hinsichtlich ihrer Crimpbarkeit zu vergleichen. Dieses Vorgehen zeigt Ansätze zur nachhaltigen Herstellung von Rundsteckverbinder auf, die ökologische und wirtschaftliche Vorteile vereinen.

2 Lebenszyklusanalyse zerspanter und umgeformter Rundsteckverbinder

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der durchgeführten Lifecycle-Analyse (LCA) definiert, mit deren Hilfe der PCF für verschiedene Rundsteckverbinder in den Fertigungsroute Zerspanen und Fließpressen ermittelt wird. Die Beschreibung orientiert sich an den etablierten Phasen einer LCA gemäß ISO 14040/44 (Goal & Scope Definition, Life Cycle Inventory, Life Cycle Impact Assessment, Interpretation) [2].

Tabelle 1. Input- und Outputströme für die LCI.

Aktivität	Zerspanen	Kaltfließpressen
Werkstoff	CuZn37	CuZn37
Masse Rohling	1,674 g	0,878 g
Späneschrott	0,79 g	0 g
Bearbeitung	Drehen in 1 Stufe	Kaltfließpressen in 3 Stufen

Tabelle 2. LCIA-Berechnung für beispielhafte Steckverbinder [5].

	Einheit	Fertigungsverfahren	1	2	3	4	5	6
Variante	-							
Außendurchmesser	mm		Ta2,9	2,14	2,14	14,8	14,8	14,8
Länge	mm		25,2	19,4	14,8	75,9	79,9	80,9
Volumen des Rohlings	mm ³		199,3	87,8	67,6	14106,2	14803,7	14978,1
Volumen des Kontakts	mm ³		104,7	35,6	18,9	6806,5	7405,3	8023,0
Werkstoffdichte	g/mm ³		0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084
Masse Rohling	g		1,7	0,7	0,6	118,5	124,4	125,8
Masse Fertigteil	g		0,9	0,3	0,2	57,2	62,2	67,4
Masse Spanvolumen	g		0,8	0,4	0,4	61,3	62,1	58,4
Anteil Spanvolumen	%		47,5	59,4	72,0	51,7	50,0	46,4
CO _{2eq} für Werkstoffeinsatz	g CO _{2eq}	Drehen	0,00763	0,00336	0,00259	0,54033	0,56704	0,57372
	g CO _{2eq}	Umformen	0,00401	0,00136	0,00073	0,26071	0,28365	0,30731
CO _{2eq} für Bearbeitung	g CO _{2eq}	Drehen	0,00005	0,00003	0,00003	0,00415	0,00421	0,00395
	g CO _{2eq}	Umformen	0,00009	0,00003	0,00002	0,00590	0,00642	0,00696
Recycling von Spänen	g CO _{2eq}	Beim Drehen	-0,00084	-0,00046	-0,00043	-0,06450	-0,06537	-0,06145
Summe Drehbearbeitung	g CO _{2eq}		0,00685	0,00293	0,00219	0,47997	0,50587	0,51622
Summe Umformen	g CO _{2eq}		0,00410	0,00140	0,00074	0,26662	0,29007	0,31427
Rel. Einsparung von CO _{2eq} von Kaltfließpressen gegenüber Drehbearbeitung	%		40,1	52,4	66,1	44,5	42,7	39,1

2.1 Goal & Scope Definition (Ziel und Untersuchungsumfang)

1. Ziel: Das primäre Ziel der Studie besteht in einer ersten energetischen und ökologischen Gegenüberstellung verschiedener Herstellverfahren für Rundsteckverbinder, insbesondere eines zerspanenden Prozesses und eines Kaltfließpressprozesses.
2. Functional Unit (FU): Als funktionelle Einheit wird eine 3 mm durchmessende Rundsteckverbindung festgelegt. Diese Größe

erlaubt eine realitätsnahe, jedoch grobe Abschätzung des Energiebedarfs und der Werkstoffnutzung pro Bauteil.

3. Produktsystem

- Zerspanung
- Rohmaterial mit 3 mm Durchmesser (Messing CuZn37)
- Spanende Bearbeitung (Drehen) zum Einbringen der Geometriefeatures der Steckverbinder
- anfallende Späne, anschließend Recycling
- Umformung

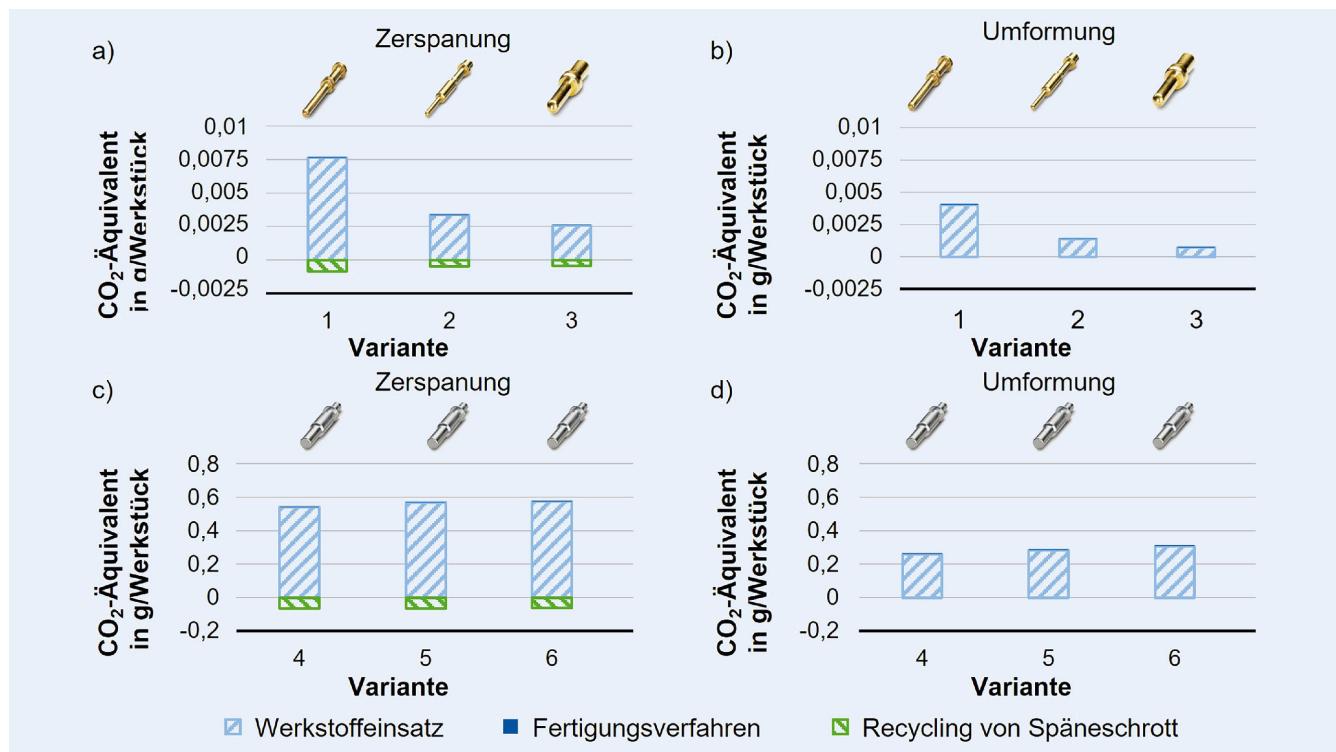


Bild 1 Gegenüberstellung des Product Carbon Footprint (PCF) für verschiedene repräsentative Steckverbinder: a) Variante 1–3, zerspannt; b) Variante 1–3, umgeformt; c) Variante 4–6, zerspannt; d) Variante 4–6, umgeformt (siehe Tabelle 2). *Grafik: MTI, [5]*

- Rohmaterial mit 2,5 mm Durchmesser (Messing CuZn37), da das Umformen die Nutzung eines dünnern Ausgangsquerschnitts erlaubt
 - Zuschneiden des Rohmaterials auf benötigte Länge – dreistufiges Kaltfließpressen
4. Werkzeug: In beiden Prozessketten (Zerspanen und Kaltfließpressen) wird von einem vergleichbaren Werkzeugkonzept ausgegangen, das jedoch jeweils an das spezifische Fertigungsverfahren angepasst ist.
5. Material: Der Werkstoff ist Messing CuZn37, das aufgrund seiner vorteilhaften Umformbarkeit und elektrischen Eigenschaften häufig für Rundsteckverbinder eingesetzt wird.
6. Datenbasis: Werkstoff- und Prozessdaten stammen aus der Idemat-Datenbank (idemat), die relevante Ökobilanzdaten für Metalle, Halbzeuge und Prozesse bereitstellt. [3]
7. Wirkungsabschätzigmethode: Zur Bewertung der Umweltwirkungen wird die ReCiPe-H-Midpoint-Berechnungsmethode (2016) angewandt. Dabei werden verschiedene Wirkungskategorien (wie Klimawandel, Ressourcenverbrauch) betrachtet und in entsprechende Indikatoren überführt. [4]

