



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt



Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie e. V.  
in Kooperation mit  
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung  
Möhling GmbH & Co. KG  
müller engineering GmbH & Co. KG  
Grillo-Werke AG  
Metallpresswerk Hohenlimburg GmbH  
Carl Bechem GmbH

**Energieeinsparung durch die Anwendung von Zink-Knetlegierungen:  
Untersuchungen zur Massivumformung und Entwicklung eines  
technologischen Leitfadens zur Verarbeitung dieser Werkstoffe**

Abschlussbericht,  
gefördert unter dem AZ: 35420/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

	von
Abdulkerim Karaman M. Sc.	Labor für Massivumformung
Prof. Dr.-Ing. Michael Marré	Labor für Massivumformung

Iserlohn, 29. Juni 2022

# Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung.....	1
1	Einleitung.....	2
2	Durchgeführte Analysen und Untersuchungen.....	5
2.1	Potenzialanalyse.....	5
2.1.1	Aufstellung und Festlegung möglicher Anwendungsfelder an den NACE-Katalog 6	
2.1.2	Betrachtung zur Umweltbelastung von Zinkwerkstoffen .....	8
2.1.3	Identifikation und Auswahl von repräsentativen Umformteilen .....	8
2.1.4	Kriterienkatalog für die substituierte Umformteile .....	13
2.1.5	Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien .....	16
2.1.6	Ermittlung der Dehnungswöhlerlinien .....	16
2.2	Prozessanalyse .....	18
2.2.1	Ermittlung der Umformbarkeit.....	19
2.2.2	Ermittlung vom Stauchverhältnis .....	20
2.2.3	Ermittlung vom Zeitpunkt der Schubrisse.....	21
2.3	Erstellen eines Anwenderleitfadens .....	25
2.4	Abschätzung des Substitutionspotenzials.....	25
2.5	Darstellung des Energie-/CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzials.....	26
3	Verbreitung der Vorhabenergebnisse .....	29
4	Fazit.....	30
5	Literaturverzeichnis .....	31

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur .....	4
Abbildung 2: Vergleich von mechanischen Eigenschaften von ZEP1510, CuZn30Si3 und CuZn39Pb3.....	6
Abbildung 3: Vergleich von physikalischen Eigenschaften von ZEP1510, CuZn30Si3 und CuZn39Pb3.....	6
Abbildung 4: Einsatzmöglichkeiten von Zinkknetlegierungen .....	7
Abbildung 5: Prozessreihenfolge Musterbauteil (Bolzen) aus ZEP1510 .....	9
Abbildung 6: Ergebnis Vermessung nach dem Scheren .....	9
Abbildung 7: Ergebnis Vermessung nach dem Voll-Vorwärts-Fließpressen .....	10
Abbildung 8: Ergebnis Vermessung nach dem Stauchen .....	10
Abbildung 9: Ergebnis Vermessung nach dem Prägen.....	11
Abbildung 10: Nassläuferkopf aus CuZn39Pb3 (links) und aus ZEP1510 (rechts).....	12
Abbildung 11: Falschfarbenvergleich von digitalisiertem Nassläuferkopf aus CuZn39Pb3 und ZEP1510 .....	12
Abbildung 12: geschmiedetes Ventilkörperrohling mit Grat aus Zinkknetlegierung ZEP1510	12
Abbildung 13: Falschfarbenvergleich von digitalisiertem Ventilkörperrohling und die CAD Daten .....	13
Abbildung 14: geschmiedete Batterieklemme aus Zinkknetlegierung ZEP1510 .....	13
Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von ZEP1510 bei unterschiedlichen Temperaturen.....	16
Abbildung 16: Versuchsaufbau der LCF Versuche.....	17
Abbildung 17: Ermittlung von Zyklische-Spannungs-Dehnungs-Kurve .....	17
Abbildung 18: Berechnung der Dehnungswöhlerlinie .....	18
Abbildung 19: mittlere Dehnungswöhlerlinien von ZEP1510 .....	18
Abbildung 20: Umformbarkeit von ZEP1510 in Abhängigkeit der Rohteiltemperatur .....	19
Abbildung 21: Umformbarkeit von Feinzink, ZEP1510, AlSi1MgMn, CuZn39Pb3 in Abhängigkeit der Temperatur .....	20
Abbildung 22: Stauchergebnisse von ZEP1510 bei unterschiedlichen Stauchverhältnissen ...	21
Abbildung 23: schematische Darstellung der Risserkennung .....	22
Abbildung 24: Versuchsaufbau.....	23
Abbildung 25: Stauchvorgang von ZEP1510 mit IR-Kamera.....	24
Abbildung 26: Stauchvorgang von CuZn39Pb3 mit IR-Kamera .....	24
Abbildung 27: Stauchvorgang von AlSi1MgMn mit IR-Kamera.....	25
Abbildung 28: CO <sub>2</sub> Einsparpotenzial der Zinkknetlegierung ZEP1510 in der Prozesskette Kaltumformung am Beispiel des Halbzeuges für ein Bolzen.....	28
Abbildung 29: CO <sub>2</sub> Einsparpotenzial der Zinkknetlegierung ZEP1510 in der Prozesskette Warmumformung am Beispiel eines geschmiedeten Nassläuferkopfes .....	28

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorteile von Zinkknetlegierung ZEP1510 im Vergleich zu Messing CuZn39Pb3 .....	2
Tabelle 2: Anwendungsfelder von Messing und Produkte, die mit Messing hergestellt werden .....	7
Tabelle 3: Kriterienkatalog vom Bolzen aus ZEP1510 .....	14
Tabelle 4: Kriterienkatalog von Nassläuferkopf aus ZEP1510.....	14
Tabelle 5: Kriterienkatalog von Ventilkörperrohling aus ZEP1510 .....	14
Tabelle 6: Kriterienkatalog von Batterieklemme aus ZEP1510 .....	15
Tabelle 7: Eigenschaften von IR-Kamera .....	22
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Materialkosten von Messing (CuZn39Pb3) und Zinkknetlegierung (ZEP1510).....	26
Tabelle 9: kumulierter Energieverbrauch innerhalb einer Prozesskette von CuZn39Pb3 und ZEP1510 .....	27

## Begriffe, Abkürzungen Definitionen

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$\varphi$	Umformgrad	-
AP	Arbeitspaket	-
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	-
$d_0$	Ausgangsdurchmesser	mm
$F$	Kraft	kN
$h_0$	Ausgangshöhe	mm
IR-Kamera	Infrarot-Wärmebildkamera	-
NACE	Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft	-
RoHS	Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment	-
RT	Raumtemperatur	°C
$s$	Stauchverhältnis	-
ZEP	Zinc Extrusion Products	-

## 0 Zusammenfassung

Der Werkstoff Messing weist weitreichende Einsatzmöglichkeiten für unterschiedlichste Produktfamilien auf. Es werden beispielsweise Türbeschläge- und griffe, Produkte aus dem Elektrobereich, Installationstechnik aus dem Sanitärbereich und Hydraulik- bzw. Pneumatik-Komponenten aus diesem Werkstoff hergestellt. Für Deutschland und Norditalien, wo viele der o.g. Produkte produziert werden, wird die Verarbeitungsmenge auf ca. 500.000 – 600.000 Tonnen Messing pro Jahr geschätzt. Diese o.g. Produkte werden häufig mittels Massivumformung hergestellt und anschließend spanend nachbearbeitet. Durch den branchenübergreifenden Einsatz von stranggepressten Zinkknetlegierungen in der Umformtechnik als Substitution von handelsüblichen Messingwerkstoffen, ist ein hohes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential von bis zu 40 % möglich. Das Vorhaben beschäftigt sich mit der Substituierbarkeit von Messing durch Zinkknetlegierungen in der Massivumformung.

Kooperationspartner:

- Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie e. V.
- Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
- Möhling GmbH & Co. KG
- müller engineering GmbH & Co. KG
- Grillo-Werke AG
- Metallpresswerk Hohenlimburg GmbH
- Carl Bechem GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Aktenzeichen: 35420/01) gefördert, wofür an dieser Stelle im Namen aller Beteiligten gedankt sei.



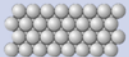
## 1 Einleitung

Die Einsatzbereiche von Zink und dessen Legierungen sind sehr zahlreich. Über 50 % des weltweit erzeugten Zinks werden zum Korrosionsschutz von Stahl eingesetzt. Der Einsatz für Zinkdruckguss oder als Legierungszusatz in Messing ist mit jeweils 17 % der zweithöchste Einsatzbereich von Zink. Daneben werden 6 % der weltweiten Zinkerzeugung für Halbzeuge für die Anwendung an Dächern, Fassaden und zur Dachentwässerung verwendet. Weitere 6 % finden Verwendung für Zinkverbindungen wie Zinkoxid oder auch Zinksulfat [SAB19].

In der Massivumformung findet Zink größtenteils als Legierungsbestandteil in Messingen Einsatz. Messing findet man heute besonders in den Anwendungsgebieten wie in der Sanitär-, Beschlag-, und Elektroindustrie, wo Bauteile wie Fittings, Ventile, Türbeschläge, Schlösser und Stecker hergestellt werden. Viele Messinge, besonders Automatenmessing CuZn39Pb3, sind durch den Bleigehalt - nachdem die europäischen Gesundheitsbehörden die Toxizität von Blei auch in sehr kleinen Mengen feststellte - kritisch zu betrachten. Im Zusammenhang der daraus resultierenden Umstellungen wurden bleifreie Zinkknetlegierungen in Stangenform als Ersatz für Messing entwickelt. Zinc Extrusion Products, kurz ZEP, sind neuartige Knetlegierungen auf Zinkbasis, die sich von anderen Legierungen durch ihre gute Verformbarkeit unterscheiden und den höchsten Ansprüchen an Werkstoffqualität und erreichbare Fertigungstoleranzen genügen.

Die Legierungselemente dieser Zinkknetlegierung wurden mit dem Ziel zusammengesetzt, dass eine umweltfreundliche und bleifreie Alternative für Messinglegierungen, insbesondere für Automatenmessing CuZn39Pb3 entsteht, ohne mechanische und physikalische Nachteile zu haben. Neben der Umweltfreundlichkeit bei der Herstellung und Weiterverarbeitung hat ZEP1510 (bestehend aus bis zu 15 % Sekundäraluminium, 1 % Kupfer und 0,1 % Magnesium) noch weitere Vorteile gegenüber CuZn39Pb3 (siehe Tabelle 1). Die 15 % höhere elektrische Leitfähigkeit bietet große Potenziale für mehrere Produkte im Bereich Elektromobilität, die heute mit Kupfer- und Kupferlegierungen hergestellt werden. Zusätzlich ermöglicht die 20 % höhere Streckgrenze bei gleichzeitig geringem Gewicht den Einsatz von ZEP1510 bei Leichtbauanwendungen. Energetisch und wirtschaftlich sinnvoll ist der Einsatz von Zinkknetlegierungen durch die Realisierung enormer Kostenvorteile und der CO<sub>2</sub>-Einsparung in der Prozesskette.

Tabelle 1: Vorteile von Zinkknetlegierung ZEP1510 im Vergleich zu Messing CuZn39Pb3

Branche	Eigenschaft		Zinkknetlegierung im Vergleich zu Messing
Automobilindustrie, Elektronikindustrie	Elektrische Leitfähigkeit		+15 %
Hydraulik, Installationstechnik etc.	Streckgrenze		+25%
Gesamter Messingmarkt	Dichte		-32%
Gesamter Messingmarkt	Materialkosten	€	-39%

Die Zielsetzung des Vorhabens ist es, einen technologischen und anwendungsspezifischen Leitfaden zur Verwendung einer Zinkknetlegierung als Umformwerkstoff zu erstellen. Dabei sollen technische und wissenschaftliche Lücken aufgezeigt werden. Die globale Zielsetzung lässt sich in folgende Teilziele untergliedern:

#### Teilziel 1: Identifikation eines Anwendungsszenarios

Es sollen Anwendungsfelder gefunden werden, deren Anforderungen durch die technischen Eigenschaften des Zinkumformteils erfüllt werden und deren Einsatz energetisch sowie wirtschaftlich sinnvoll erscheint. Vorrangig sollen Messingumformteile als Benchmark betrachtet werden. Zusätzlich werden weitere Anwendungsfelder mit einem hohen Energieeinsparpotenzial durch die Erzeugung und Verarbeitung des Werkstoffes betrachtet.

#### Teilziel 2: Grundlegende Untersuchungen zur Umformung von Zinkknetlegierungen

Zinklegierungen werden aktuell vorrangig durch Druckgussverfahren verarbeitet. Eine Verarbeitung durch Verfahren der Massivumformung, wie z. B. Schmieden, ist bisher nicht oder nur sehr unvollständig untersucht worden. Vorgehensweisen und Auslegungshinweise für die Gestaltung von umformtechnischen Fertigungsprozessen und Werkzeugen sind folglich nicht bekannt. Für eine sinnvolle Substitution marktüblicher Werkstoffe durch Zinkknetlegierungen und der damit einhergehenden Energieeinsparung müssen Prozessparameter, Prozessführung und Werkzeuggestaltung untersucht werden. Aus diesem Grund soll ein grundlegender Leitfaden zur Umformung von Zinkknetlegierungen entwickelt werden. Das resultierende Konzept kann in einem Folgeprojekt zur Anwendung kommen, bei dem konkret auf die Energieeinsparung bei der Verarbeitung eingegangen werden soll.

#### Teilziel 3: Abschätzung des Substitutionspotenzials

Aufbauend auf diesem Projekt sollen weitere Forschungsvorhaben zur konkreten Umsetzung und Substitution von energieintensiven Werkstoffen und deren Verarbeitung folgen. Damit bei nachfolgenden Projekten eine sinnvolle Eruierung des Energieeinsparpotenzials und der Marktdurchdringung erfolgen kann, soll hier zuerst eine Einschätzung zur Substitution auf Basis von erzielbaren Geometrien in den vorher ermittelten Anwendungsfeldern erfolgen.

