

Supplier- 05

# Industriestatement

Kurzbericht zu den Untersuchungen hinsichtlich  
bleifreier (<0,1%) Kupferlegierungen

von

[REDACTED]

Firma:

[REDACTED]

Support Unit: Manufacturing Solutions

Abteilung: Metal Parts Production

Gruppe: Technology Development

Stand: Oktober 2014

---

# I. Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>1.</b>	<b>Allgemein .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Klemmhülsenfertigung.....	1
1.2.	Randbedingungen.....	2
1.3.	Einflussparameter des Idealzustands .....	3
	Voruntersuchungen 2007 bis 2013.....	3
1.4.	Intensive Versuche 2013 / 2014.....	4
1.5.	Versuchsbetriebsmittel und Investitionen.....	7
1.6.	Kurzzusammenfassung: Kosten der Versuche.....	8
1.7.	Reproduzierbarkeit der Halbzeuge .....	8
1.8.	Szenariobetrachtung Umstellung auf bleifreie Legierung.....	10
1.9.	Kommentierung Zerspanbarkeitsindex .....	10
1.10.	Kommentierung Untersuchungen Mikrobohren .....	11
<b>2.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>12</b>

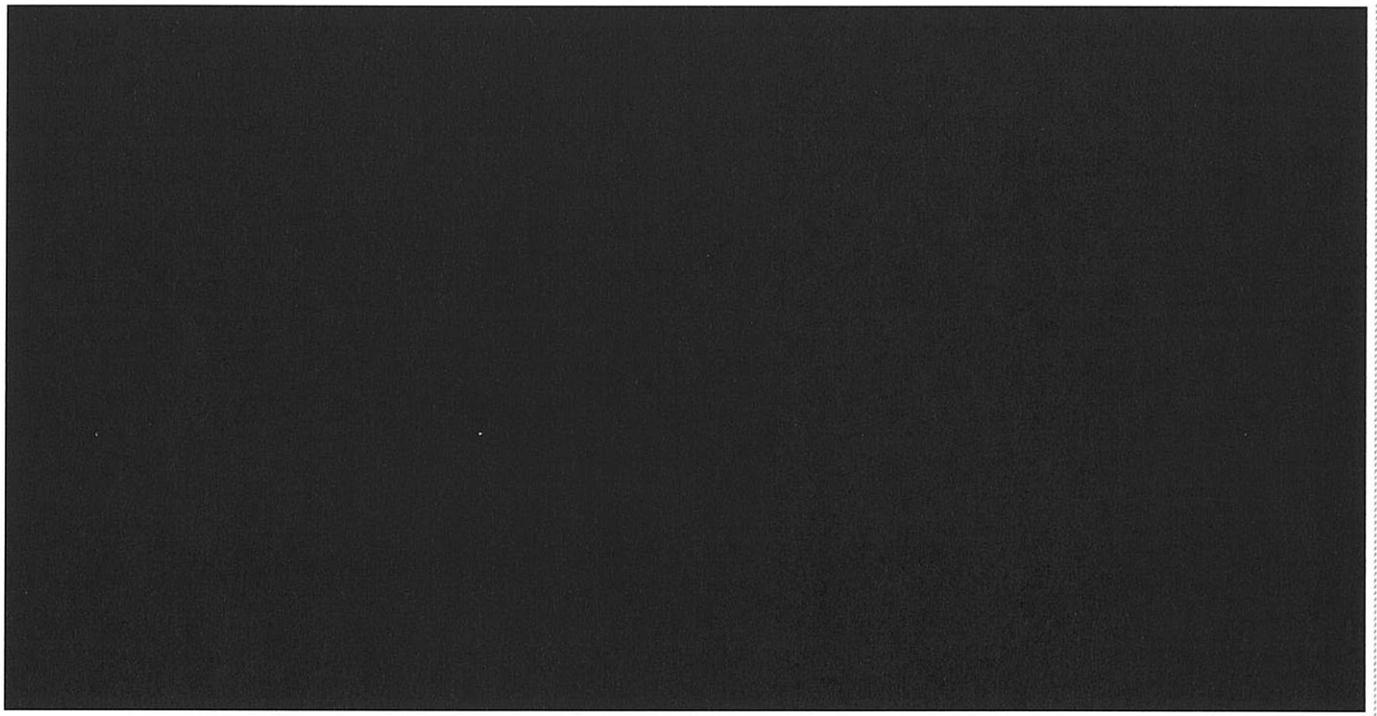
## 1. Allgemein

In diesem Kurzbericht sind die Ergebnisse und Erkenntnisse der bei Firma [REDACTED] durchgeführten Untersuchungen zum Thema bleifreie Legierungen bei der Klemmhülsenfertigung aufgeführt. Weiterhin befinden sich am Ende zwei Kommentierungen aus Anwendersicht zu Forschungsergebnissen.