2.2 Life Cycle Inventory (LCI, Sachbilanz)

In der Sachbilanz werden die Input- und Outputströme (Werkstoff- und Energieverbräuche sowie Emissionen) systematisch erfasst. **Tabelle 1** fasst exemplarisch die wichtigsten Massenflüsse für Zerspanung und Kaltfließpressen zusammen. Bei der zerspanenden Fertigung wird ein Rohling mit einem Durchmesser von 3 mm verwendet, um auch den größten Durchmesser des Rundsteckverbinder fertigungstechnisch zu realisieren. Dadurch entsteht Späneschrott (0,79 g pro Bauteil), der recyclebar ist. Für das Kaltfließpressen wird ein dünneres Ausgangsmaterial

(2,5 mm) verwendet. Schrott fällt praktisch nicht an, was sich positiv auf den Werkstoff- und Energieverbrauch auswirkt.

Die Bearbeitung erfolgt beim Zerspanen als einstufiger Drehprozess, während die Umformung durch einen dreistufigen Kaltfließprozess abgebildet wird. Um den dreistufigen Umformprozess zu berücksichtigen, wird der Energiebedarf für einen einstufigen Umformprozess aus der Idemat-Datenbank dreifach gewertet [3]. Unterschiede in den Werkzeugstandzeiten der beiden Prozessrouten werden nicht berücksichtigt. Da die funktionelle Einheit eine einzelne Steckverbindung darstellt, sind die auf eine Einheit bezogenen Massenflüsse aus dem Umformwerkzeug beim Kaltfließpressen beziehungsweise den Wendeschneidplatten beim Drehen vernachlässigbar.

2.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA, Wirkungsabschätzung)

Als Wirkungskategorie wird „Klimawandel (Global Warming Potential, GWP)“ betrachtet. Der Fokus liegt auf dem PCF in CO₂-Äquivalenten, um eine direkte Gegenüberstellung der verschiedenen Fertigungsprozesse hinsichtlich ihrer CO₂-Bilanz zu ermöglichen. Um den PCF zu berechnen, werden die erhobenen Daten (wie etwa Werkstoffbedarf, Energieaufwand, entstehende Emissionen) mittels der ReCiPe-H-Midpoint-Berechnungsmethode (2016) verrechnet [4]. Die Ergebnisse der ReCiPe-Analyse ermöglichen eine quantitative Gegenüberstellung der einzelnen Fertigungsprozesse. Dank der geringeren Ausgangsmasse und der Fertigung ohne anfallenden Schrott weist das Kaltfließpressen im Vergleich zum Zerspanen einen reduzierten PCF auf.

Insgesamt zeigt die Studie, dass das Kaltfließpressen bei ausreichenden Stückzahlen und angepasster Konstruktion (umformgerechtes Design) das Potenzial hat, gegenüber der zerspanenden

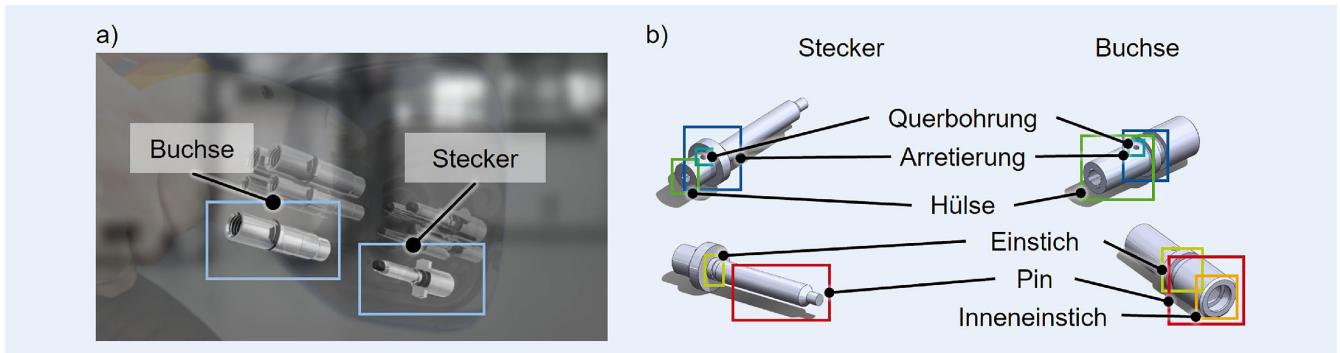


Bild 2 a) Beispiele für Rundsteckverbinder als Stecker und Buchse im Bereich E-Mobility, b) typische Geometriefeatures von Steckern und Buchsen.
Grafik: a) [9], b) MTI

Fertigung ökologische Vorteile zu realisieren. Die Anwendung der LCIA ist für eine Auswahl an repräsentativen Steckverbindern in **Tabelle 2** [5] aufgeführt.

Es wurden die CO₂-Äquivalente pro gefertigtem Steckverbinder in der Bilanzierung Cradle-to-Gate berechnet, also unter Einbezug der Werkstoffherstellung, des Werkstoffaufwands und der eigentlichen Fertigung (**Bild 1 a)** bis d).

Die Berechnungen zeigen, dass die umformende Fertigung von Steckverbindern ein Einsparpotenzial von CO₂-Äquivalenten in einem Bereich von etwa 40–70 % eröffnet. Dabei wurde die Rückführung von Späneschrott in der Zerspanung für das Recycling bereits negativ angerechnet. Der Aufwand in der Bilanzhülle Cradle-to-Cradle, der Bearbeitung im Betrieb durch Zerspanung oder Kaltfließpressen, erscheint gegenüber der Bedeutung des Werkstoffeinsatzes vernachlässigbar klein.

3 Umstellung von zerspanten auf kaltfließgepresste Rundsteckverbinder

Rundgedrehte Steckverbinder finden in zahlreichen Bereichen Anwendung. Sie bestehen aus zwei ineinandergrifffenden Komponenten: einer Buchse (Mutterteil) und einem Stecker (Vaterteil, **Bild 2 a)**). An den nicht ineinandergrifffenden Enden von Buchse und Stecker werden Kabel angeschlossen, indem sie mit den Bau teilen form- und kraftschlüssig verpresst werden. Dieser Vorgang wird als Crimping bezeichnet. [6]

Unabhängig vom konkreten Einsatzfall oder der Baugröße weisen sowohl Buchse als auch Stecker bestimmte, wiederkehrende Geometrieelemente auf, welche in Bild 2 b) exemplarisch an abstrahierten Steckern und Buchsen dargestellt werden. Diese Geometrieelemente erfüllen spezifische Funktionen und sind bei der Umstellung von zerspanend hergestellten auf kaltfließgepresste Rundsteckverbinder zu berücksichtigen. [7]

Hülse

Die Hülse wird als hohlylindrischer Napf oder Bohrung ausgeführt und dient der Aufnahme der elektrischen Leitungen sowie ihrer dauerhaften Verbindung mit Stecker oder Buchse. Beim Crimping werden die Leitungen in die Hülse eingeführt und diese plastisch verpresst, wodurch eine mechanisch stabile und elektrisch leitfähige Verbindung entsteht [8]. In der Drehbearbeitung wird die Hülse durch eine Bohrung gefertigt, während sie beim Kaltfließpressen meist in einem separaten Umformschritt durch Napffließpressen hergestellt wird, **Bild 3 a)** und b).