Abbildung 1 zeigt das wissenschaftlich-technische Lösungskonzept zur Erreichung der Zielsetzung. Die Projektstruktur ist in sechs Arbeitspakete (AP) unterteilt, deren Ergebnisse zusammengefasst im Hauptteil des Abschlussberichts dokumentiert sind.

Im AP1 werden mögliche Anwendungsfelder für Umformteile aus Zinkknetlegierungen in Anlehnung an den NACE-Katalog der EU (Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft) aufgestellt. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern werden repräsentative Umformteile, die heute mit Kupferlegierungen hergestellt werden, ausgewählt und prototypisch mit der Zinkknetlegierung hergestellt.

In AP2 werden die umformtechnische Bearbeitung der ausgewählten Zinkknetlegierung untersucht und einige Prozessgrenzen bestimmt. Es werden werkstoffkundliche Prüfungen unterzogen, wie Zugversuch oder Low-Cycle-Fatigue (LCF)-Versuch. Die Umformbarkeit von ZEP wird mittels Stauchversuchen ermittelt und mit anderen Werkstoffen verglichen. Außerdem wird noch das Stauchverhältnis ermittelt und die Rissbildung während der Umformung analysiert. Diese werden ebenfalls mit anderen Werkstoffen verglichen.



Im Rahmen des AP3 wird im Kontext der erzielten Ergebnisse ein Leitfaden zur Umformung von Zinkknetlegierungen erstellt. Dieser Leitfaden soll speziell die Übertragbarkeit und die Umsetzung für andere Unternehmen ermöglichen.

Im AP4 wird eine Einschätzung des Substitutionspotenzials auf Basis der Marktdurchdringung gegeben werden und zur möglichen Substitution herkömmlicher Werkstoffe durchgeführt.

Anhand der ausgewählten Bauteile wird im AP5 das Energieeinsparpotenzial durch ein mögliches Umstellen auf Zinkknetlegierungen ermittelt.

Das AP6 erstreckt sich über die gesamte Vorhabenlaufzeit und beinhaltet die umfassende Dokumentation sowie Verbreitung der gewonnenen Forschungsergebnisse, so dass eine Verbreitung der Erkenntnisse in der industriellen Praxis gefördert wird.

### AP 1: Potenzialanalyse

- Aufstellung möglicher Anwendungsfelder für Umformteile aus Zinkknetlegierungen
- Betrachtung Umweltbelastung
- Identifikation und Auswahl von repräsentativen Umformteilen

### AP 2: Prozessanalyse

- Werkstoffkennwerte
- Umformbarkeit
- Ermittlung von Prozessgrenzen

### AP 3: Erstellung eines Leitfadens

- Leitfaden in Anlehnung auf die Ergebnisse

### AP 4: Abschätzung des Substitutionspotenzials

- Marktdurchdringung einschätzen

### AP 5: Darstellung des Energie-/CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzials

- Berechnung anhand ausgewählten Bauteile in AP 1

### AP 6: Dokumentation

- Dokumentation und Verbreitung der Projektergebnisse

Abbildung 1: Projektstruktur

## 2 Durchgeführte Analysen und Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus den AP vorgestellt und diskutiert. Der Hauptteil gliedert sich entsprechend den Schwerpunkten des Vorhabens in Potenzial-, Prozessanalyse und Darstellung des Energie-/CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzials.

### 2.1 Potenzialanalyse

Zinklegierungen werden vorrangig als Druckgussverfahren verarbeitet. Eine Verarbeitung durch Verfahren der Massivumformung, wie z.B. Schmieden, ist bisher nicht oder nur sehr unvollständig untersucht worden. Vorgehensweisen und Auslegungshinweise für die Gestaltung von umformtechnischen Fertigungsprozessen und Werkzeugen sind folglich nicht bekannt. Für eine sinnvolle Substitution marktüblicher Werkstoffe durch Zinkknetlegierungen und der damit einhergehenden Energieeinsparung müssen Prozessparameter, Prozessführung und Werkzeuggestaltung untersucht werden.

Zinkknetlegierungen mit Kupfer und Aluminium als Dreistofflegierung sind seit Anfang des 20. Jahrhunderts sehr gut am Markt eingeführt [ART37]. Aufgrund von höheren Kupferpreisen wird seit langem eine Alternative für das Bleihaltige Automatenmessing CuZn39Pb3 gesucht. Jedoch konnte dies bis heute besonders in den Anwendungsgebieten wie in der Sanitär-, Beschlag-, und Elektroindustrie, wo Bauteile wie Fittings, Ventile, Türbeschläge, Schlösser und Stecker erstellt werden, nicht erfolgen. Nachdem die europäischen Gesundheitsbehörden die Toxizität von Blei auch in sehr kleinen Mengen festgestellt haben, haben sie wiederholt die Notwendigkeit bekräftigt, die Konzentration dieses Stoffes in verschiedenen Bereichen so weit wie möglich zu reduzieren. In den letzten Jahren wurde die Verwendung von Blei in zahlreichen Produktionssektoren verboten bzw. stark eingeschränkt. Derzeit liegen noch diverse Ausnahmeregelungen zum Einsatz von Blei in z. B. Messing vor. Daher behalten viele Unternehmen ihre gewohnten Werkstoffe bei. In der RoHS (Restriction of [the use of certain] Hazardous Substances) stehen jedoch die Ausnahmeregelungen auf dem Prüfstand. Die Ausnahmen für Geräte der RoHS-Kategorien eins bis sieben und zehn werden in absehbarer Zukunft auslaufen. Dann dürfen in Europa keine Endgeräte mehr vertrieben werden, die Komponenten enthalten, die die Grenze von 0,1 % Blei überschreiten. Im Zusammenhang mit der daraus resultierenden Umstellung sind die bleifreien Zinkknetlegierungen aufgrund des geringeren Rohstoffpreises, der geringeren Verarbeitungstemperatur und des Potenzials zur Energieeinsparung im Vergleich zu Kupfer eine Alternative.

Die Legierungselemente von ZEP1510 wurden so zusammengefügt, dass eine umweltfreundliche und bleifreie Alternative für Messinglegierungen insbesondere für Automatenmessing CuZn39Pb3 entsteht, ohne mechanische und physikalische Nachteile zu haben. Die Abbildung 2 vergleicht die mechanischen und Abbildung 3 die physikalischen Eigenschaften von ZEP1510, bleihaltigem Automatenmessing CuZn39Pb3 und dem bleifreien Messing CuZn30Si3. Die Werte für CuZn39Pb3 wurden als Eins angenommen und normiert dargestellt. Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften bietet die Zinkknetlegierung ZEP1510 großes Energieeinsparpotenzial, wenn die Substitution von Produkten, die heute mit Messing hergestellt werden, erfolgen würde.

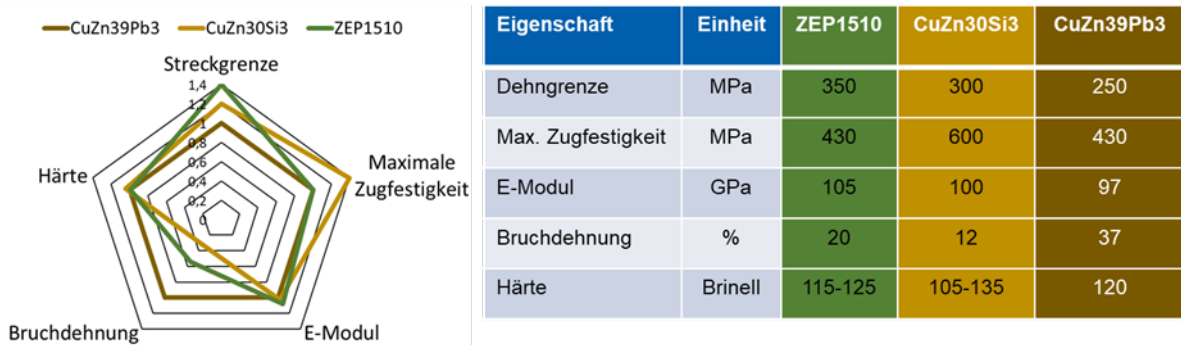


Abbildung 2: Vergleich von mechanischen Eigenschaften von ZEP1510, CuZn30Si3 und CuZn39Pb3

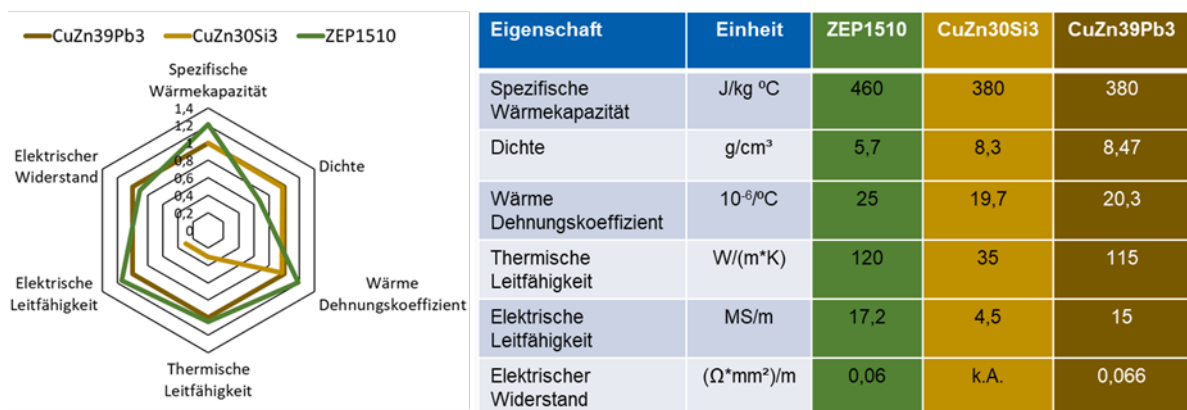


Abbildung 3: Vergleich von physikalischen Eigenschaften von ZEP1510, CuZn30Si3 und CuZn39Pb3

### 2.1.1 Aufstellung und Festlegung möglicher Anwendungsfelder

Um das Potenzial von Zinkumformteilen zu identifizieren, werden Anwendungsfelder gesucht, deren Anforderungen durch die Substitution erfüllt werden und deren Einsatz energetisch sowie wirtschaftlich sinnvoll erscheint. Hierbei werden Messingumformteile als Benchmark betrachtet. Bei der Identifikation von Anwendungsfeldern und Bauteilen, die eine Substitution ermöglichen, wurde folgenderweise vorgegangen:

1. Produkte aus Messing recherchiert
2. Aus den Produkten die Anwendungsfelder definiert
3. Produkte eingegrenzt, die mittels Umformtechnik hergestellt werden

Die Recherche hat ergeben, dass Umformteile aus den Anwendungsfeldern, die in Abbildung 4 dargestellt sind, Substitutionspotenzial bieten.

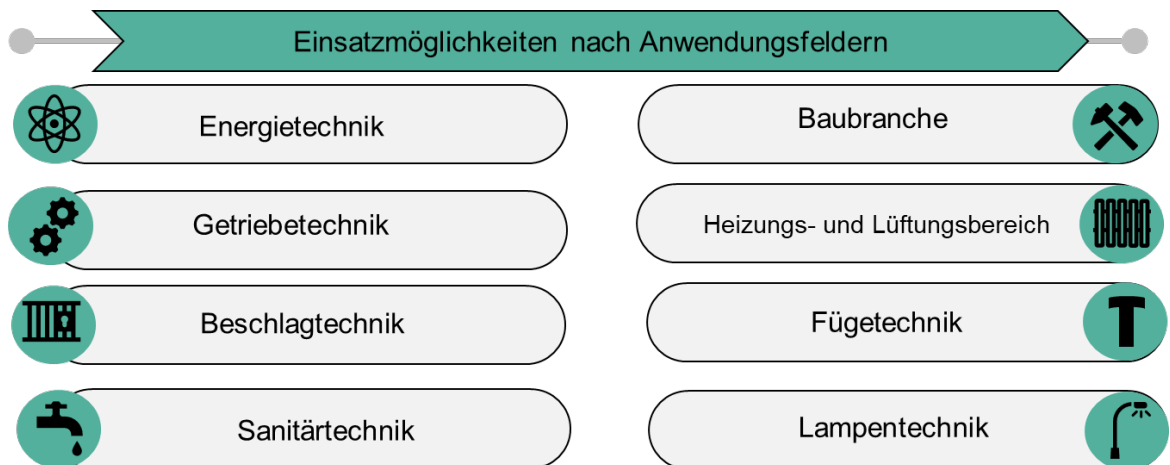


Abbildung 4: Einsatzmöglichkeiten von Zinknetlegierungen

Die Marktrecherche zu möglichen Anwendungsfeldern wurde auf Basis der spezifischen Werkstoffeigenschaften der Zinknetlegierungen durchgeführt. Es wurden diejenigen Anwendungsfelder identifiziert, die aus Sicht der Ressourceneffizienz am geeignetsten erscheinen. Zu den einzelnen Anwendungsfeldern wurden ferner konkrete Bauteile recherchiert und in Anlehnung an den NACE-Katalog [EUR08] aufgeteilt, bei denen eine Substitution des Messings hohe Energieeinsparpotentiale verspricht (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Anwendungsfelder von Produkten, die mit Messing hergestellt werden

Branche	Produkt	NACE WZ-Nummer
Energietechnik	Schmutzfänger	25.50
Energietechnik	Verteiler	25.50
Energietechnik	Ventile	28.12
Energietechnik	Batterieklemmen	25.50
Energietechnik	Stecker	25.50
Beschlagtechnik	Scharniere	16.23
Beschlagtechnik	Griffe	25.50
Sanitärtechnik	Kugelhähne	28.14
Sanitärtechnik	Anschlussstücke	25.50
Sanitärtechnik	Verteiler	25.50
Sanitärtechnik	Schlauchverbinder	25.50
Sanitärtechnik	Adapter	25.50
Sanitärtechnik	Rohre	25.50
Sanitärtechnik	T-Stücke	25.50
Sanitärtechnik	Kupplungen	25.50
Sanitärtechnik	Fittings	25.50
Baubranche	Grenzpunkte	25.94
Baubranche	Flansche	25.50
Lampentechnik	Lampenständer	27.40

Branche	Produkt	NACE WZ-Nummer
Getriebetechnik	Zahnräder	25.50
Getriebetechnik	Schaltgabeln	25.50
Fügetechnik	Hohlknoten	25.94
Fügetechnik	Messingdübel	25.94
Fügetechnik	Rundkopfstifte	25.93
Fügetechnik	Rahmstifte	25.93
Heizungs- und Lüftungsbereich	Fittings	25.50

### 2.1.2 Betrachtung zur Umweltbelastung durch Zinkwerkstoffe

Von allen Produkten aus der o.g. Tabelle kann nach dem Erreichen der Nutzungsdauer das Zink aufgrund seiner metallurgischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften ohne Verlust zurückgewonnen werden. Etwa 30 % des weltweit hergestellten Zinks stammen aus wiederverwertetem Zink bzw. Sekundärzink. Diese Recyclingquote hilft dabei, Energieverbrauch, Emissionen und Abfallaufkommen zu verringern. Neben Zinkschrott, der auf allen Produktions- und Anwendungsstufen recycelt wird, kann ebenso Altschrott in Form von verzinktem Stahl und Zinklegierungen wiedergewonnen werden. Dabei verliert Zink nicht seine physikalischen oder chemischen Eigenschaften [INT17]. ZEP-Halbzeuge sind auch vollständig recycelbar. Weiterhin bietet die Zinkknetlegierung ZEP1510 große Potenziale zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung im Vergleich zu anderen Werkstoffen, die heute verwendet werden, s.a. Kapitel 2.5.