### 1.1. Klemmhülsenfertigung

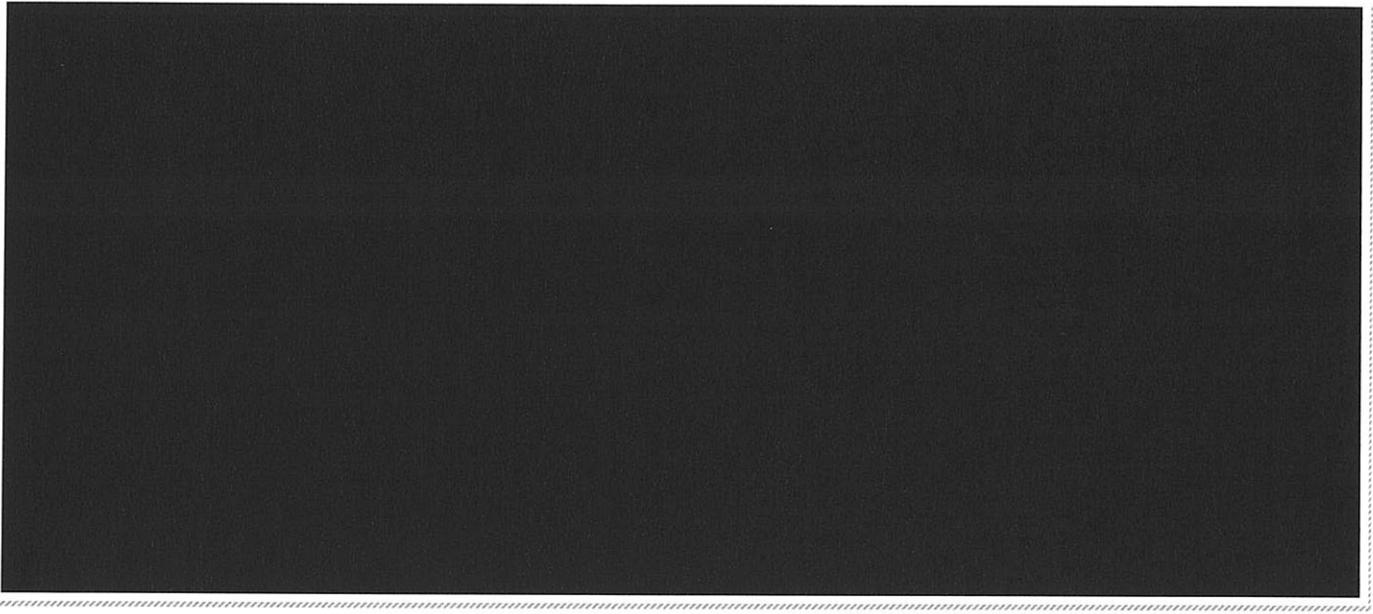
In der Abteilung *Metal Parts Production* (MPP) des Unternehmens [REDACTED] werden in der Gruppe *Machining* Klemmhülsen zer-spanend hergestellt. In dieser Produktionsgruppe werden täglich ca. 6,5 Mio. Klemmhülsen hergestellt. Die Klemmhülse gibt es in etwa 70 verschiedenen Varianten. Es wird hauptsächlich Automatenmessing zur Herstellung der Klemmhülsen auf Rundtaktautomaten verarbeitet.

Die Fertigungsschritte zur Herstellung einer Klemmhülse sind in Abbildung 1 schematisch und an einem Beispielartikel beschrieben.