Diese Umformung führt zu hohen Umformgraden und damit zu einer ausgeprägten Kaltverfestigung, welche das verbleibende Umformvermögen soweit reduziert kann, dass es beim Crimpen zur Rissbildung kommt. Zudem treten beim Umformen größere Toleranzen und Geometrieabweichungen auf als bei der Dreh bearbeitung. [7]

Querbohrung

Die Querbohrung ist eine Durchgangsbohrung durch die Hülsenwand. Sie ermöglicht beim Tauchbad-Beschichtungsprozess das Abfließen überschüssigen Elektrolyts, um fehlerhafte Beschichtungen zu vermeiden. In der Drehbearbeitung wird die Querbohrung nachträglich gebohrt. Im Kaltfließpressen stellt ihre Herstellung jedoch eine besondere Herausforderung dar, da sie quer zur Hauptflussrichtung liegt und einen zusätzlichen Um formschritt erfordert. Ein mögliches Werkzeugkonzept hierfür sind keilförmig bewegte Backenmatrizen, welche die axiale Stempelbewegung in eine radiale Werkzeugbewegung umwandeln. Dies ermöglicht das Einbringen der Bohrung, erfordert jedoch komplexe Werkzeugtechnik und hohe Prozesssicherheit. [7]

Arretierung und Einstich

Die Arretierung ist ein radialer Absatz auf dem Schaft mit größerem, der Einstich mit kleinerem Durchmesser. Beide dienen der Fixierung der Steckverbinder in Kunststoffgehäusen und gewährleisten deren mechanische Stabilität [9]. In der Drehbearbeitung werden Arretierung und Einstich durch die Kombination von Außenlängs- und Einstichdrehen erzeugt. Im Kaltfließpressen kann der Werkstoff pro Umformschritt nur einmalig verjüngt oder aufgeweitet werden. Die Arretierung wird daher über einen zweistufigen Vorwärts-Fließpressprozess hergestellt. Der Einstich erfolgt zunächst durch Reduzieren des Durchmessers und anschließendem Aufstauchen gegen die Fließrichtung. Dieser zweite Schritt erfordert eine präzise Prozessführung, um Faltenbildung und Geometrieabweichungen zu vermeiden. [10]

Pin

Der Pin bildet den vorderen Teil von Stecker und Buchse. Im Stecker dient er dem Einschieben in die Buchse und der elektrischen Kontaktierung, während die Buchse die entsprechende Auf nahme darstellt. Somit entsteht eine kraftschlüssige Verbindung mit mechanischer Stabilität und elektrischer Leitfähigkeit [8]. In der Drehbearbeitung wird der Pin durch Außenlängsdrehen des Außendurchmessers hergestellt. Im Kaltfließpressen erfolgt die Ausbildung des Pins üblicherweise durch Vollvorwärts-Fließpres-

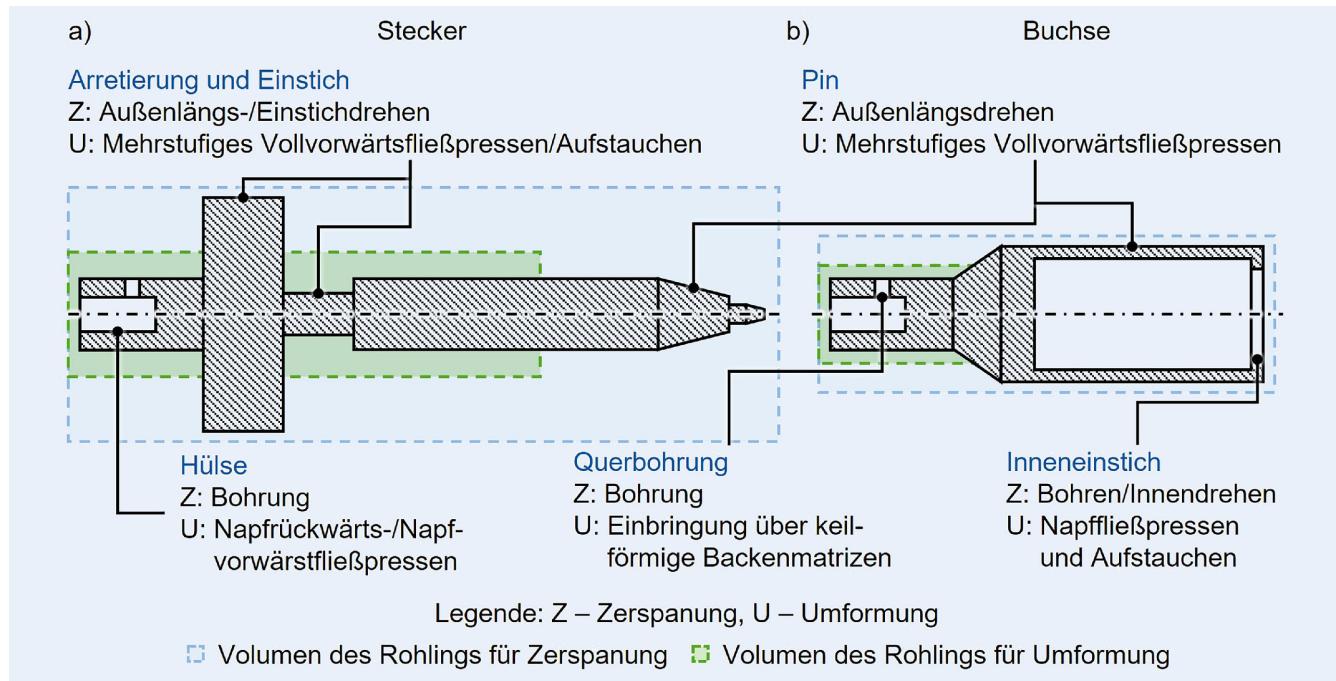


Bild 3 Schematische Darstellung und mögliche zerspanende oder umformende Fertigung von Geometrieelementen für a) Stecker und b) Buchsen.
Grafik: MTI

sen, wobei der Werkstoff durch die Matrize in die gewünschte Pin-Geometrie gedrückt wird. Dabei ist eine präzise Auslegung von Stempel und Matrize erforderlich, um Formgenauigkeit, Oberflächenqualität und Rundheit des Pins sicherzustellen. [7]

Inneneinstich

Der Inneneinstich ist ein spezifisches Geometriefeature der Buchse. Der Inneneinstich ist eine umlaufende Kante innerhalb des hohlen Pins und dient zur Fixierung eines Federblechs, das die elektrische Kontaktierung mit dem Stecker verbessert und ein Herausrutschen verhindert [11]. In der Drehbearbeitung wird der Inneneinstich durch eine Bohrung und anschließendes Innen-drehen hergestellt. Im Kaltfließpressen erfolgt die Realisierung-typischerweise zweistufig: Zunächst wird durch Napfpressen ein Hohlraum geschaffen, anschließend wird der Inneneinstich durch Aufstauchen des Werkstoffs entgegen der ursprünglichen Fließrichtung ausgebildet. Da die Innenwand dabei nicht durch einen Dorn abgestützt wird, ist die Aufstauchung begrenzt, was die Fixierung des Federblechs möglicherweise beeinträchtigt. [7]

Die umformtechnische Herstellung der beschriebenen Rundsteckverbinder ist grundsätzlich möglich. Die Umstellung von zerspanender Fertigung auf Kaltfließpressen erfordert jedoch eine umfassende Neubewertung der Fertigungsroute und der genannten Geometrieelemente. Dabei ist es nötig, bestehende Geometrieelemente auf ihre Umformbarkeit durch weiterführende experimentelle sowie simulative Untersuchungen zu prüfen und gegebenenfalls an die Anforderungen des Kaltfließpressen anzupassen.

4 Crimpbarkeit von fließgepressten und zerspanten Crimpkontakten

Die Crimpbarkeit ist eine zentrale Einsatz Eigenschaft von Rundsteckverbinder. Die Crimpbarkeit beschreibt „die Fähigkeit eines Systems aus Litze und Crimphülse, unter korrekten Pro-

zessrandbedingungen eine dauerhafte, gasdichte und feste Verbindung einzugehen. Die Zielgrößen einer Crimpverbindung sind Vermeidung von Rissbildung, geringer elektrischer Durchgangswiderstand, vollständige Verpressung und geringer Relaxation“ [4]. Im Folgenden wird die Crimpbarkeit zerspanter und fließgepresster Rundsteckverbinder gegenübergestellt. Hierzu werden zwei repräsentative Geometrien betrachtet, die im Crimpbereich jeweils eine geschlossene Hülse aufweisen. Für die erste Geometrie wird ein Leiterquerschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$ mittels Vierdorn-crimping verpresst, Bild 4a). In der zweiten Geometrie wird ein größerer Leiterquerschnitt von 16 mm^2 mittels Sechskantcrimpung verpresst, Bild 4b).