### 2.1.3 Identifikation und Auswahl von repräsentativen Umformteilen

Für die Verifikation von möglichen Umformteilen, die mittels Fließpressens – also kalt – hergestellt werden könnten, wurde ein Demonstrationsbauteil entwickelt und mit dem Industriepartner Möhling GmbH & Co. KG prototypisch erprobt. Für die Herstellung des Bauteils werden drei Umformverfahren benötigt, diese sind:

- Voll-Vorwärts-Fließpressen mit einem Umformgrad von  $\varphi=0,42$ ,
- Kopfstauchen mit einem Stauchverhältnis von  $s=1,8$  und
- Prägen mit einer Tiefe von 2 mm.

Als Halbzeug werden Stangen mit einem Durchmesser von 9 mm verwendet, die auf eine Länge von 32,5 mm geschert werden. Nach dem Durchlaufen der Umformstufen werden die Bauteile gereinigt. Die Schmierstoffanwendung teilt sich in der Regel in zwei Schritte, nämlich in die Oberflächenvorbehandlung und den Einsatz von Schmierstoff. Eine Oberflächenvorbehandlung bei ZEP1510 ist bedingt durch die Legierung nicht notwendig. Für die Kaltumformung von ZEP1510 werden Umformöle empfohlen. Als Schmierstoff bei den erprobten Kaltumformprozessen wurde als Schmiermittel das Metallbearbeitungsöl *Beruform MF 155* von der Firma *Carl Bechem GmbH* verwendet.

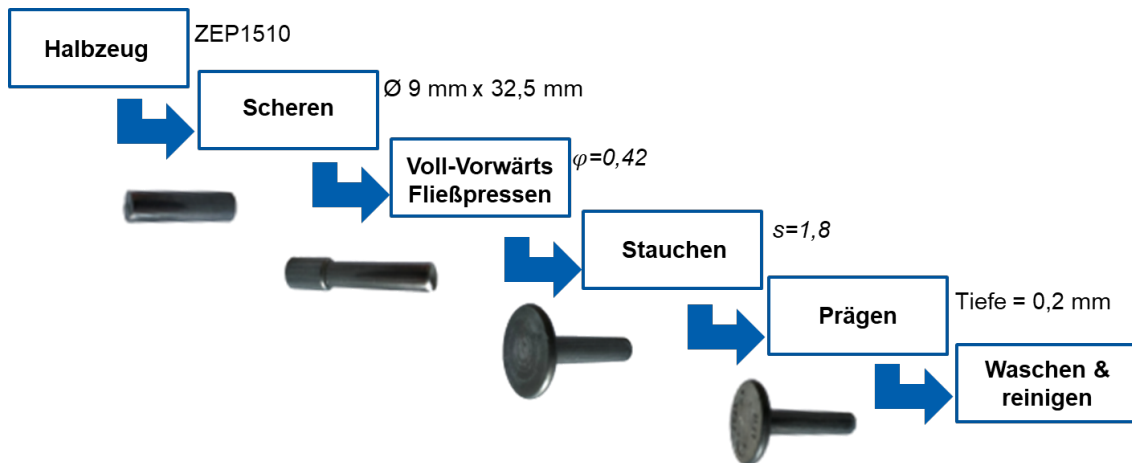


Abbildung 5: Prozessreihenfolge Musterbauteil (Bolzen) aus ZEP1510

Es wurden nach jeder Fertigungsstufe (Scheren, Voll-Vorwärts-Fließpressen, Stauchen und Prägen) jeweils 50 Bauteile vermessen, um die Geometrieabweichung ausgewählter Merkmale zu ermitteln.

Stufe 0: Scheren:

Maß	D in mm	L in mm
Max. Wert	9,00	32,32
Min. Wert	8,98	32,2
Standardabweichung	0,0054	0,024

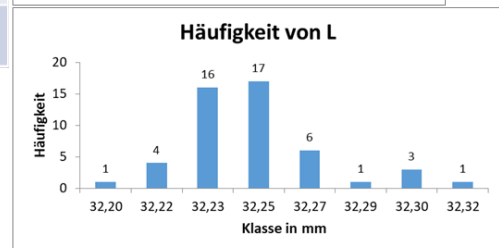
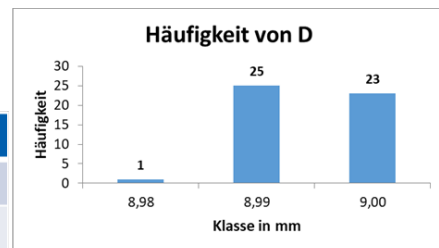
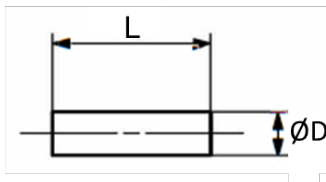


Abbildung 6: Ergebnis Vermessung nach dem Scheren

## Stufe 1: Voll-Vorwärts-Fließpressen:

Maß	D1 in mm	D2 in mm	L1 in mm	L2 in mm
Max. Wert	9,02	6,89	14,33	31,8
Min. Wert	8,99	6,82	14,11	29,41
Standardabweichung	0,01	0,01	0,04	0,30

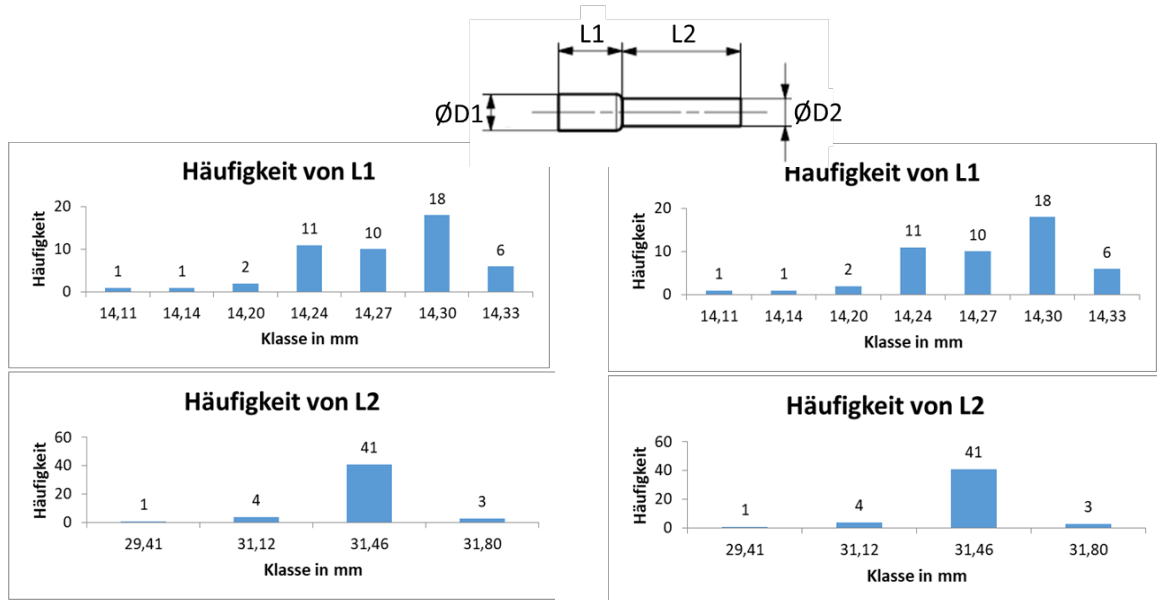


Abbildung 7: Ergebnis Vermessung nach dem Voll-Vorwärts-Fließpressen

## Stufe 2: Stauchen

Maß	D1 in mm	D2 in mm	L1 in mm	L2 in mm
Max. Wert	22,17	6,96	2,38	32,5
Min. Wert	21,07	6,87	2,23	31,75
Standardabweichung	0,18	0,01	0,04	0,13

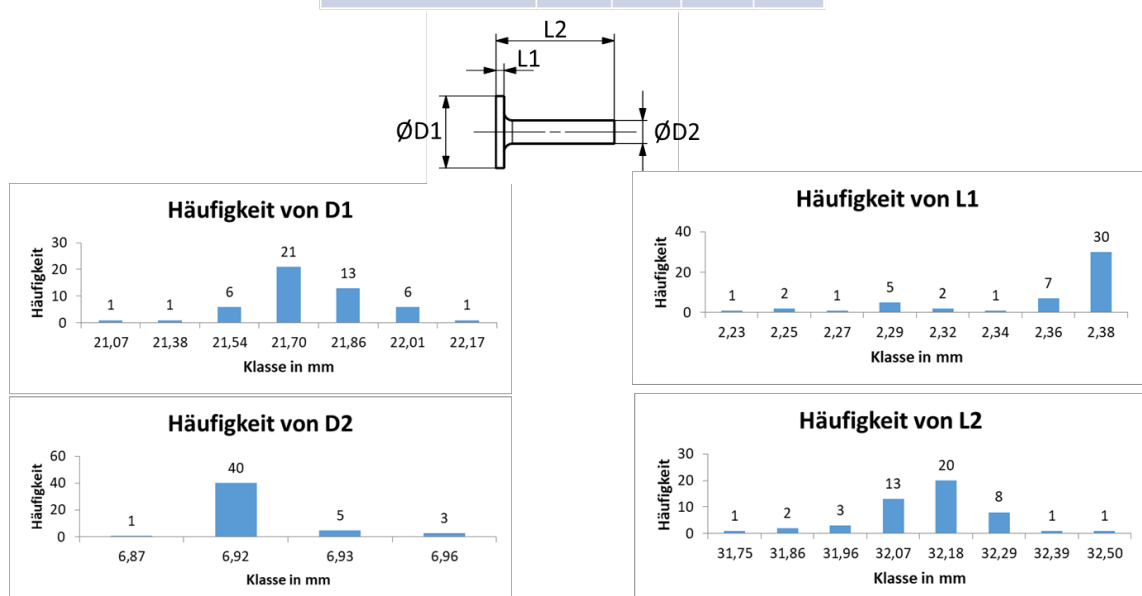


Abbildung 8: Ergebnis Vermessung nach dem Stauchen

## Stufe 4: Prägen

Maß	D1 in mm	D2 in mm	L1 in mm	L2 in mm
Max. Wert	21,95	6,93	2,43	32,39
Min. Wert	21,43	6,76	2,22	31,74
Standardabweichung	0,13	0,04	0,06	0,13

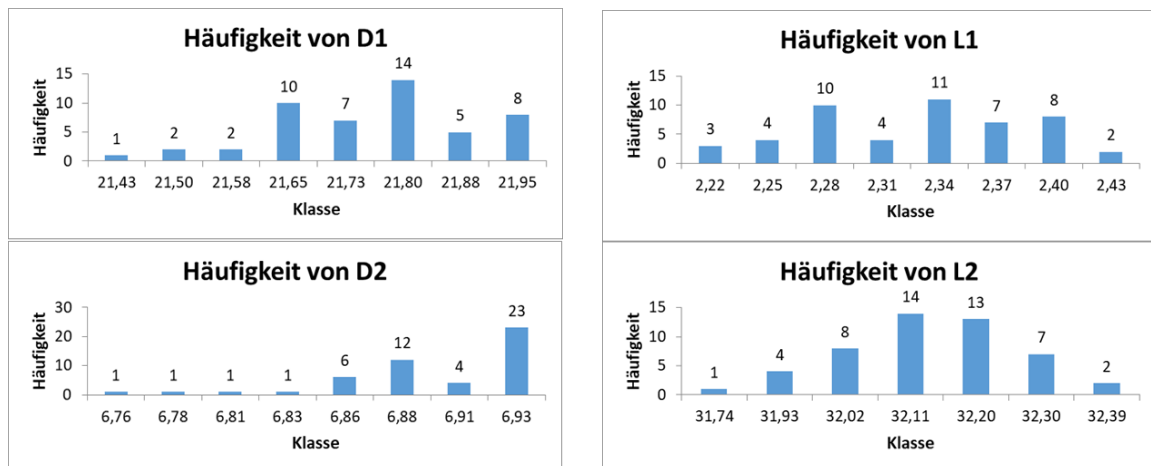
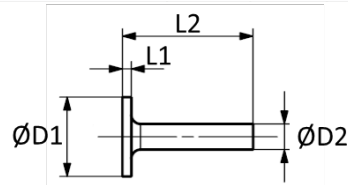


Abbildung 9: Ergebnis Vermessung nach dem Prägen

Beim Kaltumformen von ZEP1510 sind dieselben Umformmaschinen verwendet worden wie bei der Umformung von Kupferlegierungen. Bei der Fertigung des oben beschriebenen Bolzens aus ZEP1510 wurde eine dreistufige Kaltfließpresse verwendet. Durch die erprobten Verfahren und Prozessgrenzen hat sich herausgestellt, dass ZEP1510 trotz hexagonaler Gitterstruktur und – somit unerwartet – gut kaltumformbar ist.