**Abbildung 1: Fertigungsschritte (schematisch)**

Abbildung 2 zeigt weiterhin ein Produktbeispiel, in dem eine Klemmhülse zum Einsatz kommt. Hierbei handelt es sich um eine Reihenklemme, die zum Beispiel Anwendung in einem Schaltschrank findet. Die auf der rechten Bildseite aufgezeigten Einzelkomponenten werden auch als Klemmsystem bezeichnet.



**Abbildung 2: Einsatzbeispiel einer Klemmhülse, Klemmsystem**

### 1.2. Randbedingungen

Das Kriterium in der Fertigung zur Herstellung einer Klemmhülse aus bleifreier Legierung ist die *Zerspanbarkeit*. Wenn eine bleifreie Legierung das Automatenmessing ersetzen muss, so hat die Substitutionslegierung eine gleichwertige prozesssichere Verarbeitbarkeit in der Fertigung zu gewährleisten. Nur so ist weiterhin die Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

Neben dem Aspekt der Verarbeitung ist zum Vertreiben der Klemmhülsen auch eine *Freigabe im Labor* zwingend erforderlich. Hierzu gehört neben der Drehmomentprüfung auch eine Spannungsrisskorrosionsprüfung. Die Prüfungen sind dabei am gesamten Klemmsystem (Klemmhülse, Schraube, Strombalken, Stromleiter, vgl. Abbildung 2) nach Werknorm durchzuführen. Erst wenn beide Prüfungen bestanden sind, können die Klemmhülsen in der Montage mit den weiteren Metallteilen und einem Kunststoffgehäuse zur fertigen Baugruppe montiert werden. Nach der Montage ist die Baugruppe fertiggestellt und vertriebsfähig.

Schlussendlich muss eine optimale Lösung für eine bleifreie Legierung aufgrund der Wettbewerbssituation hinsichtlich Herstellkosten kostenneutral zum Serienwerkstoff sein.

### 1.3. Einflussparameter des Idealzustands

Bei der Betrachtung der Thematik *bleifreie Legierung* wird sehr schnell deutlich, dass es sich um eine sehr komplexe Problemstellung handelt. Daher sind in Abbildung 3 einige Einflussparameter dargestellt. Diese Auflistung ist eine Orientierungshilfe und erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. In diesem Umfeld gilt es den Idealzustand der Problemstellung zu finden.