Unabhängig von der gewählten Fertigungsroute treten in der Herstellung spezifische Herausforderungen bei der Crimpbarkeit auf. Zerspante Kontakte erfordern einerseits eine gute Zerspanbarkeit mit sprödem Spanbruchverhalten, andererseits auch eine ausreichende Umformbarkeit für den Crimp-Prozess. Um diesen Zielkonflikt zu beherrschen, werden angepasste Messinglegierungen eingesetzt. Die Bearbeitung dieser Legierungen wird durch die Umstellung auf bleifreie Werkstoffe infolge der „Reach“-Verordnung zusätzlich erschwert. Fließgepresste Rundsteckverbinder können dagegen über aus gut umformbaren Legierungen gefertigt werden, weisen jedoch aufgrund der beim Kaltfließpressen induzierten Kaltverfestigung ein im Vergleich zu zerspannten Kontakten reduziertes Restumformvermögen für den anschließenden Crimp-Prozess auf. Dies begünstigt die Bildung von Rissen. Ein Zwischenglühen könnte die Umformbarkeit gezielt erhöhen, steht jedoch im Hinblick auf Kosten und den ökologischen Vorteil der werkstoffeffizienten Prozesskette im Widerspruch zum Ziel der Energieeinsparung. Beide Fertigungsverfahren zeigen somit spezifische Nachteile für den Crimp-Prozess.

Im Folgenden wird anhand eines numerischen Modells mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) eine Einschätzung der Werkstoffbeanspruchung sowie des Einflusses des Fließpressens auf die

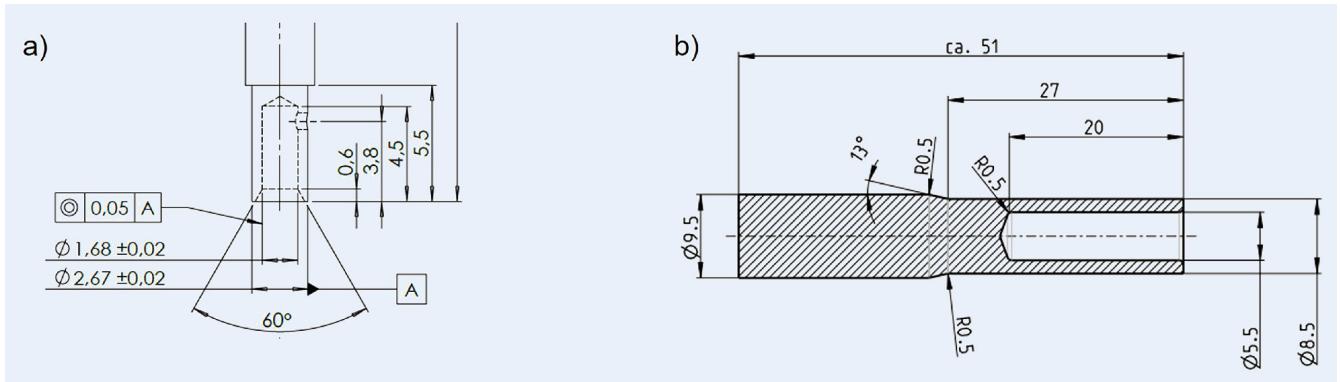


Bild 4 Untersuchte beispielhafte Rundsteckverbinder mit Leiterquerschnitt von a) 0,5 mm² und b) 16 mm². Grafik: MTI

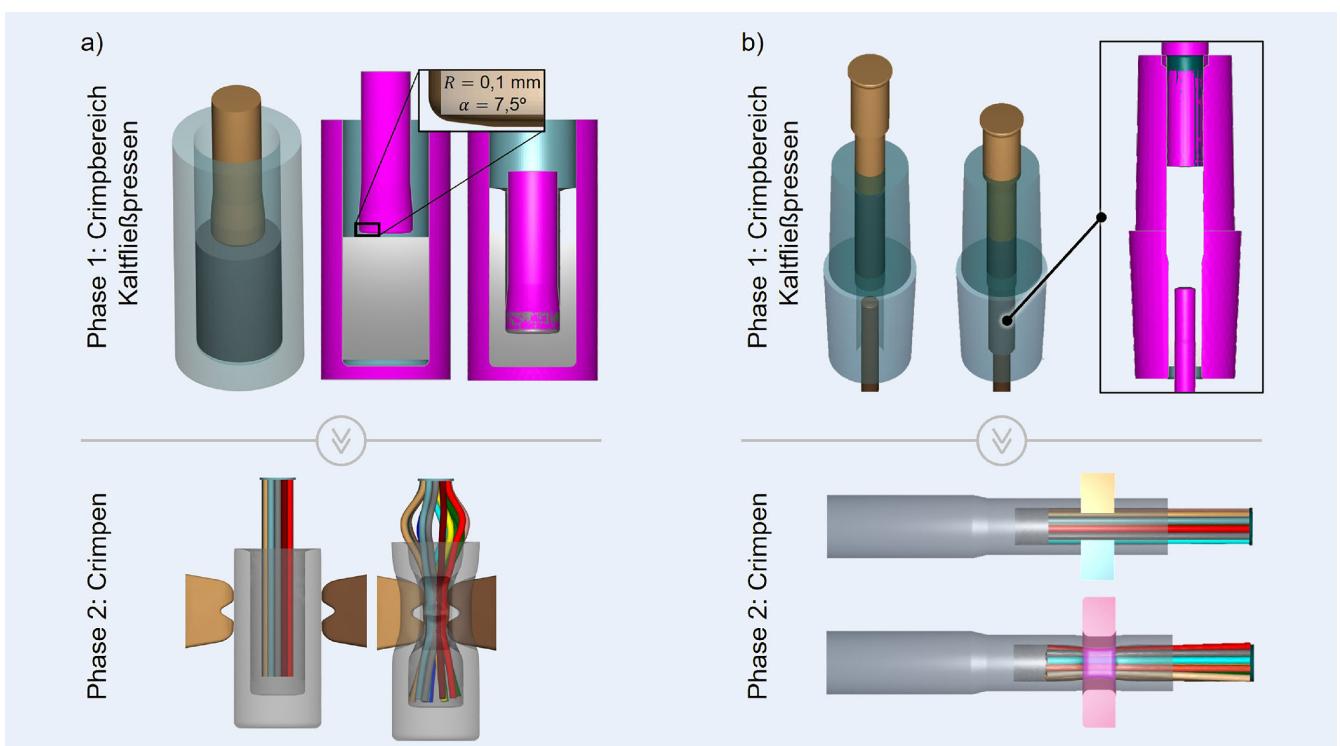


Bild 5 Modellaufbau der Prozessketten Fließpressen für a) Vierdorncrimpung und b) Sechskantcrimpung. Grafik: MTI

Crimpbarkeit vorgenommen. Hierbei wird der Spannungszustand während der Vierdorn- und Sechskantcrimpung sowohl für zerspannte als auch für kaltfließgepresste Rundsteckverbinder analysiert. Die FE-Simulation ermöglicht eine Bewertung der Umformmechanismen und Identifizierung risikobehafteter Bereiche für Rissbildungen. Auf dieser Basis können Prozessketten zukünftig gezielt ausgelegt werden, um sowohl für zerspannte als auch für fließgepresste Rundsteckverbinder ein robustes und effizientes Crimpens sicherzustellen.

4.1 Methoden

In der FE-Simulation wurden zwei unterschiedliche Prozessrouten betrachtet, um die formgebenden Schritte bei der Herstellung von Rundsteckverbindern (Vierdorncrimpung in Bild 5 a) und Sechskantcrimpung in Bild 5 b)) realitätsnah abzubilden.

In der ersten Route wurde eine verkettete Simulation durchgeführt, bei der zunächst das Napfrückwärtsfließpressen simuliert

wurde, um einen entsprechenden Spannungs-Dehnungszustand in der Crimpföhre zu erzeugen. Im zweiten Simulationsschritt wurde der Crimpvorgang durchgeführt.