Es können viele Bauteile der Kaltmassivumformung, die aktuell mit Kupferlegierungen hergestellt werden und die gleichen Verfahren bei der Herstellung benötigen, substituiert werden. Diese sind beispielsweise Grenzpunkt, Nieten und Steckverbinder.

Für die Verifikation von möglichen Umformteilen, die mittels Schmieden – also durch Warmumformung hergestellt werden – wurde bei dem Kooperationspartner Fa. Metallpresswerk Hohenlimburg GmbH jeweils ein Nassläuferkopf aus ZEP1510 und CuZn39Pb3 hergestellt und miteinander verglichen (siehe Abbildung 10).





Abbildung 10: Nassläuferkopf aus CuZn39Pb3 (links) und aus ZEP1510 (rechts)

Die benötigte Schmiedetemperatur des Bauteils unter Verwendung des Werkstoffs ZEP1510 beträgt ca. 250 °C und von CuZn39Pb3 liegt sie bei ca. 750 °C. Die umformtechnische Herstellung des Bauteils mit ZEP1510 funktioniert sehr gut. Bei der Formfüllung gibt es Maßabweichungen im Vergleich zu Messing (siehe Abbildung 11).

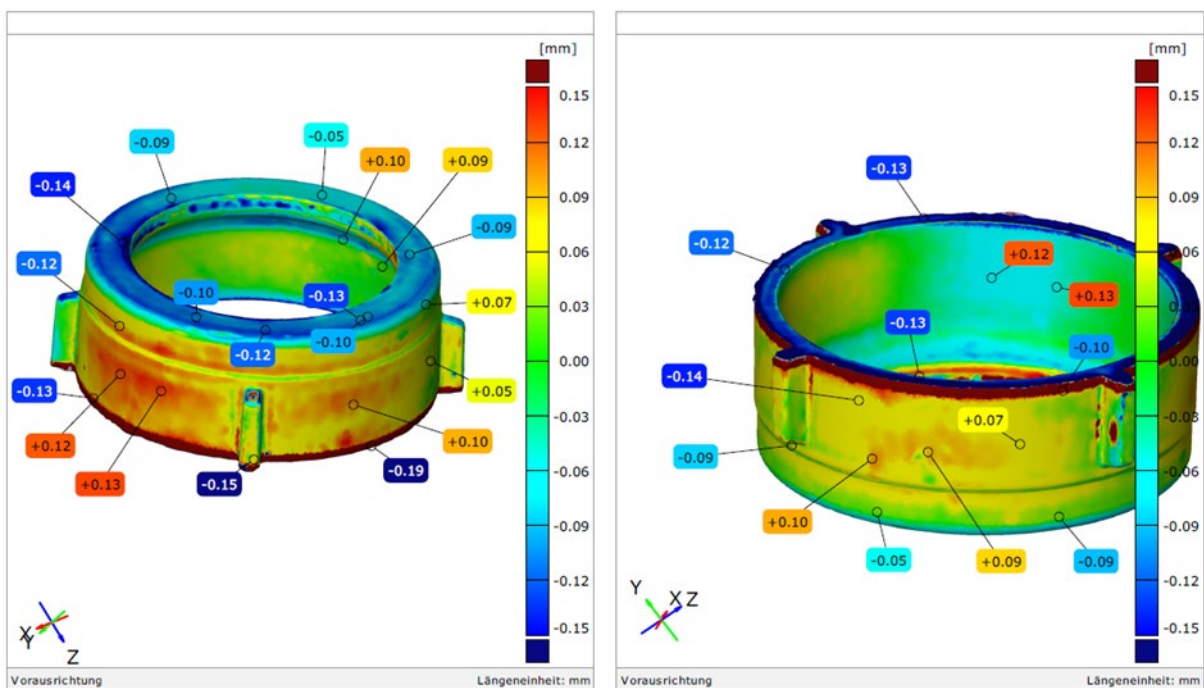


Abbildung 11: Falschfarbenvergleich von digitalisiertem Nassläuferkopf aus CuZn39Pb3 und ZEP1510

Ein weiteres Bauteil, das mit ZEP1510 geschmiedet wurde, ist ein Ventilkörperrohling (siehe Abbildung 12). Die Parameter zu diesem Bauteil werden im nächsten Kapitel detailliert beschrieben.



Abbildung 12: geschmiedetes Ventilkörperrohling mit Grat aus Zinknetlegierung ZEP1510

Die umformtechnische Herstellung des Ventilkörperrohrlings mit ZEP1510 hat sehr gut funktioniert. Die Schmiedetemperatur lag bei ca. 250 °C. Im Vergleich zu den CAD Daten ergab sich eine Maßabweichung am Bauteil – ohne Berücksichtigung des Gratbereiches - von maximal 0,2 mm. Die Formfüllung des Bauteils ist sehr gut (siehe Abbildung 13).

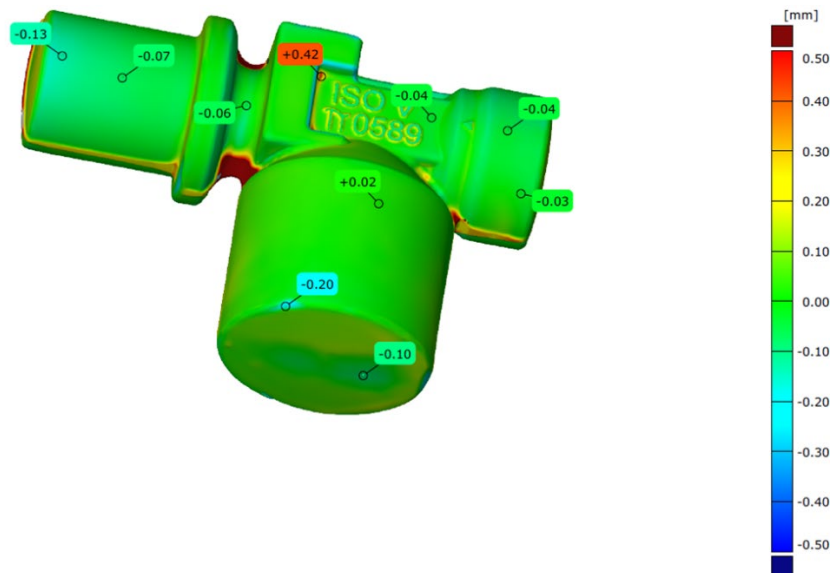


Abbildung 13: Falschfarbenvergleich von digitalisiertem Ventilkörperrohrling und die CAD Daten

Ein weiteres Bauteil aus dem Bereich der Elektrotechnik wurde im Rahmen dieses Projektes erprobt. Dabei handelt es sich um eine Batterieklemme (siehe Abbildung 14). Durch die gute elektrische Leitfähigkeit von ZEP1510 ist die Substitution dieser Batterieklemme möglich. Die umformtechnische Herstellung mittels Schmieden konnte nachgewiesen werden.



Abbildung 14: geschmiedete Batterieklemme aus Zinkknetlegierung ZEP1510

#### 2.1.4 Kriterienkatalog Umformteile

Für jedes Bauteil, das im Kapitel 2.1.3 mit ZEP1510 hergestellt ist, wurde ein Kriterienkatalog aufgestellt. Die berechneten Parameter zu dem Kriterienkatalog wurden in Anlehnung an die Formeln aus [HEI05] und FEM-Simulationen durchgeführt. Bei dem Bolzen konnte die FEM-Simulation nicht durchgeführt werden, weil die Fließkurven von ZEP1510 bei Raumtemperatur nicht vorhanden sind.

#### Bolzen

Tabelle 3: Kriterienkatalog vom Bolzen aus ZEP1510

Kriterium	Ausprägung
Anzahl Stufen inkl. Verfahren	Stufe 0: Scheren Stufe 1: Voll-Vorwärts-Fließpressen Stufe 2: Stauchen Stufe 3: Prägen
Vorbehandlung	Keine
Nachbehandlung	Waschen/Reinigen
Max. Kraftbedarf	Stufe 1: 25 kN Stufe 2: 215 kN Stufe 3: 4 kN
Schmiermittel	Metallbearbeitungsöl Beruform MF 155 von Carl Bechem GmbH
Umformaggregat	Kaltfließpresse: Jern Yao JBF 13B3SL
Werkstoff	ZEP1510
Umformgrad (Voll- Vorwärts-Fließpressen)	$\varphi = 0,42$
Stauchverhältnis	$s = 1,8$
Bauteilgewicht	15 g

#### Nassläuferkopf

Tabelle 4: Kriterienkatalog von Nassläuferkopf aus ZEP1510

Kriterium	Ausprägung
Anzahl Stufen inkl. Verfahren	Stufe 0: Scheren Stufe 1: Gesenkschmieden
Vorbehandlung	Erwärmung auf ca. 300°C
Nachbehandlung	Abgraten Spanende Bearbeitung
Schmiermittel	Wasser/Graphit
Umformaggregat	Exzenterpresse 550 t
Werkstoff Bauteil	ZEP1510
Werkstoff Werkzeug	1,2365
Umformgrad	$\varphi = 0,42$
Maße Vormaterial	Zylinder 40 x 54 mm
Bauteilgewicht	286 g

#### Ventilkörperrohling

Tabelle 5: Kriterienkatalog von Ventilkörperrohling aus ZEP1510

Kriterium	Ausprägung
Anzahl Stufen inkl. Verfahren	Stufe 0: Scheren Stufe 1: Gesenkschmieden
Vorbehandlung	Erwärmung auf ca. 300°C
Nachbehandlung	Abgraten Spanende Bearbeitung Impact Test

Kriterium	Ausprägung
Max. Kraftbedarf	4800 kN
Schmiermittel	Wasser/Graphit
Umformaggregat	Spindelpresse 1000 t
Werkstoff Bauteil	ZEP1510
Werkstoff Werkzeug	1,2365
Umformgrad	ca. 3,05
Maße Vormaterial	Zylinder 38 x 56 mm
Bauteilgewicht	298 g

#### Batterieklemme:

Tabelle 6: Kriterienkatalog von Batterieklemme aus ZEP1510

Kriterium	Ausprägung
Anzahl Stufen inkl. Verfahren	Stufe 0: Scheren Stufe 1: Gesenkschmieden
Vorbehandlung	Erwärmung auf ca. 300°C
Nachbehandlung	Abgraten Spanende Bearbeitung
Max. Kraftbedarf	3600 kN
Schmiermittel	Wasser/Graphit
Umformaggregat	Spindelpresse 1000 t
Werkstoff Bauteil	ZEP1510
Werkstoff Werkzeug	1,2365
Umformgrad	ca. 4,1
Maße Vormaterial	Zylinder 17 x 40 mm
Bauteilgewicht	55,18 g

Bei den angewendeten Kaltumformverfahren hat sich gezeigt, dass ZEP1510 eine verhältnismäßig geringe Kaltverfestigung erfährt.

Ein Einsatz von ZEP1510 in der Kaltmassivumformung bedingt jedoch für den industriellen Einsatz ein anderes Halbzeug. Im Rahmen der Untersuchungen und auch bisher ausschließlich verfügbar ist ZEP1510 als Stangenmaterial. Da bei einem Großteil der kaltmassivumformenden Unternehmen die Fertigungseinrichtungen, insbesondere die Zuführungen von Material, auf die Verarbeitung von Drahtcoils ausgelegt sind, kann eine Substitution von ZEP1510 als Stangenmaterial nicht kurzfristig umgesetzt werden. Darüber hinaus können aus Sicht der Prozessgestaltung mit bestehenden Aggregaten und Werkzeugen viele Bauteile, die heute mit Kupferlegierungen hergestellt werden, substituiert werden.

Bei Schmieden, sprich Warmumformung, wurde gezeigt, dass ZEP1510 hohe Umformgrade bei geringeren Temperaturen im Vergleich zu Kupferlegierungen erreichen kann. Somit bietet die Substitution neben Kostenvorteilen große Energieeinsparpotenziale für Unternehmen. Für die Erwärmung der Halbzeuge vor der Umformung eignen sich Metall-Umluftöfen, die Widerstandserwärmung oder auch eine Induktionserwärmung. Die Umformaggregate und die Werkzeuge sind identisch wie bei der Umformung von Kupferlegierungen.

### 2.1.5 Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien

Um das Formänderungsvermögen von ZEP1510 für Kalt- und Warmumformung zu charakterisieren, sind bei unterschiedlichen Temperaturen Zugversuche mit fünffacher Belegung durchgeführt worden (siehe Abbildung 15). Die Kenngrößen aus dem Zugversuch, wie z.B. Bruchdehnung oder Gleichmaßdehnung, helfen, das Formänderungsvermögen zu beurteilen.

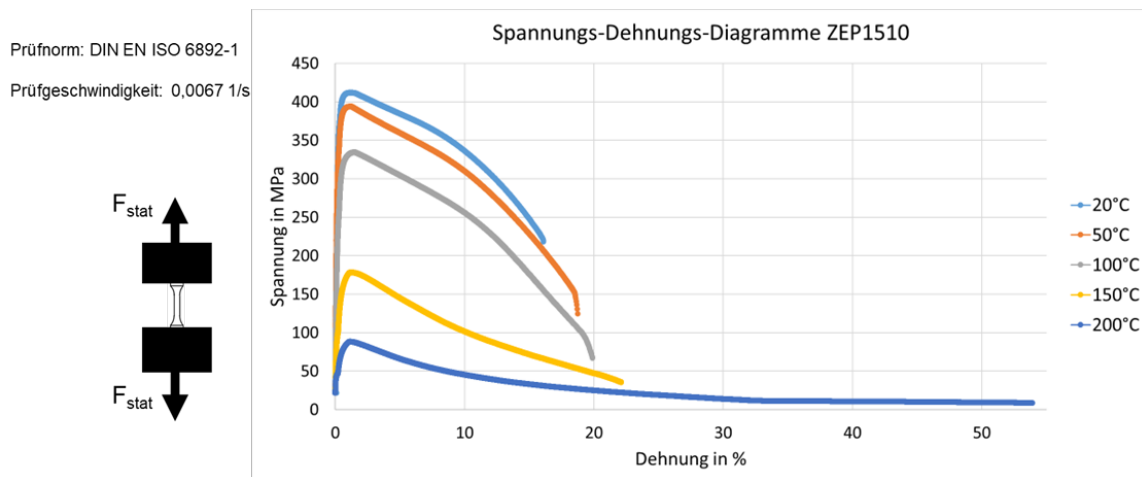


Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von ZEP1510 bei unterschiedlichen Temperaturen

Aufgrund des Festigkeitsabfall von bei ZEP1510 bei einer Temperatur von 250 °C und höher, konnte keine Zugkraft mehr aufgezeichnet werden. Eine weitere Erkenntnis ist, dass ab einer Temperatur von 100 °C ein starker Zugfestigkeitsabfall zu verzeichnen ist.