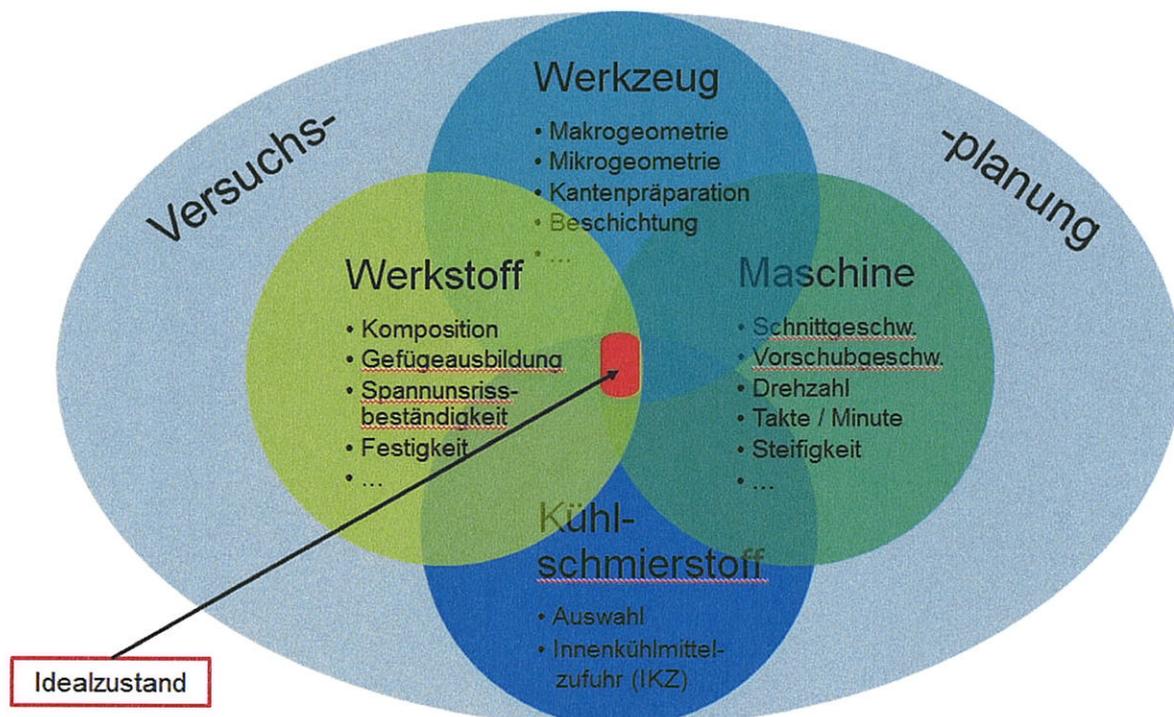


Abbildung 3: Einflussparameter des Idealzustandes

### Voruntersuchungen 2007 bis 2013

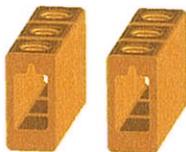
Die ersten Versuche mit bleifreien Legierungen sind im September 2007 durchgeführt worden. Bis Januar 2013 wurden dabei ca. 20 verschiedene bleifreie oder bleireduzierte Legierungen verschiedener Profildrahtabmessungen getestet. Dabei wur-

den in den meisten Fällen Mengen von 1.000 kg als Versuchsmenge bezogen und verarbeitet. Keine Legierung konnte den unter Kapitel 1.2 beschriebenen Kriterien annähernd standhalten. Die getätigten Investitionen für die in dem beschriebenen Zeitraum durchgeführten Versuche lassen sich nicht mehr zuverlässig nachvollziehen. Es wird geschätzt, dass in diesem Zeitraum eine Gesamtinvestition in Halbzeuge und Werkzeuge von 190.000 € getätigt wurde. Dabei sind nicht die Aufwände für die Zurverfügungstellung von Betriebsmittel und Einrichter zu den Versuchszwecken einbezogen worden.

#### 1.4. Intensive Versuche 2013 / 2014

Seit Februar 2013 ist ein Entwicklungsingenieur zu 100% seiner verfügbaren Zeit mit der Planung, Durchführung und Auswertung der nachfolgend beschriebenen Versuche zur Qualifizierung des Bearbeitungsprozesses beschäftigt.

Die Klemmhülsen werden in der zerspanenden Fertigung nicht als Einzelteil, sondern in einer Mehrfachbearbeitung hergestellt. Eine schematische Darstellung zeigt Abbildung 4. Ziel ist es, diese Mehrfachbearbeitung mit den bleifreien Legierungen zu erreichen.



- Status: bleihaltige Legierung / Ziel: bleifreie Legierung
- 6-fach fallende Fertigung
- zwei Einzüge je drei KLH

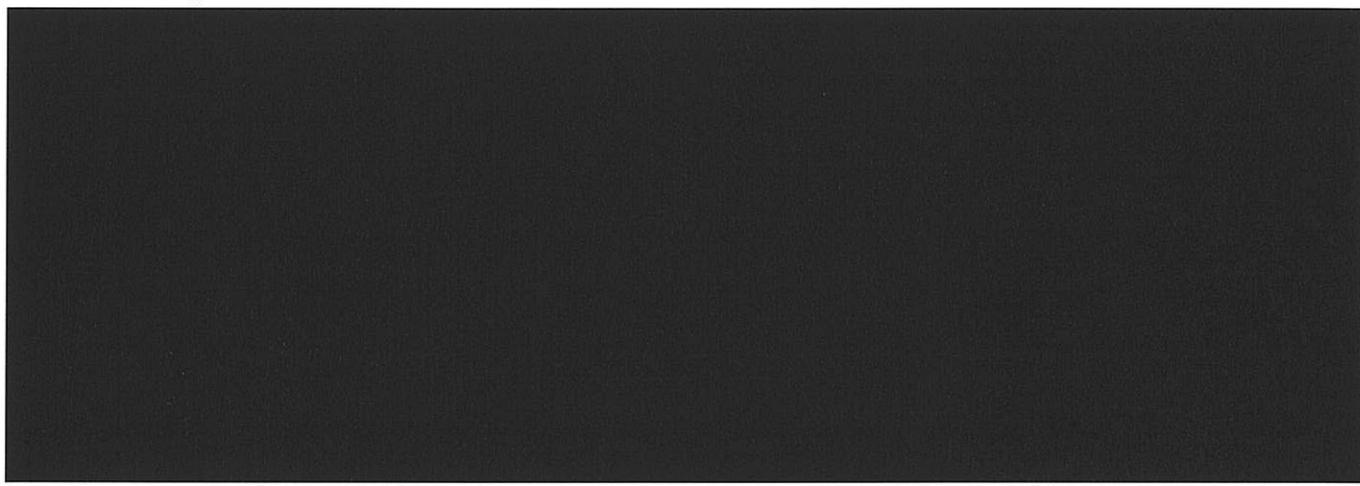
**Abbildung 4: Mehrfachbearbeitung der Klemmhülsen**