In der zweiten Route erfolgte die Crimpsimulation basierend auf einer CAD-generierten Crimpföhre, welche die Geometrie eines zerspanend hergestellten Rundsteckverbinder repräsentiert. Diese CAD-Geometrie weist im Gegensatz zur fließgepressten Geometrie keine plastischen Spannungen und Dehnungen auf. Diese Vereinfachung wird genutzt, da die durch die Zerspanung eingebrachte Kaltverfestigung, die vor allem in den Randbereichen des Bauteils auftritt, im Vergleich zu der in der Umformung in das gesamte Bauteil induzierten Kaltverfestigung vernachlässigbar ist. Beide Ansätze erlauben einen direkten Vergleich zwischen umformtechnisch und zerspanend gefertigten Varianten hinsichtlich Crimpbarkeit. Das beschriebene Vorgehen wurde sowohl für den Rundsteckverbinder mit Vierdorncrimpung als auch für jenen mit Sechskantcrimpung angewendet.

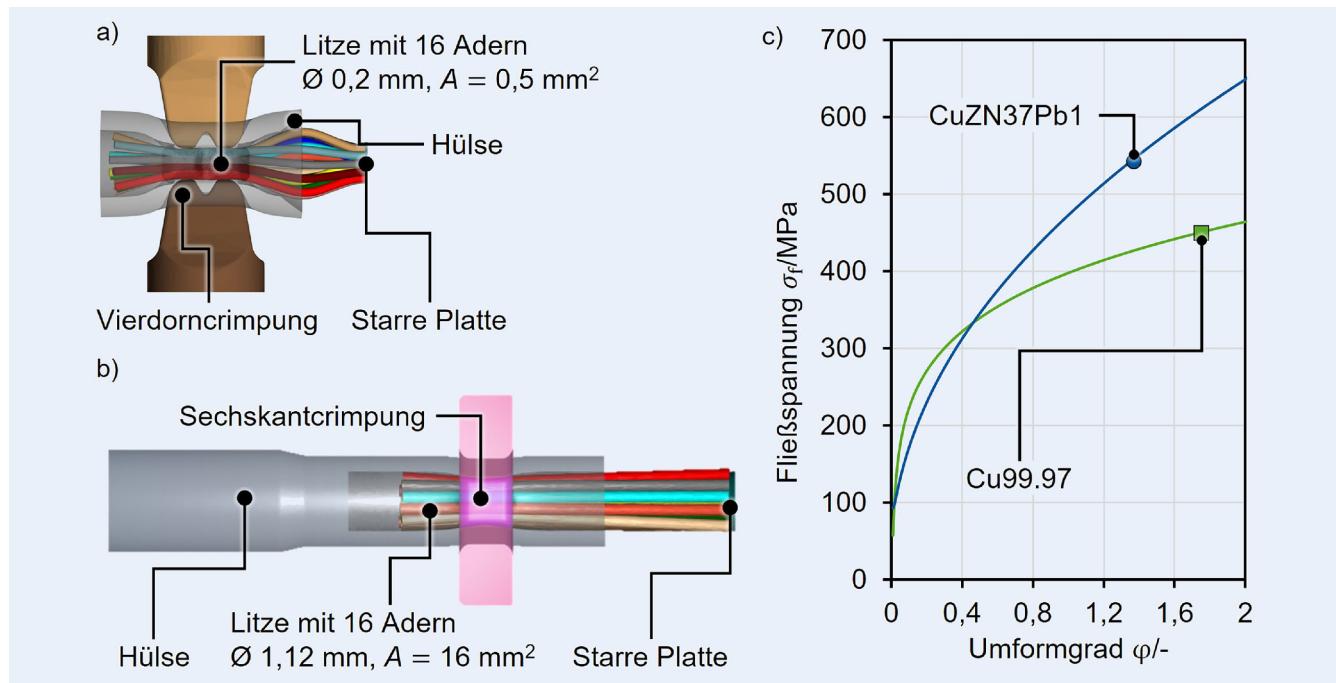


Bild 6 Modellierung des Crimpprozesses für a) Vierdorncrimpung und b) Sechskantcrimpung und c) Hensel-Spittel-Fließkurven für Messing (CuZN37Pb1) und Kupfer (Cu99,97). Grafik: a) + b) MIT, c) [12]

Für die Berechnungen kam die Finite-Elemente-Software „Forge NxT 4.0“ zum Einsatz. Als Hülsenwerkstoff für den Rundsteckverbinder mit Vierdorncrimpung wurde Messing CuZn37Pb1 im Zustand R480 verwendet, während die Litze aus Kupfer (Cu99,97) im Zustand R360 bestand, **Bild 6 a).**

Im Gegensatz dazu kamen beim Rundsteckverbinder mit Sechskantcrimpung sowohl für die Hülse als auch für die Litze Kupfer (Cu99,97) zum Einsatz, **Bild 6 b).** Das elastisch-plastische Werkstoffverhalten wurde für beide Rundsteckverbinder anhand von Hensel-Spittel-Fließkurven modelliert, **Bild 6 c)** [12]. Die Litzen bestanden bei der Vierdorncrimpung aus 16 Einzeldrähten mit einem Durchmesser von 0,2 mm und bei der Sechskantcrimpung aus 16 Einzeldrähten mit einem Durchmesser von 1,12 mm. Dies entspricht einer Gesamtquerschnittsfläche von 0,5 mm² beziehungsweise 16 mm².

Für die Simulation des Crimpprozesses wurden die Litzen jeweils mit einer starren Platte verbunden. Dadurch werden die Litzen relativ zueinander fixiert und die Isolierung abgebildet. Die Crimpesenke wurden ebenfalls als starre Körper modelliert. Im ersten Schritt der verketteten Simulationen wurden zunächst die Kaltfließpressprozesse mit einer Stempelgeschwindigkeit von 10 mm/s simuliert. Für die Modellierung der Reibung wurde das Coulomb-limited-Tresca-Modell mit einer Reibzahl μ von $\mu = 0,15$ und einem Reibfaktor m von $m = 0,1$ genutzt. Die Auswahl der Werte für die Reibzahl und den Reibfaktor erfolgte auf Basis vorangegangener Untersuchungen im Rahmen der Massivumformung. Im Anschluss an das Kaltfließpressen erfolgte in einer zweiten Simulationsstufe die Abbildung des Crimpprozesses. Für die Vierdorncrimpung wurde der Crimpvorgang mit einem Stempelweg von jeweils 0,92 mm durchgeführt. Daraus ergab sich eine resultierende Crimphöhe von 0,86 mm. Die Sechskantcrimpung wurde gemäß Vorgaben der DIN EN 48083-4 für einen Leiterquerschnitt von 16 mm² ab-

gebildet [13]. Die Crimpgeschwindigkeit betrug in beiden Fällen 10 mm/s und liegt damit im Bereich von Handcrimpungen.

4.2 Auswertung

Die Methodik zur spannungsbasierten Analyse wurde bereits in einer vorangegangenen Arbeit vorgestellt und wird hier exemplarisch anhand der Vierdorncrimpung angewendet [14]. **Bild 7 a** und **Bild 7 b** zeigen die entsprechende FE-Simulation, während **Bild 7 c** einen metallographischen Querschliff eines Crimpversuchs einer zerspanend hergestellten Hülse darstellt.

Die Auswertung der Simulation erfolgte zum Zeitpunkt der vollständigen Verpressung. Im Schliffbild sind innerhalb der Verpressung mehrere kritische Umformbereiche in Form von Brüchen erkennbar. Die Simulationsergebnisse wurden den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt und zur Analyse der vorherrschenden Umformmechanismen, Bewertung der Verpressung und zur Erklärung der im Schliffbild sichtbaren kritischen Umformbereiche genutzt. Zur Beurteilung der Umformmechanismen wurden sowohl der Spannungszustand als auch der Umformgrad analysiert. Die Komponenten des Spannungstensors wurden dabei in Spannungstriaxialität und von Mises-Vergleichsspannung umgerechnet. Die Spannungstriaxialität beschreibt den hydrostatischen Anteil des Spannungszustands, um Zug- und Druckumformung zu unterscheiden, während die von Mises-Vergleichsspannung als Maß für die mechanische Spannungsbelastung sowie als Fließkriterium zur Bewertung des plastischen Verhaltens dient [15].