### 2.1.6 Ermittlung der Dehnungswöhlerlinien

Zur Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie werden statische und zyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme des jeweiligen Werkstoffs benötigt. Die statischen Spannungs-Dehnungs-Diagramme sind wie im Kapitel 2.1.5 beschrieben bis zur Temperatur von 200 °C ermittelt worden. Zur Ermittlung von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen wurden bei Raumtemperatur (RT), bei 75 °C und bei 100 °C dehnungsgeregelte Low-Cycle-fatigue (LCF)-Versuche mit fünffacher Belegung durchgeführt (siehe Abbildung 16).

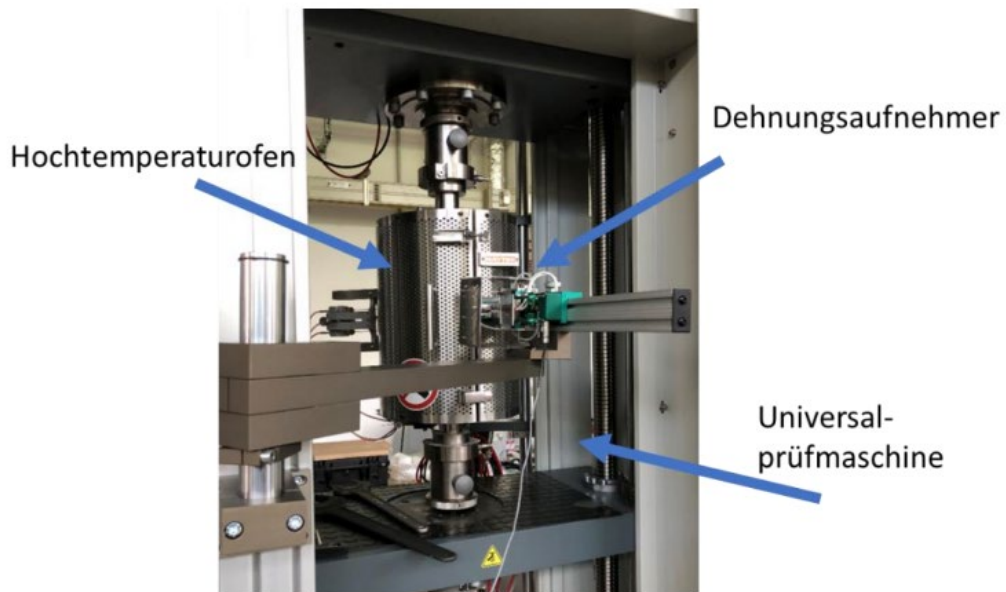


Abbildung 16: Versuchsaufbau der LCF Versuche

Der LCF-Versuch ist ein Ermüdungsversuch, bei dem eine zyklische Beanspruchung bis zum Versagen erfolgt. Die vorgegebene Beanspruchung im LCF-Versuch setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Dehnungsanteil zusammen. Der Beanspruchungsverlauf bei den durchgeführten Versuchen steigt bis zu einem Maximalwert und verringert sich wieder. Während im elastischen Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung besteht, ist dieser im plastischen Bereich nicht linear. Als Folge daraus ergibt sich eine Hystereseschleife. Nach ca. 15 Durchläufen bei ZEP1510 von dem angegebenen Beanspruchungsverlauf stabilisieren sich die Hysteresekurven. Aus den stabilisierten Hysteresekurven kann die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve des jeweiligen Werkstoffes abgeleitet werden (siehe Abbildung 17).

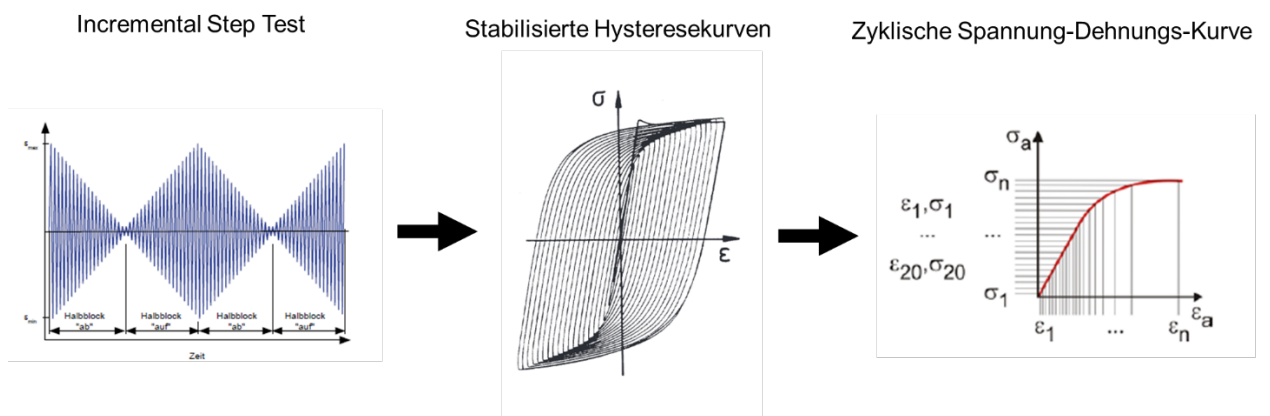


Abbildung 17: Ermittlung von Zyklische-Spannungs-Dehnungs-Kurve [ERW06]

Die Berechnung der Dehnungswöhlerlinie mithilfe der Spannungs- und Dehnungswerte wird folgenderweise durchgeführt (siehe Abbildung 18):

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f * (2N)^c$$

$$\sigma'_f = R_m(1 + A_g) \quad \text{zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient}$$

$$b = \frac{-n'}{1 + 5n'} \quad \text{zyklischer Schwingfestigkeitsexponent (-0,05 bis -0,12 nach Radaj u. Vormwald)}$$

$$\varepsilon'_f = \ln(1+A) \quad \text{zyklischer Duktilitätskoeffizient}$$

$$c = \frac{-1}{1 + 5n'} \quad \text{zyklischer Duktilitätsexponent (-0,5 bis -0,7 nach Radaj u. Vormwald)}$$

Kennwert	Bedeutung	Quelle
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit	Zugversuch
A <sub>g</sub>	Gleichmaßdehnung	Zugversuch
N	Anrisspielzahl	
A	Bruchdehnung	Zugversuch
n'	zyklischer Verfestigungskoeffizient	zyklische σ - ε Kurve

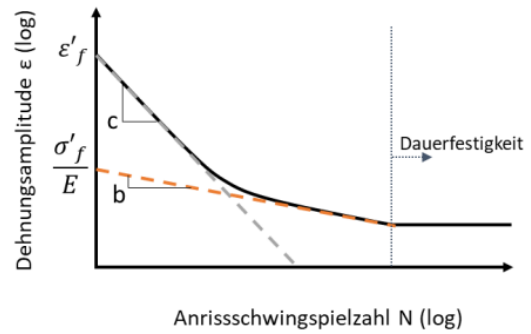


Abbildung 18: Berechnung der Dehnungswöhlerlinie [MAR96]

Die Abbildung 19 zeigt die mit dem beschriebenen Ansatz ermittelten Dehnungswöhlerlinien von ZEP1510 bei RT, 75 °C und 100 °C.

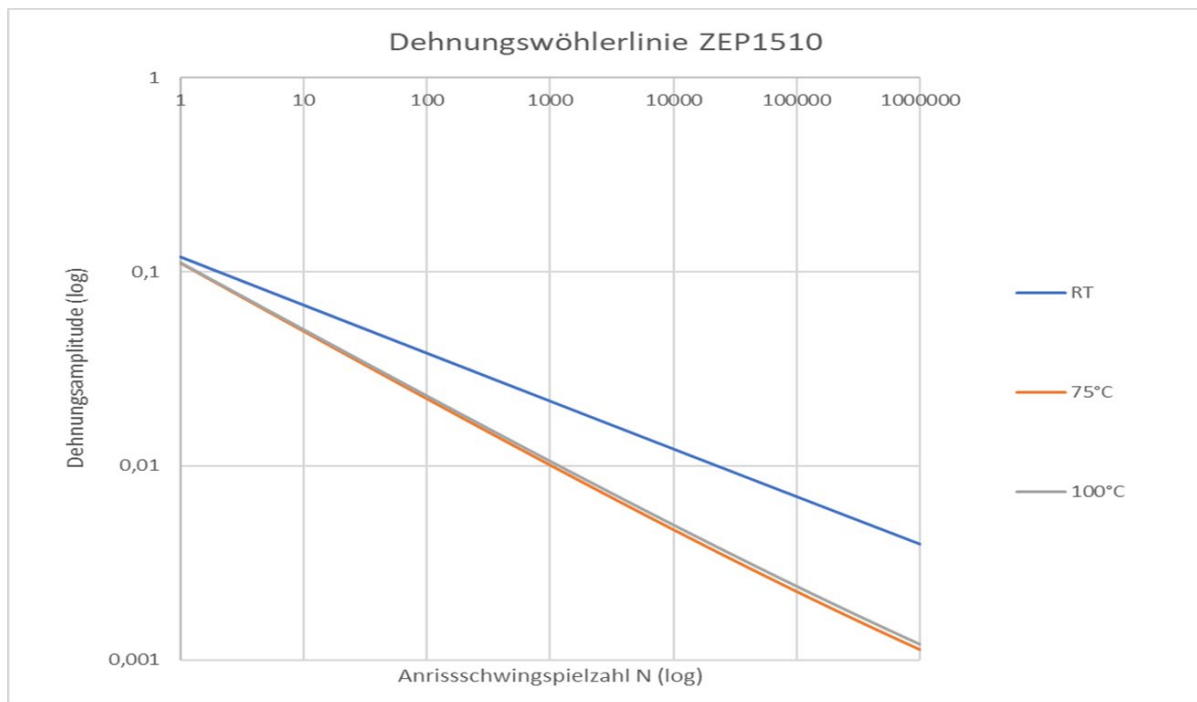


Abbildung 19: mittlere Dehnungswöhlerlinien von ZEP1510

Es ist ein signifikanter Einfluss der Temperatur bei zyklischer Belastung bei ZEP1510 nachweisbar. Die zyklische Belastbarkeit ist bei 75 °C und 100 °C fast identisch.

## 2.2 Prozessanalyse

Zur Ermittlung des Umformverhaltens und Umformvermögens von Zinknetlegierungen wurden in diesem AP verschiedene experimentelle Untersuchungen auf einer hydraulischen

Presse durchgeführt. Ziel ist es, die Erschließung von werkstoffwissenschaftlichen und verfahrenstechnischen Zusammenhängen sowie die Verfahrensgrenzen der Zinknetlegierungen zu ermitteln.

### 2.2.1 Ermittlung der Umformbarkeit

Zur Ermittlung von Prozesskenngrößen für die Massivumformung wurden mithilfe von Stauchversuchen die erreichbaren Umformgrade  $\phi$  bei typischen Prozesstemperaturen von ZEP1510 ermittelt und mit Feinzink, CuZn39Pb3 und AlSi1MgMn verglichen. Der Ausgangsdurchmesser der Proben beträgt 34 mm und die Ausgangshöhe 47 mm. Die Versuche sind mit einer definierten Presskraft  $F$  in Höhe von 150 kN durchgeführt worden.

Abbildung 20 zeigt den Anstieg des realisierbaren Umformgrades mit zunehmender Rohteiltemperatur von ZEP1510. Diese erreichbaren Umformgrade wurden mithilfe von Stauchversuchen ermittelt. Bis 150 °C können die Zylinder nicht mit einer Presskraft von 150 kN gestaucht werden. Ab 200 °C können Produkte mit ZEP1510, die einen hohen Umformgraden benötigen, gefertigt werden.

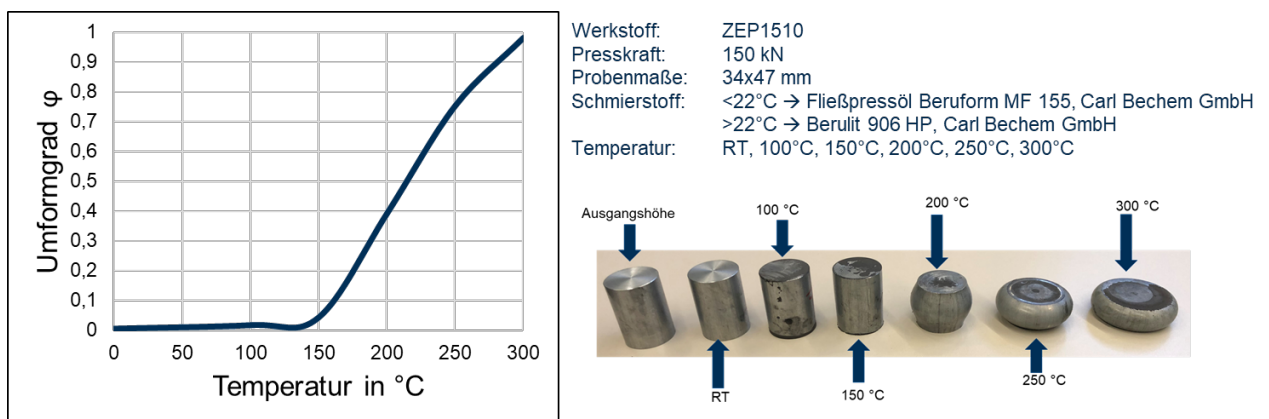


Abbildung 20: Umformbarkeit von ZEP1510 in Abhängigkeit der Rohteiltemperatur

In der Abbildung 21 ist die Umformbarkeit von ZEP1510, Feinzink, CuZn38Pb3 und AlSi1MgMn in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Mit einer definierten maximalen Presskraft von 150 kN wird bei ZEP ein Umformgrad von 0,8 bei ca. 260 °C erreicht. Bei dem Automatenmessing CuZn39Pb3 kann dieser Umformgrad mit der definierten Maximalkraft bei 536 °C erreicht werden. Diese große Reduzierung der Verarbeitungstemperatur bietet große Energieeinsparpotenziale bei Warmumformung.