Nach intensiven Vorgesprächen mit 4 Halbzeuglieferanten wurden bleifreie Legierungen in verschiedenster Zusammensetzung bestellt und geliefert. Dabei handelte es sich beispielsweise um die bleifreien Legierungen CuZn42 und CuZn21Si3P.

Damit ein Vergleich zu dem Serienwerkstoff stattfinden kann, wurden sämtliche Maschinen und Werkzeugeinstellungen vorerst beibehalten. Als Bewertungskriterium wurde der Werkzeugverschleiß herangezogen. Beispielhaft zu nennen sind die Bohrwerkzeuge, da diese erfahrungsgemäß dem höchsten Verschleiß unterliegen. Die Bohrer werden nach einem Werkzeugwechselintervall von 1.500.000 Bohrungen -

das entspricht 4.500.000 Klemmhülsen - ausgetauscht. Das Werkzeugwechselintervall ist eine empirisch ermittelte Größe.

Bei der Bearbeitung der bleifreien Legierungen unter Serienbedingungen stellte sich sofort ein erheblicher Werkzeugverschleiß ein. Die eingesetzten Serienwerkzeuge hielten maximal 50.000 Bohrungen bei der Bearbeitung der bleifreien Legierung. Dieses entspricht nur etwa 3% der geforderten Standzeit der Bohrer. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Versuchsmethodik der Mehrfachbearbeitung (Abbildung 4) überdacht und dementsprechend angepasst. Abbildung 5 zeigt die geänderte Vorgehensweise



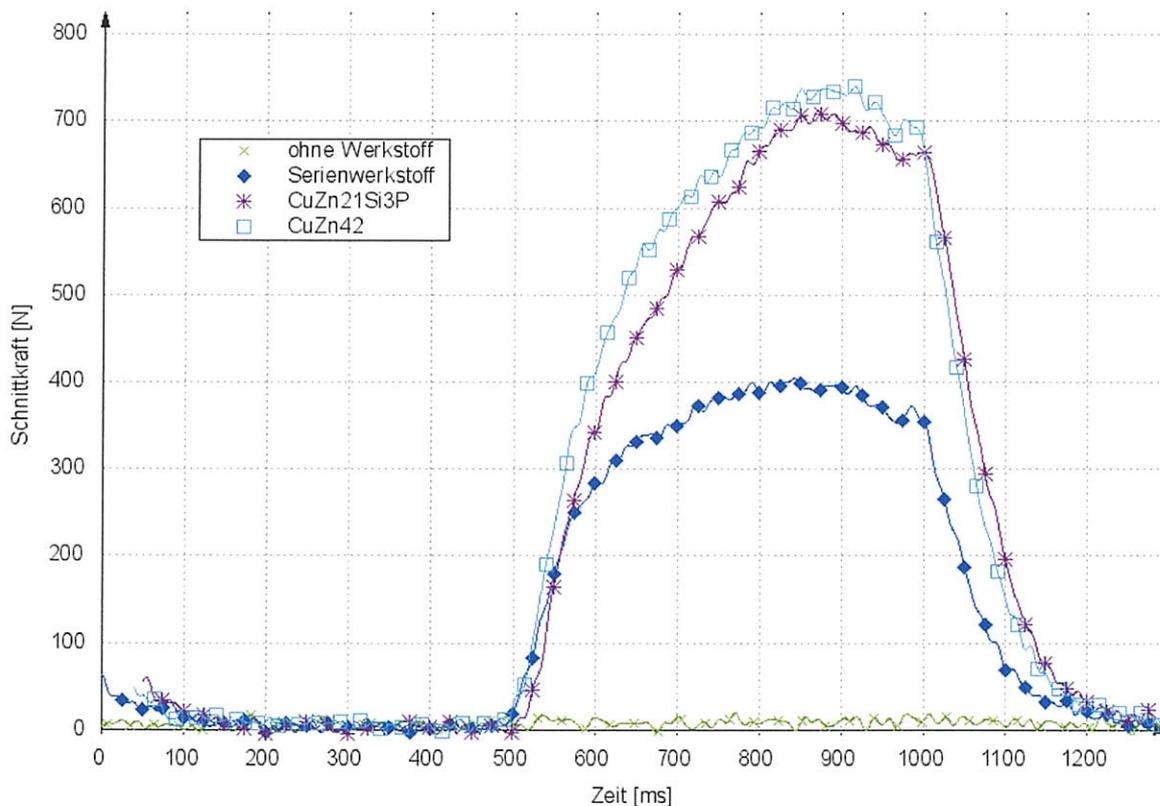
**Abbildung 5: angepasste Versuchsmethodik**