Positive Werte der Spannungstriaxialität deuten auf Zugspannungen hin, während negative Werte Druckspannungen repräsentieren. Der Umformgrad wurde herangezogen, um Bereiche mit hoher Kaltverfestigung zu identifizieren. Ein Werkstoffversagen tritt typischerweise in Zonen auf, die einer hohen Umformung unterzogen wurden, unter Zugspannungen stehen und gleich-

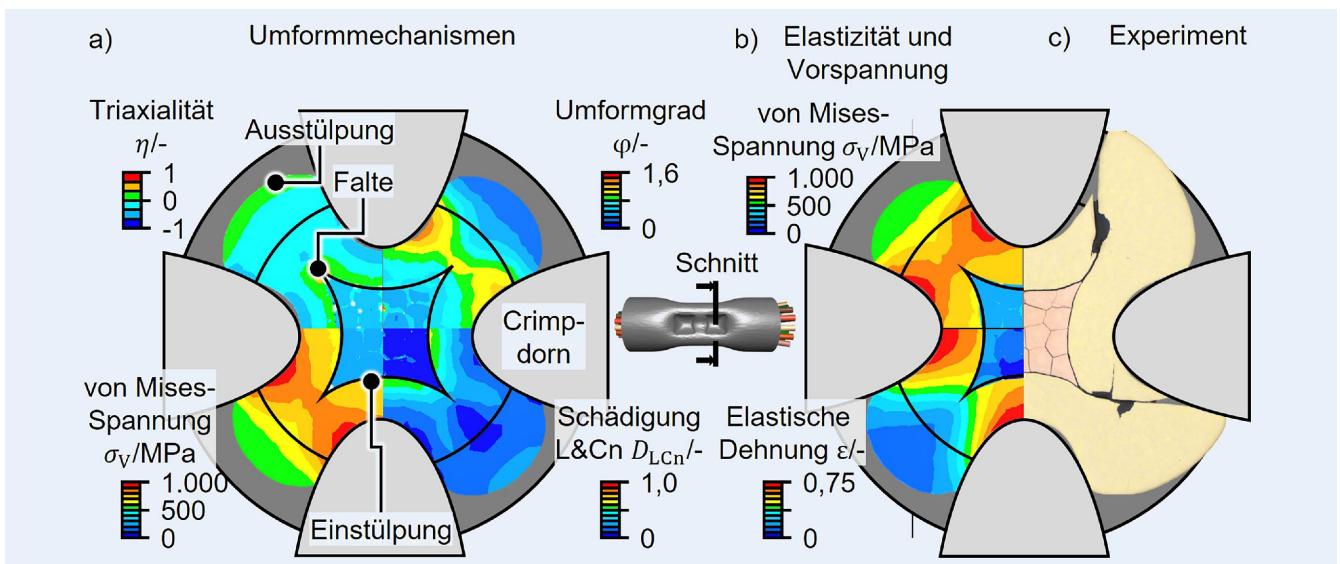


Bild 7 Auswertemethodik für die spannungsbasierete Bewertung der Crimpung und Umformmechanismen: a) Umformmechanismen, b) Elastizität und Vorspannung, c) Experiment. Grafik: MTI

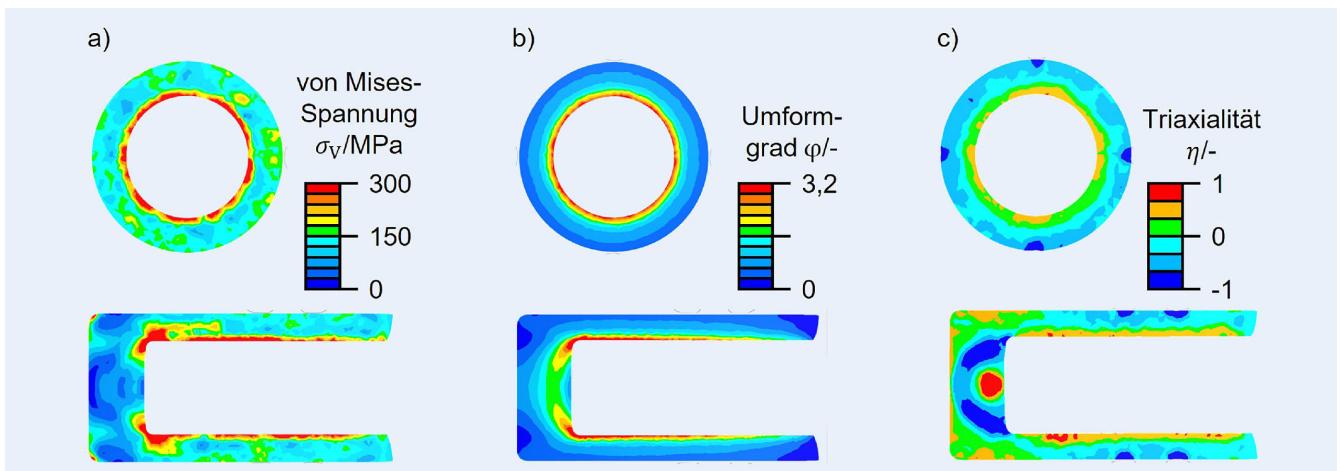


Bild 8 Spannungszustand im napfrückwärts-fließgepressten Crimpbereich des Rundsteckverbinder mit Vierdorncrimpung vor dem Crimpen: a) von Mises-Vergleichsspannung, b) Umformgrad, c) Triaxialität. Grafik: MTI

zeitig hohe Vergleichsspannungen aufweisen. Die Verpressung zwischen Crimphülse und Litze wurde anhand der von Mises-Vergleichsspannung und der elastischen Dehnung bewertet. Dabei korreliert die von Mises-Vergleichsspannung mit der Kontaktnormalspannung an der Grenzfläche zwischen den Kontaktpartnern. Die elastische Dehnung beschreibt, wie stark die Hülse nach dem Öffnen des Crimpwerkzeugs zurückfedert. Eine hohe elastische Dehnung führt somit zu einer starken Reduktion der Klemmkraft zwischen Hülse und Litze, sobald der Crimpvorgang beendet ist und das Crimpwerkzeug geöffnet wird.

Die hohen Werte der elastischen Dehnung entstehen aus der starken plastischen Umformung und der damit verbundenen Kaltverfestigung der Hülse im Crimpvorgang. Außerdem wurde die im Prozess induzierte Schädigung des Werkstoffs mittels des normalized Latham-Cockcroft-Schädigungskriteriums modelliert. Das normalized Latham–Cockcroft-Schädigungskriterium dient dabei dem qualitativen Vergleich zwischen den zerspanend und den umformend hergestellten Crimphülsen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde daher keine experimentelle Parametrisierung

des Schädigungskriteriums durchgeführt. Ein hoher Wert der Schädigungsvariable deutet auf einen hoch belasteten und somit versagensanfälligen Bereich im Werkstoff hin.

Bei der Gegenüberstellung der simulativen und experimentellen Ergebnisse fällt jedoch auf, dass die Brüche in der Crimpverbindung nicht an den Stellen der höchsten Schädigung auftreten. Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass ein einzelner metallografischer Querschliff nur eine lokale Bewertung der Crimpverbindung erlaubt. Weitere Querschliffe könnten Risse in Bereichen mit hohen Schädigungswerten zeigen. Zudem könnten andere Schädigungskriterien geeigneter sein, um die im Experiment auftretenden Bruchstellen vorherzusagen. In der Zukunft werden daher weitere Schädigungskriterien überprüft und deren Fähigkeit zur Rissprädiaktion evaluiert. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse besitzt das verwendete Schädigungskriterium zunächst nur begrenzte Aussagekraft, was in den nachfolgend aufgeführten Ergebnissen zu berücksichtigen ist.