Werkstoff: Feinzink, ZEP1510, AlSi1MgMn, CuZn39Pb3  
 Presskraft: 150 kN  
 Probenmaße: 34x47 mm  
 Schmierstoff: <22°C → Fließpressöl Beruform MF 155, Carl Bechem GmbH  
 >22°C → Berulit 906 HP, Carl Bechem GmbH  
 Temperatur: RT bis 600°C

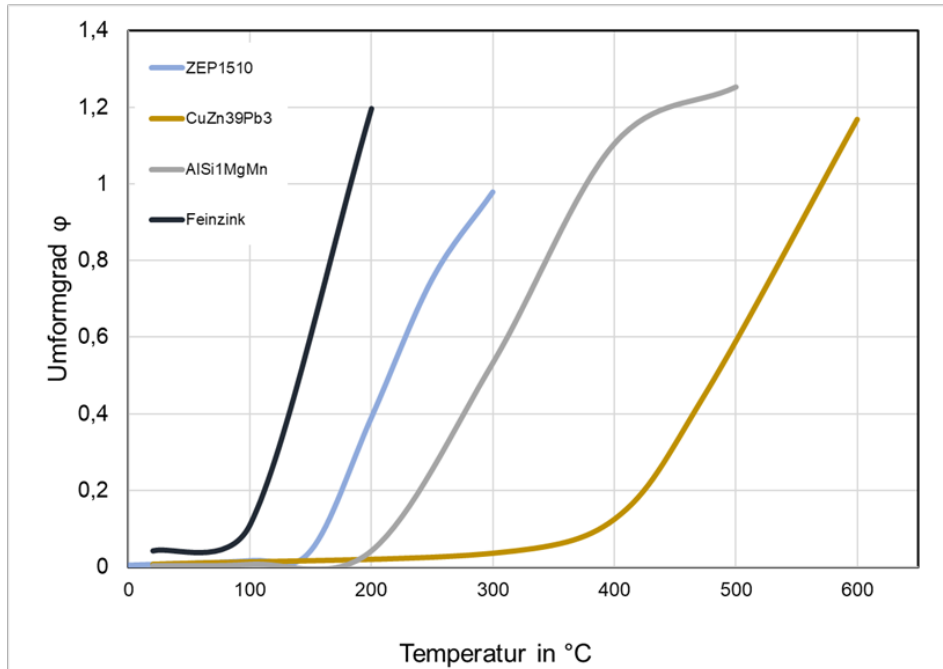


Abbildung 21: Umformbarkeit von Feinzink, ZEP1510, AlSi1MgMn, CuZn39Pb3 in Abhängigkeit der Temperatur

Aus diesen Experimenten wird klar, dass eine gezielte Temperaturführung bei der Warmumformung von ZEP1510 bedeutend für die erreichbaren Umformgrade ist.

### 2.2.2 Ermittlung vom Stauchverhältnis

Die Grenze der Knickgefahr beim Stauchen wird durch das Stauchverhältnis berechnet [HAR12], welches das Verhältnis von Probenhöhe  $h_0$  zu Probendurchmesser  $d_0$  im nicht umgeformten Zustand darstellt:

$$s = \frac{h_0}{d_0}$$

Das zulässige Stauchverhältnis für das Stauchen wird in der Literatur  $s \leq 2,3$  angegeben [HAR12]. Da es aber in der Literatur keine eindeutige Festlegung auf ein zulässiges Stauchverhältnis von Zink- und Kupferlegierungen gibt, wurden aus diesem Grund Stauchversuche für die Werkstoffe ZEP1510, CuZn39Pb3 und AlSi1MgMn mit einem Ausgangsdurchmesser von  $d_0 = 34$  mm (siehe Abbildung 22) und unterschiedlichen Probenhöhen durchgeführt, um dadurch den Bereich des zulässigen Grenzstauchverhältnisses (siehe Tabelle 6) zu ermitteln:

Werkstoff	Ausgangshöhe in mm	Stauchverhältnis	Rohteiltemperatur in °C	Knick
ZEP1510	89	2,6	250	Nein
ZEP1510	100	2,9	250	Nein
ZEP1510	120	3,5	250	Ja
ZEP1510	150	4,4	250	Ja

Werkstoff	Ausgangshöhe in mm	Stauchverhältnis	Rohteiltemperatur in °C	Knick
CuZn39Pb3	89	2,6	600	Nein
CuZn39Pb3	100	2,9	600	Nein
CuZn39Pb3	120	3,5	600	Ja
CuZn39Pb3	150	4,4	600	Ja
AlSi1MgMn	89	2,6	500	Nein
AlSi1MgMn	100	2,9	500	Nein
AlSi1MgMn	120	3,5	500	Nein
AlSi1MgMn	150	4,4	500	Ja

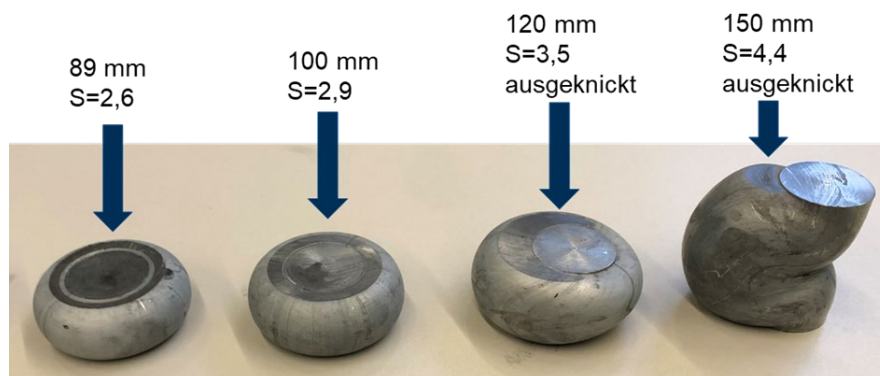


Abbildung 22: Stauchergebnisse von ZEP1510 bei unterschiedlichen Stauchverhältnissen

Für ZEP1510 und CuZn39Pb3 können Stauchverhältnisse bei Warmumformung in Höhe von  $s = \leq 2,9-3,5$  eingestellt werden. Für AlSi1MgMn liegt das Stauchverhältnis bei  $s > 3,5$ . Ein hohes Stauchverhältnis hilft dabei, Bauteile in weniger Stufen zu fertigen. Bei zu hohen Umformgraden besteht jedoch die Gefahr, dass am Umfang des Bauteils Risse auftreten. Aus diesem Grund wurden weitere Stauchversuche durchgeführt, um die Rissbildung zu ermitteln.

### 2.2.3 Ermittlung vom Zeitpunkt der Schubrisse

Aus den vorherigen Untersuchungen wird deutlich, dass eine gezielte Temperaturführung bei der Warmumformung von Zinknetlegierungen bedeutsam ist, da bei zu geringen Temperaturen die Umformbarkeit signifikant herabgesetzt wird. Handhabungszeiten und Kontaktzeiten, die zu einem zu großen Temperaturabfall nach der Erwärmung im Ofen führen, sollten daher möglichst geringgehalten werden.

Wenn das zulässige Formänderungsvermögen eines Werkstoffes überstiegen wird, kommt es zu Rissen am Bauteil [HEI05]. Für eine optimierte Prozessauslegung ist es wichtig, das zulässige Formänderungsvermögen zu kennen. Aus diesem Grund wurde ein Versuch durchgeführt, um die Rissbildung bei ZEP1510 beim Warmstauchen zu ermitteln und mit anderen Werkstoffen zu vergleichen.

Es sind bekannte Methoden für die Risserkennung wie z. B. die Magnetpulverprüfung oder Farbeindringsprüfung vorhanden. Mithilfe dieser Methoden können Oberflächenrisse primitiv ermittelt werden. Jedoch haben diese Methoden den Nachteil, dass die Überprüfung erst nach dem Umformvorgang durchgeführt werden kann und somit der Zeitpunkt der Rissentstehung nicht ermittelt wird. Aus dem Grund werden Methoden recherchiert, die die Rissüberprüfung während des Umformvorgangs ermöglichen, um das erreichbare Formänderungsvermögen zu bestimmen.

Die Rissermittlung erfolgt mit einer Infrarot-Wärmebildkamera (IR-Kamera). Die dauerhafte Videoaufnahme des Umformprozesses ermöglicht es, die komplette Abkühlung oder Erwärmung während des Umformprozesses zu dokumentieren. Sollte es bei diesen Umformprozessen zu Rissen auf der Oberfläche des Bauteils kommen, so zeigt sich dies farblich im Bild (siehe Abbildung 23). Grund dafür sind Temperaturdifferenz zwischen dem Kern (bzw. der Rissoberfläche) und der Oberfläche des Bauteils. Ein weiteres Erkennungsmerkmal könnte die Erwärmung von Luft im Spalt sein, welches sich wieder farblich in der IR-Kamera erkennbar macht.

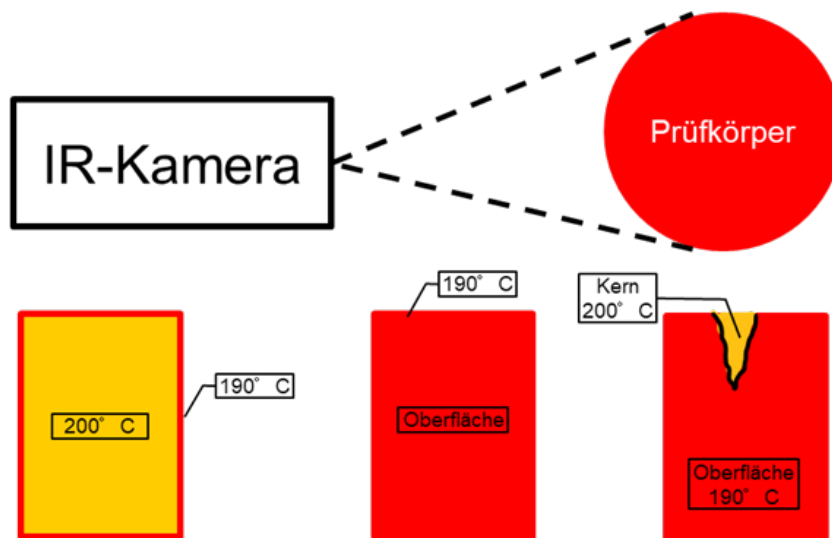


Abbildung 23: schematische Darstellung der Risserkennung

Die Herausforderung, die sich hier ergibt, folgt aus der raschen Abkühlung der Oberflächen, die durch den Riss entstanden sind. Das hat zur Folge, dass die Videoaufnahme schneller (FPS) erfolgen muss als die Abkühlung der Rissstelle. Des Weiteren können nur die Risse detektiert werden, die im Aufnahmebereich der IR-Kamera sind. Für die Versuche wurde die IR-Kamera *VarioCAM* von der Firma *InfraTec GmbH* mit den in der Tabelle 7 aufgezählten Eigenschaften verwendet.

Tabelle 7: Eigenschaften von IR-Kamera

Eigenschaft	VarioCAM
<b>Bildfrequenz</b>	30 Hz
<b>Auflösung</b>	640 x 480
<b>Temperaturbereich</b>	-40 °C – 1200 °C
<b>Abweichung</b>	± 1,5 %

Mithilfe der Auswertesoftware *IRBIS 3 Plus* werden Temperaturen während des Stauchvorganges aufgenommen und gespeichert (siehe Abbildung 24). Min-, Max- und Mittelwerte können ausgegeben werden. Dabei ist besonders zu beachten, dass der Korrekturfaktor bzw. Emissionsgrad für jeden Werkstoff anzupassen ist.

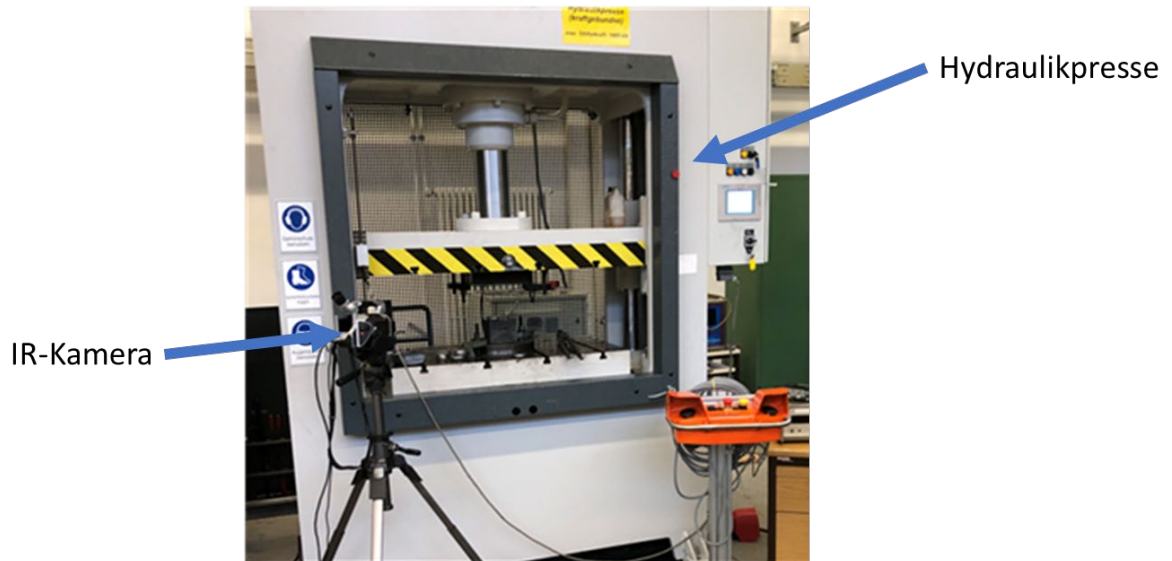


Abbildung 24: Versuchsaufbau

Für diese Versuche wurden Stauchversuche mit folgenden Werkstoffen durchgeführt:

1. Zinkknetlegierung ZEP1510
2. Messing CuZn39Pb3
3. Aluminium AlSi1MgMn

Die Proben haben einen Durchmesser von 34 mm und eine Höhe von 55 mm. Als Anfangstemperatur wurde bei allen drei Werkstoffen die ungefähre Schmiedetemperatur eingestellt. Diese ist bei ZEP1510 ca. 250°C, bei CuZn39Pb2 ca. 750 °C und bei AlSi1MgMn ca. 500 °C. Die Anfangstemperatur wurde Schritt für Schritt herabgesetzt bis Risse bei der vorhandenen Umformung entstehen. Bei ZEP1510 wurde die Anfangstemperatur Schritt für Schritt von 250 °C bis 30 °C herabgesetzt. Trotz der geringeren Temperatur sind keine Oberflächenrisse entstanden (siehe Abbildung 25).

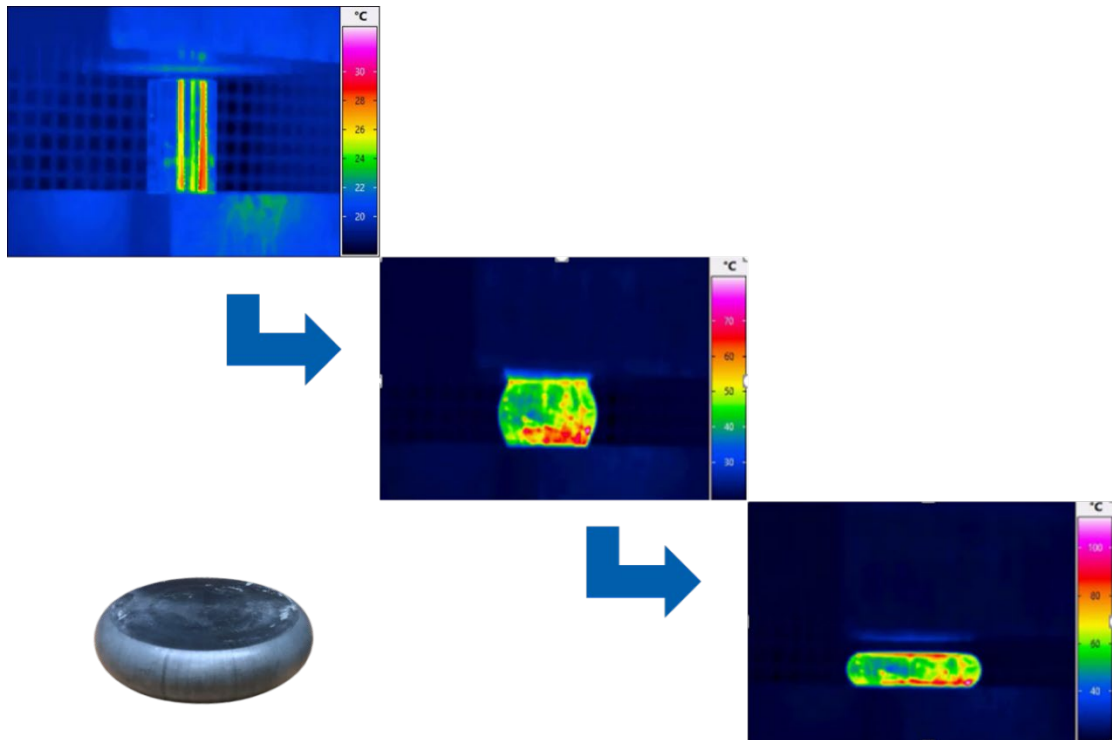


Abbildung 25: Stauvorgang von ZEP1510 mit IR-Kamera

Bei CuZn39Pb3 wurde die Stauchtemperatur ab 750 °C Schritt für Schritt herabgesetzt. Bei den Stauchversuchen mit einer Anfangstemperatur von 450 °C sind Risse entstanden, die mit der IR-Kamera deutlich zu erkennen sind (siehe Abbildung 26).

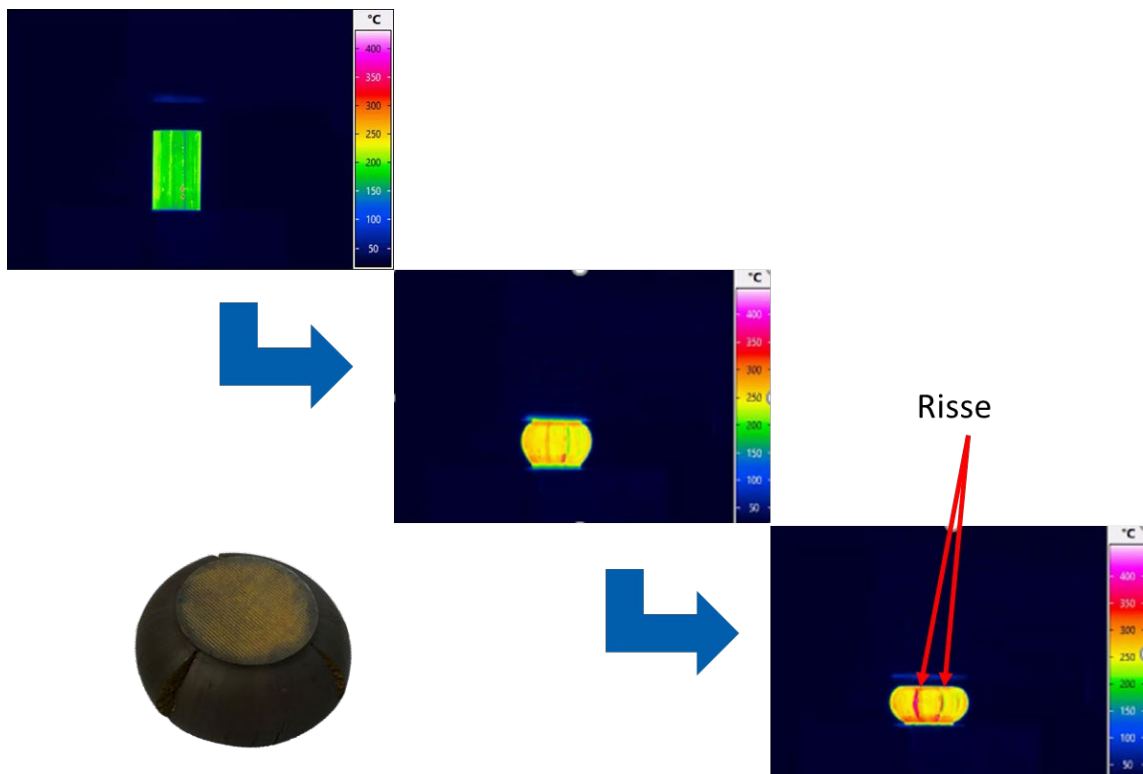


Abbildung 26: Stauvorgang von CuZn39Pb3 mit IR-Kamera

Bei AlSi1MgMn wurde die Stauchtemperatur ab 500 °C Schritt für Schritt herabgesetzt. Bei den Stauchversuchen mit einer Anfangstemperatur von 200°C sind Risse entstanden, die mit der IR-Kamera deutlich zu erkennen sind (siehe Abbildung 27).

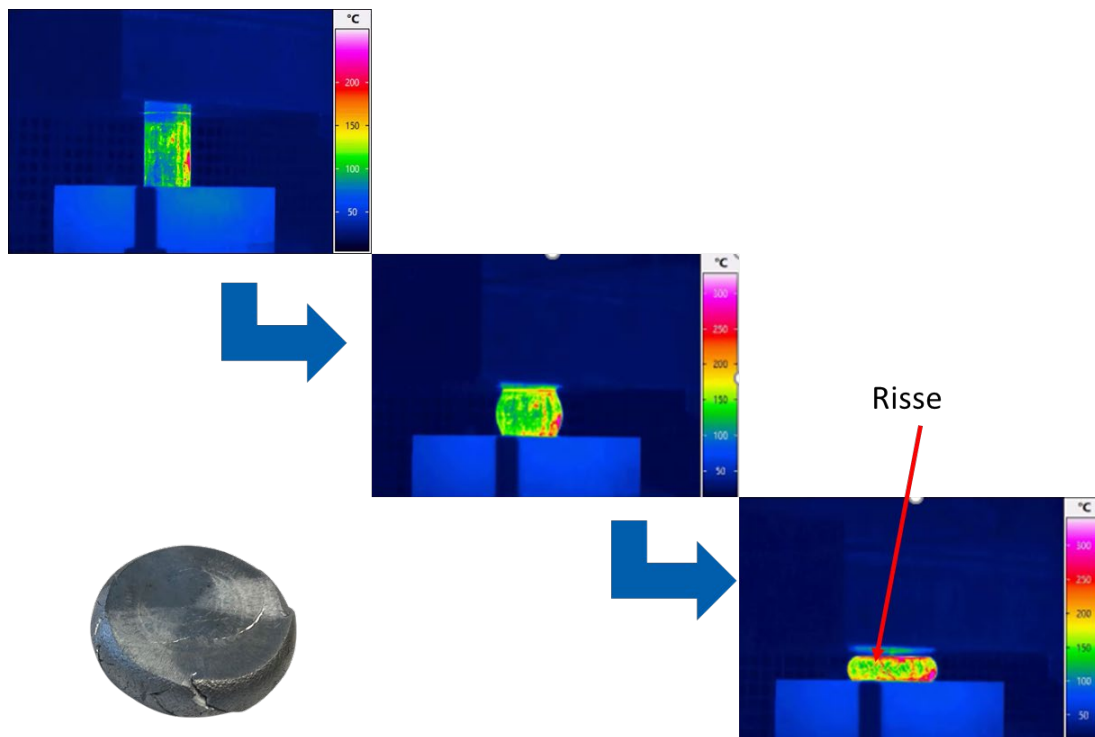


Abbildung 27: Stauchvorgang von AlSi1MgMn mit IR-Kamera

Es hat sich herausgestellt, dass die Risse an der Oberfläche mit dieser Methode während der Umformung erkannt werden können. Die genaue Temperaturmessung mit der eingesetzten IR-Kamera ist besonders bei Aluminium und Zink aufgrund des Emissionsgrads schwer einstellbar. Die Theorie, dass die Risse aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Innentemperatur erkannt werden können, hat sich hierbei bestätigt. Aus den Versuchen wird ersichtlich, dass das Formänderungsvermögen von ZEP1510 auch bei geringeren Temperaturen höher ist gegenüber dem von Messing und Aluminium. Somit können bei Auslegung von Umformoperationen Arbeitsgänge gespart werden.

### 2.3 Erstellen eines Anwenderleitfadens

Ergebnis des Vorhabens sind die umformtechnischen Prozessgrenzen von Zinknetlegierungen, die relevanten Anwendungsfelder und das Energieeinsparpotenzial bei einer Substitution. Im Vorhaben wurden diese Arbeitspunkte detailliert mit den Projektpartnern bearbeitet. In diesem Arbeitspaket werden die umformtechnischen Grenzen und die Vorgehensweise bei der Umformung von Zinknetlegierungen in einem Anwenderleitfaden beschrieben. Ziel dieses Leitfadens ist es nicht nur, die Projektergebnisse vorzustellen, sondern speziell die Übertragbarkeit für andere Unternehmen zu ermöglichen.

### 2.4 Abschätzung des Substitutionspotenzials

Langfristig könnte schätzungsweise ein Fünftel des Marktvolumens an Messingwerkstoffen durch innovative Zinkwerkstoffe substituiert werden. Dies entspricht einem Marktvolumen in der EU von 120.000 t Messing/a. Durch den Unterschied in der Dichte ergibt sich ein Materialeinsatzgewicht für Zinknetlegierungen von 80.000 t/a. Aus den Materialkosten pro

Tonne (siehe Tabelle 8) ist zu entnehmen, dass 80.000 t Zinkknetlegierung ein Marktvolumen von ca. 352 Mio. Euro haben. Demgegenüber stehen 120.000 t Messing mit einem Marktvolumen von ca. 762 Mio. Euro. Dieses enorme wirtschaftliche Einsparungspotential kann als Triebfeder verstanden werden, die die technische Substitution der entsprechenden Messingwerkstoffe durch den neuen Werkstoff begünstigt. Je größer die mögliche technologische Substitution von Zinkknetlegierungen gegenüber Messinglegierungen ausfällt, desto höher ist die gesamtwirtschaftliche Einsparung und desto größer die CO<sub>2</sub>-Einsparung für die Umwelt. Aus der Annahme, ein Fünftel des Marktvolumens an Messingwerkstoffen ersetzen zu können, ergibt sich eine theoretische CO<sub>2</sub>-Einsparung von 242.999 t CO<sub>2</sub>/a innerhalb der EU.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Materialkosten von Messing (CuZn39Pb3) und Zinkknetlegierung (ZEP1510)

Werkstoff	Materialkosten absolut [€/t]	Dichte des WK [kg/m <sup>3</sup> ]	Faktor Dichteunterschied	Materialkosten [€/m <sup>3</sup> ]	Ersparnis
CuZn39Pb3	6.350	8.500	1,5	53.975	53 %
ZEP1510	4.400	5.700		25.080	

Das Marktscreening hat gezeigt, dass als vielsprechende Branche die Sanitärtechnik aufgeführt werden kann. Der Werkstoff Messing findet großen Einsatz in der Sanitärtechnik, beispielsweise in Produkten wie Armaturen oder Rohrverbindern. Ein Großteil dieser Produkte wird mittels Warmmassivumformung hergestellt und spanend bearbeitet. Fittings aus Messing nehmen derzeit einen hohen Anteil bei der Verarbeitung von Messing ein. Schätzungsweise stellen die vier größten Unternehmen in Deutschland knapp 500 Millionen Messingfittings pro Jahr her, sodass ca. 150.000 Tonnen Messing allein für diese Produktgruppe verarbeitet wird.