Nach dem Fließpressprozess liegt im Crimpbereich ein definierter Spannungs-Dehnungszustand vor, der den anschließenden

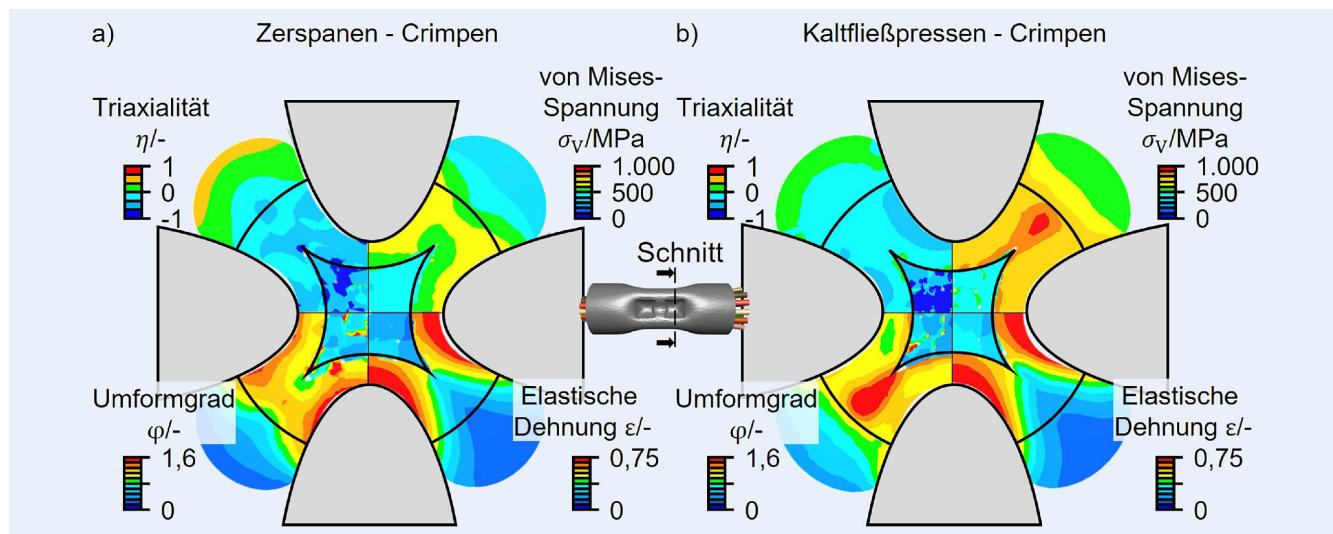


Bild 9 Vergleich des Spannungszustands in Crimpbereich von a) zerspantem Rundsteckverbinder und b) kaltfließgepresstem Rundsteckverbinder mit Vierdorncrimpung. *Grafik: MTI*

Crimpprozess maßgeblich beeinflusst. Die Simulationsergebnisse nach dem Napfrückwärtsfließpressen zeigen in **Bild 8** die Verteilung der von Mises-Vergleichsspannung, Bild 8 a), des Umformgrads, Bild 8 b), sowie der Spannungstriaxialität, Bild 8 c), für die Vierdorncrimpung.

Die Vierdorncrimpung wird im Folgenden exemplarisch betrachtet, da aufgrund der ähnlichen Napfgeometrie vergleichbare Ergebnisse auch für den Rundsteckverbinder mit Sechskantcrimpung erwartet werden. In der zerspanenden Fertigungsroute treten nach der Bearbeitung weder Spannungen noch plastische Dehnungen auf. Im Gegensatz dazu führt die Tribologie zwischen Fließpressstempel und Werkstück beim Kaltfließpressen im Bereich des Napfbodens zu hohen mechanischen Belastungen und Umformung. Dabei fließt der Werkstoff um den Stempelradius in die Napfwand. Der Reibschub an der Napfinnenwand induziert eine erhöhte Kaltverfestigung, was sich sowohl in der von Mises-Vergleichsspannung als auch im Umformgrad ausdrückt. Die Triaxialität weist an der Napfinnenwand auf vorherrschende Zug-eigenspannungen hin. Insgesamt ist vor allem die Randzone der Napfinnenwand sowie der Übergang zum Napfboden umformtechnisch stark beansprucht, während die Napfaußewand nur geringe Beanspruchungen aufweist.

Die Simulationsergebnisse am Ende des Crimpprozesses sind für die zerspanende Fertigungsroute in **Bild 9 a)** sowie für die umformtechnische Fertigungsroute in **Bild 9 b)** gegenübergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass in der fließgepressten Fertigungsroute im Bereich der Falte ein deutlich höherer Umformgrad als bei der zerspannten Variante auftritt, da hier bereits durch das vorgelagerte Napfrückwärtsfließpressen eine starke Kaltverfestigung induziert wurde.

Ebenso tritt die höchste von Mises-Vergleichsspannung im fließgepressten Crimpbereich in der Falte auf. Aufgrund der bei dem kaltfließgepressten Crimpbereich in der Falte vorliegenden hohen Umformgraden und von Mises-Vergleichsspannungen ist von einer Rissbildung im Faltengrund auszugehen. Bei zerspanend hergestellten Crimpköpfen ist eine Rissbildung vornehmlich im Flankenbereich der Crimpdornen wahrscheinlich, da hier durch den Tribokontakt zwischen Crimpköpfen und Dorn während der Verpressung eine starke Kaltverfestigung entsteht. Darüber

hinaus stellt der Faltengrund für die zerspannte Variante die zweite hoch beanspruchte Stelle dar, da hier analog zur kaltfließgepressten Variante eine Biegung über einen scharfkantigen Biegeradius erfolgt.

Analog dazu zeigt **Bild 10** den Vergleich für den Rundsteckverbinder mit Sechskantcrimpung zwischen der zerspanenden, Bild 10 a), und der umformtechnischen Fertigungsroute, Bild 10 b). Trotz der abweichenden Crimpgeometrie und des größeren Leiterquerschnitts werden bei der Sechskantcrimpung ähnliche Effekte wie bei der Vierdorncrimpung sichtbar.

Bei der fließgepressten Variante treten hohe Umformgrade auf, die von der Crimpaußenseite in Richtung des Kontaktbereichs zur Litze zunehmen. Insgesamt ergeben sich höhere Umformgrade als bei der zerspanenden Fertigungsroute. Dies ist auf die im Kaltfließpressen auftretende hohe plastische Umformung der Hülse zurückzuführen. Zudem zeigen sich auch höhere von Mises-Vergleichsspannungen im fließgepressten Rundsteckverbinder. Die vorgelagerte Umformung führt zu einer deutlichen Kaltverfestigung, wodurch das verbleibende Restumformvermögen reduziert wird, während gleichzeitig die Festigkeit des Werkstoffs ansteigt. Diese gegenläufigen Effekte müssen bei einer möglichen Umstellung von zerspanend hergestellten auf kaltfließgepresste Steckverbinder berücksichtigt werden. Auch weist der kaltfließgepresste Rundsteckverbinder höhere Schädigungswerte als die zerspannte Variante auf. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der Sechskantcrimpgeometrie im Vergleich zur Vierdorncrimpung vornehmlich Druckspannungen im Werkstoff auftreten, sodass höhere Umformgrade werkstoffseitig rissfrei realisiert werden können.

Außerdem sind die zuvor getroffenen Einschränkungen hinsichtlich der Aussagekraft des verwendeten Schädigungskriteriums zu beachten. Abschließend zeigt sich, dass sich in Bezug auf die elastische Dehnung kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Fertigungsroute ergibt. Es wird somit erwartet, dass das Rückfederungspotenzial und der damit einhergehende Klemmkraftverlust der Crimpverbindung nach Öffnen der Crimpesenke für beide Fertigungsroute ähnlich ist.

Es ist anzumerken, dass bei einer Umstellung von zerspanen auf fließgepresste Steckverbinder die Einschränkung auf zerspan-

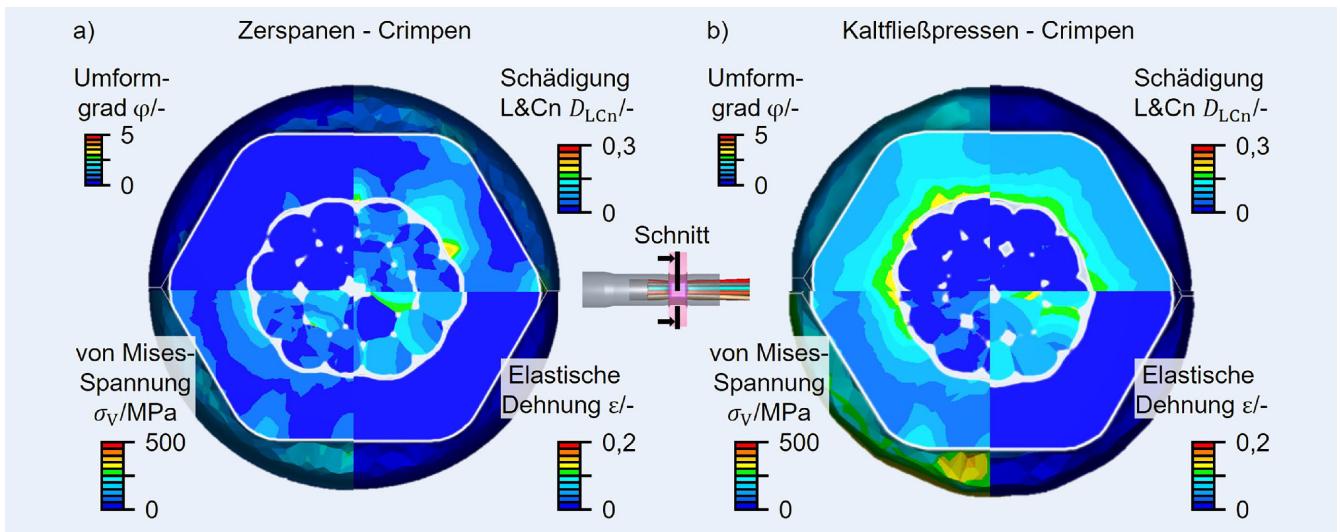


Bild 10 Vergleich des Spannungszustands in Crimpbereich von a) zerspantem Rundsteckverbinder und b) kaltfließgepresstem Rundsteckverbinder mit Sechskantcrimpung. *Grafik: MTI*

bare Messinglegierungen obsolet wird, sodass Werkstoffe mit einer hohen Duktilität eingesetzt werden können. Ein erhöhtes Umformvermögen kann dafür genutzt werden, die erhöhte Kaltverfestigung in der fließgepressten Fertigungsroute rissfrei zu handhaben. Gleichzeitig kann die Kaltverfestigung dafür genutzt werden, mechanisch widerstandsfähige Kontakte zu schaffen.