Für die Herstellung von Fittings aus beispielsweise Zinkknetlegierung ZEP1510 mangelt es jedoch an einer Wasserzulassung, die aufgrund der eingesetzten Legierungselemente nicht erlangt werden kann. Der Gesetzgeber lässt jedoch zu, dass trinkwasserführende Leitungen mit einer Schutzschicht überzogen werden, die dauerhaft im Kontakt mit dem Trinkwasser ist. Um die Trinkwassereignung zu ermöglichen, können die Fittings nach der Umformung an allen wasserberührenden Flächen (Innenflächen) mit einer Kunststoffschicht beschichtet werden.

## 2.5 Darstellung des Energie-/CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzials

Zinkknetlegierung ZEP1510 bietet große Potenziale zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung im Vergleich zu dem Automatenmessing CuZn39Pb3. Dieses Potenzial kommt hauptsächlich durch folgende beide Punkte:

1. Bei der Gewinnung und Herstellung von Zink werden 6,11 % weniger Energie je Tonne verbraucht als bei konventionellem Messing. Der Grund hierfür liegt in dem hohen Kupfergehalt des Messings. Kupfergewinnung und -verarbeitung benötigen mehr Energie als die Zinkgewinnung und -verarbeitung.

2. Die anschließende Verarbeitung des Halbzeuges kann bis zu 37,8 % weniger Energie verbrauchen, da diese bei deutlich geringeren Temperaturen erfolgt, bei ca. 500 °C unter der Verarbeitungstemperatur von Kupferlegierungen.

In der Tabelle 9 wird der kumulierte Energieverbrauch innerhalb einer Prozesskette bei der Verarbeitung des Halbzeuges zum Endprodukt zwischen ZEP1510 und CuZn39Pb3 berechnet.

Tabelle 9: kumulierter Energieverbrauch innerhalb einer Prozesskette von CuZn39Pb3 und ZEP1510

Kumulierter Energieverbrauch (KEA) in GJ/t		
	CuZn39Pb3	ZEP1510
<b>Werkstoffherstellung</b>	28,80	27,04
<b>Halbzeugproduktion (Strangpressen)</b>	0,359	0,1357
<b>Weiterverarbeitung</b>	0,359	0,1357
<b>Summe KEA</b>	30,52	27,31
<b>Umrechnung auf das Volumen: Summe KEA in GJ/m<sup>3</sup></b>	259,42	155,66
	<b><u>40 %</u></b>	

Auf Basis der o.g. Abschätzung erscheint eine Energieeinsparung von bis zu 40 % bezogen auf das Werkstoffvolumen möglich. Unter Berücksichtigung der deutlich geringeren Dichte von ZEP1510 gegenüber CuZn39Pb3 und des geringeren Energiebedarfs für die Halbzeugherstellung und der abschließenden Warmformgebung kann der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Footprint eines Bauteils um bis zu 40 % gesenkt werden.

Für die in 2.1.4 dargestellten Bolzen und den Nassläuferkopf werden die Product Carbon Footprints nach DIN EN ISO 14067 berechnet. Für die Berechnung wird das Berechnungstool *Foring Footprint Reduction Tool* (Fred) verwendet. Dieses Berechnungstool wurde im Rahmen der NOCARBforing 2050 Initiative des Industrieverbands Massivumformung e. V. entwickelt.

#### Bolzen

Für den als Versuchsbauteil hergestellten Bolzen wurde das Product Carbon Footprint von benötigtem Halbzeug mit Messing und Zinknetlegierung berechnet (siehe Abbildung 28). Die Substitution ermöglicht eine Reduzierung von 40 %.



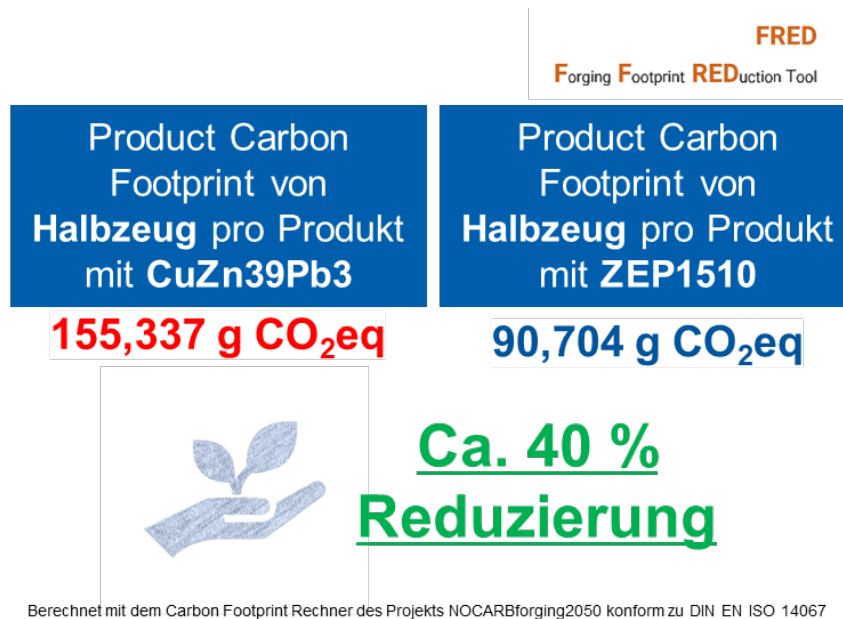


Abbildung 28: CO<sub>2</sub> Einsparpotenzial der Zinkknetlegierung ZEP1510 in der Prozesskette Kaltumformung am Beispiel des Halbzeuges für ein Bolzen

Nassläuferkopf

Für den hergestellten Nassläuferkopf wurde das Product Carbon Footprint mit Messing und ZEP1510 bis zur Umformung berechnet (siehe Abbildung 29). Da der maximale CO<sub>2</sub>-Verbrauch bei der Halbzeugherstellung zustande kommt, beträgt auch hier die Reduzierung ca. 40 %. Der CO<sub>2</sub>-Verbrauch beim Trennen, bei der Erwärmung und Umformung ist im Vergleich zum Halbzeug sehr gering.

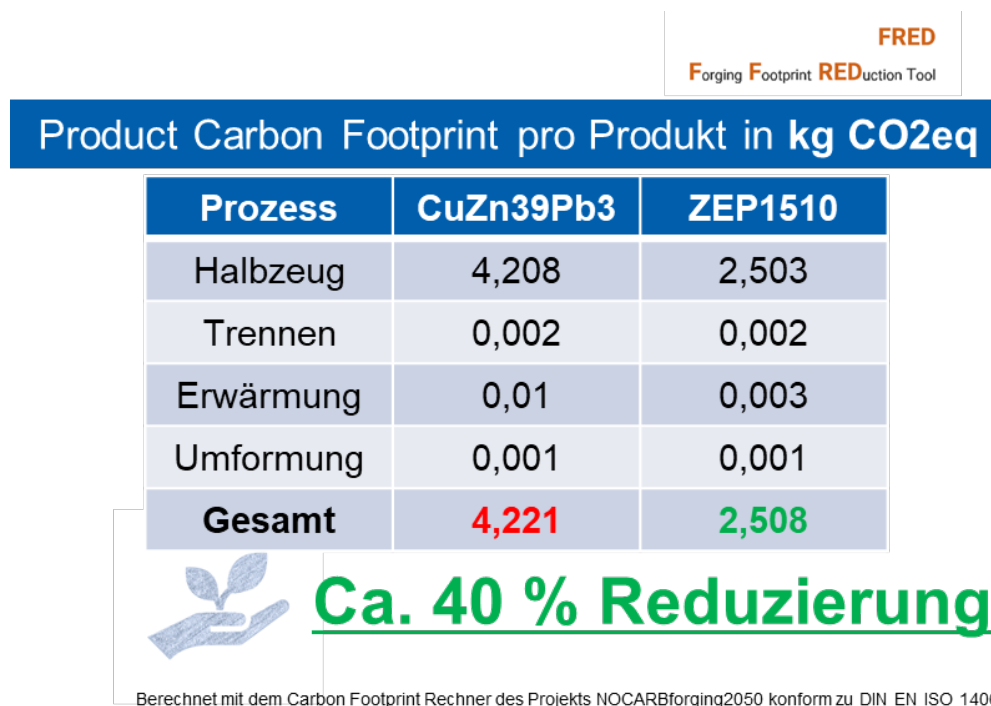


Abbildung 29: CO<sub>2</sub> Einsparpotenzial der Zinkknetlegierung ZEP1510 in der Prozesskette Warmumformung am Beispiel eines geschmiedeten Nassläuferkopfes

### **3 Verbreitung der Vorhabenergebnisse**

Bereits während der Projektlaufzeit erfolgte die Verbreitung von Zwischenergebnissen in nachfolgender Weise:

- Homepage von Fachhochschule Südwestfalen
- Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank, wo sich die Unternehmen der Branche via Internet informieren können
- Leitfaden: Zinknetlegierungen in der Massivumformung
- Nominierung für den Deutschen Rohstoffeffizienzpreis 2022

Im Jahr 2022 ist die Verbreitung der Vorhabenergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen:

- Präsentation der Ergebnisse in der Sitzung des Arbeitskreises „Werkstoffe“ der IMU am 28.06.2022
- Video zum Projekt, was im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit verwendet wird
- Fachtagung 28. Sächsischer Fachtagung Umformtechnik SFU + 7. International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT, November

## 4 Fazit

Nachdem die Europäischen Gesundheitsbehörden die Toxizität von Blei auch in sehr kleinen Mengen festgestellt haben, haben sie wiederholt die Notwendigkeit bekräftigt, die Konzentration dieses Materials in verschiedenen Bereichen so weit wie möglich zu reduzieren. Somit wird der Einsatz von Automatenmessingen nicht mehr möglich sein bzw. muss stark reduziert werden. Die Verwendung von Zinkknetlegierungen in der Massivumformung bietet eine kosteneffiziente Umstellung von bleihaltigen auf bleifreie Werkstoffe.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Umformbarkeit von Zinkknetlegierungen analysiert und im industriellen Umfeld verifiziert. Als Erstes sind die Anwendungsfelder gefunden, deren Anforderungen durch die technischen Eigenschaften des Zinkumformteils erfüllt werden und deren Einsatz energetisch sowie wirtschaftlich sinnvoll ist. Vorrangig sind Messingumformteile als Benchmark betrachtet worden. Zusätzlich wurden weitere Anwendungsfelder mit einem hohen Energieeinsparpotenzial durch die Erzeugung und Verarbeitung des Werkstoffes betrachtet. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden repräsentative Umformteile identifiziert und ausgewählt. Diese Teile wurden mit Zinkknetlegierungen im industriellen Umfeld hergestellt. Für die Ermittlung von umformtechnischen Prozessgrenzen wurden Stauchversuche für die Ermittlung der Umformbarkeit, für die Ermittlung vom Stauchverhältnis und für die Ermittlung von Schubrissen mit Zinkknetlegierungen durchgeführt und mit anderen Werkstoffen verglichen. Abschließend wurde das Potenzial für die Substitution und Energieeinsparung berechnet und beschrieben.

In diesem Forschungsvorhaben wurden bedeutende Fortschritte zur Umformung von Zinkknetlegierungen erzielt. Besonders in der Kaltmassivumformung sind besonders neue Erkenntnisse gewonnen worden, die in der industriellen Praxis eingeführt werden können. Es können durch fast keine Veränderungen mehrere Produkte aus Kupferlegierungen, die mittels Massivumformung hergestellt werden, substituiert werden.

Aktuell werden Zinkknetlegierungen nur als Stangenmaterial angeboten. Da für einen Großteil der kaltmassivumformenden Unternehmen das favorisierte Rohmaterial aber Draht ist, ist das Ziel in der zukünftigen Forschung, ZEP1510 als Draht herzustellen. Außerdem findet Messing große Anwendung in der Sanitärtechnik, da es die Kriterien der Wasserzulassung bei direktem Fluidkontakt erfüllt. Für die Herstellung von Fittings aus beispielsweise ZEP1510 mangelt es jedoch an einer Wasserzulassung der Zinkknetlegierung, die auch aufgrund der eingesetzten Legierungselemente nicht erlangt werden kann. Der Gesetzgeber lässt jedoch zu, dass trinkwasserführende Leitungen mit einer Schutzschicht überzogen werden, die dauerhaft im Kontakt mit dem Trinkwasser ist. Aus diesem Grund werden in der zukünftigen Forschung die Fittings aus ZEP und mit der Schutzschichtlösung untersucht.

## 5 Literaturverzeichnis

- [ART37] Arthur Burkhardt: *Technologie der Zinklegierungen*, 1937
- [ERW06] Erwin Haibach: *Betriebsfestigkeit; Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*; 3., korrigierte und ergänzte Auflage; Springer, Berlin, Heidelberg, 2006
- [EUR08] Europäische Kommission: *NACE Rev. 2 - Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft*; Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, 2008
- [HAR12] Hartmut Hoffmann, Reimund Neugebauer, Günter Spur: *Handbuch Umformen*, 2012
- [HEI05] Heinz Tschätsch: *Praxis der Umformtechnik; Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*; 8. Auflage, 2005
- [INT17] International Zinc Association, Broschüre, *Zink-Ein nachhaltiger Werkstoff, Für das moderne Leben unentbehrlich*, 2017
- [MAR96] Markus Knörr: *Auslegung von Massivumformwerkzeugen gegen Versagen durch Ermüdung*; Springer, 1996
- [SAB19] Sabine Grund, Eric van Genderen, Martin van Leewen: *Nachhaltigkeit – Verantwortung*, International Zinc Association, Brüssel Belgien – Zink, 2019