Eine weitere erforderliche Maßnahme bei der Entwicklung von fließgepressten Steckverbindern ist eine angepasste Tribologie und Optimierung der Stempelgeometrie beim Napfrückwärtsfließpressen des Crimpbereichs, um die Reibung zu reduzieren und den Werkstofffluss an der Kante vom Fließpressstempel zu verbessern. Durch die Reibungsreduzierung wird die Kaltverfestigung auf der Napfinnenwand verringert, sodass ein höheres Restumformvermögen zur Verfügung steht und die Risswahrscheinlichkeit verringert wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zukünftige Anforderungen an die Fertigung von Rundsteckverbindern schließen verstärkt Nachhaltigkeitsbetrachtungen ein. Bei der Zerspanung fällt ein hoher Anteil an Späneschrott an, was einen entsprechend großen CO₂-Fußabdruck verursacht. Kaltfließgepresste Steckverbinder hingegen nutzen den Werkstoff nahezu vollständig aus und weisen dadurch einen bis zu 70% geringeren CO₂-Fußabdruck auf. Um zerspannte Rundsteckverbinder durch kaltfließgepresste Varianten zu ersetzen, müssen jedoch Fertigungsstrategien entwickelt werden, die eine umformgerechte Gestaltung aller funktionalen Geometrieelemente wie Crimphülsen, Querbohrungen und Arretierungen berücksichtigen. Dabei sind Querbohrungen und Inneneinstiche besonders herausfordernde Geometrieelemente. Außerdem wird die Crimpbarkeit, als eine zentrale Funktionseigenschaft der Rundsteckverbinder, durch die beim Napfrückwärtsfließpressen induzierte Kaltverfestigung beeinflusst. Diese führt zu einer lokalen Vorverfestigung, die sich mit der Verfestigung aus dem Crimpprozess addiert und potenziell die Rissanfälligkeit erhöht. Die Ergebnisse zeigen aber, dass fließgepresste Rundsteckverbinder sowohl für unterschiedliche Größen als auch Crimpgeometrien vergleichbare Crimpergebnisse wie zerspanend gefertigte Varianten liefern können.

Für eine erfolgreiche Substitution zerspanter durch kaltfließgepresste Rundsteckverbinder sind verschiedene Maßnahmen erforderlich. Eine wesentliche Aufgabe besteht in der Verringerung der Kaltverfestigung beim Napfpressen, was durch eine angepasste Auslegung des Fließpressstempels sowie eine angepasste Tribologie zwischen Stempel und Hülse erreicht werden kann. Zudem müssen geeignete Werkstoffe für das Kaltfließpressen ausgewählt werden, die eine hohe Duktilität aufweisen und somit eine Alternative zu den bisher eingesetzten zerspanbaren Messinglegierungen darstellen. Zudem ist die fließpressgerechte Konstruktion der Steckverbinder zu betrachten, um die Umsetzbarkeit komplexer Geometrieelemente wie Crimphülsen, Querbohrungen und Arretierungen zu gewährleisten. Hierfür sind geeignete Fertigungsstrategien zu entwickeln, die eine prozesssichere Herstellung unterschiedlichster Geometriefeatures ermöglichen und gleichzeitig den Nachhaltigkeitsvorteil der Kaltmassivumformung voll ausschöpfen.

DANKSAGUNG

Die Autoren möchten den Mitgliedern des Innovationsnetzwerks Kupferbearbeitung (IKB) für die Unterstützung dieses Beitrags, die Bereitstellung von Materialien sowie den branchenübergreifenden Wissensaustausch in enger Zusammenarbeit danken. Das IKB verfolgt das Ziel, vorwettbewerbliche Lösungen für die Kupfer verarbeitende Industrie zu entwickeln und Grundlagen für die innovative Herstellung von Halbzeugen und Komponenten für verschiedene Anwendungen zu schaffen. Ein Teil der Arbeiten sind im Rahmen des SPP2476 „Prozessübergreifende Modellierung in der Produktionstechnik“ entstanden.

LITERATUR

- [1] Fortune Business Insights: Marktgröße, Anteil und Branchenanalyse für Steckverbinder nach Produkttyp, nach Endbenutzer und regionale Prognose, 2025–2032. Stand: 2025. Internet: www.fortunebusinessinsights.com/de/steckverbindermarkt-110061. Zugriff am 17.09.2025
- [2] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsche Fassung, Ausgabe Februar 2021
- [3] Sustainability Impact Metrics: Idemiat and EcoInvent, and eco-costs midpoint tables. Stand: 2025. Internet: www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/#av_section_2. Zugriff am 17.09.2025
- [4] Huijbregts, M. et al.: ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment (2017) 22, pp. 138–147
- [5] Phoenix Contact: Unsere Produkte. Produktdatenbank. Stand: 2025. Internet: www.phoenixcontact.com/de-de/produkte/. Zugriff am 17.09.2025
- [6] Blauth, M.: Parametrisierte Modelle zur konstruktiven Auslegung optimierter elektrischer Steckverbinderkontakte. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2017
- [7] Voigts, H. et al.: Nachhaltige Herstellung von Rundsteckverbindern: Potenziale der umformtechnischen Fertigung für ökologische und wirtschaftliche Vorteile. Vortrag Anwenderkongress Steckverbinder Würzburg/Deutschland, Mai 2025
- [8] DIN EN IEC 60352–2: Lötfreie Verbindungen – Teil 2: Crimpverbindungen – Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Deutsche Fassung, Ausgabe März 2023
- [9] Walter Schneider GmbH: Maßgeschneiderte Steckverbinder und Steckverbindungen aus Kupfer und Messing für Ihre individuelle Anforderungen. Stand: 2025. Internet: kupfer-umformen.de/loesungen/. Zugriff am 17.09.2025
- [10] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4 – Umformen. Heidelberg: Springer-Verlag 2017
- [11] Schlegel, S. et al.: Kontakt- und Langzeitverhalten stromführender Verbindungen in der Elektroenergietechnik. Heidelberg: Springer-Verlag 2022
- [12] Spittel, M. et al.: Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology – New Series. Berlin: Springer-Verlag 2016
- [13] DIN 48083–4: Einsätze in Pressen für Pressverbindungen – Teil 4: Maße der SechskantPressform. Deutsche Fassung, Ausgabe Dezember 2024
- [14] Voigts, H.; Herrig, T.; Bergs, T.: Ansatz zur Vorhersage der Crimpbarkeit für die Crimpauslegung von gedrehten Steckverbinder. Vortrag Symposium Connectors, Lemgo/Deutschland, März 2025
- [15] Bai, Y.; Wierzbicki, T.: A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. International Journal of Plasticity 24 (2008) 6, pp. 1071–1096

Max Meerkamp, M.Sc. 
m.meerkamp@mti.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA 

Dr.-Ing. Tim Herrig 

Martina Müller, M.Sc. 

Dr.-Ing. Herman Voigts 

Manufacturing Technology Institute – MTI
der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.mti.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Stefan Hoppe
stefan.hoppe@esw-net.de

Eichsfelder Schraubenwerk GmbH
Rengelröder Weg 13, 37308 Heilbad Heiligenstadt
www.esw-group.eu

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)