**Dieser Schritt diente einzig und alleine der weiteren Versuchsdurchführung und ist nicht als Fertigungsstrategie in der Serienproduktion zu verstehen. Nur die 6-fach fallende Fertigung stellt eine wirtschaftliche Produktion dieses Beispielartikels sicher.** Allerdings sollten hiermit Erkenntnisse und Ergebnisse von Werkzeugtest gewonnen werden.

Im ersten Schritt wurden verschiedene bleifreie Halbzeuge mit dem Serienwerkstoff verglichen werden. Hierbei kamen ausschließlich Serienwerkzeuge zum Einsatz. Die Vergleichsergebnisse aus den Schnittkraftdaten sind Abbildung 6 zu entnehmen.

Schnittkräfte der Bohreinheit, Serienwerkzeug,  $d = 3,1 \text{ mm}$ ,  $n = 14600 \text{ min}^{-1}$ ,  $t = 6 \text{ mm}$ ,  
Messung jeweils bei Takt 50.000



**Abbildung 6: Vergleich Schnittkräfte bleihaltig/ bleifrei**

Bei den Schnittkräften ist zu erkennen, dass bei den bleifreien Legierungen deutlich höhere Werte vorliegen. In diesem Fall ist das das 1,75 fache verglichen zur bleihaltigen Legierung.

Im darauffolgenden Schritt wurden mit 7 verschiedenen Werkzeuglieferanten diverse Optimierungen der Werkzeuggeometrie und/oder der –beschichtung durchgesprochen. Teilweise war die Thematik bei den Werkzeuglieferanten noch gar nicht bekannt, so dass diese sich auch erst einmal von Grund auf darauf einstellen und Know-How aufbauen müssen. Schlussendlich lagen 35 verschiedene Varianten an Bohrer und Fräsern zur Versuchsbearbeitung vor.

Die Versuche sind noch nicht komplett abgeschlossen. Allerdings wurde bisher noch keine Werkzeug- Variante für das Bohren und das Fräsen gefunden, die den Anforderungen an die Standzeit annähernd genügen.

Auch bei den Gewindewerkzeugen zeigte sich sehr deutlich, dass kein für die bleifreie Legierung ausgelegtes Werkzeug den Anforderungen gerecht wird. Die drei verschiedenen getesteten Versuchswerkzeuge sind nach weniger als 1000 Gewinden abgebrochen. Dieses entspricht bei einer Serienstandzeit von 1.500.000 Gewinden lediglich 0,6% der geforderten Standzeit.

### **1.5. Versuchsbetriebsmittel und Investitionen**

Das beschriebene, sehr umfangreiche Versuchsprogramm konnte nicht im laufenden Produktionsumfeld umgesetzt werden. Durch die laufende Produktion mit den Produktionsaufträgen und festgesetzten Lieferterminen hätten die Versuche immer wieder unterbrochen und die Betriebsmittel für unterschiedliche Klemmhülsenvarianten priorisiert für die Produktion umgebaut werden müssen. Dieses hätte eine nicht einheitliche Versuchsvorgehensweise und damit einhergehend nicht vergleichbare Versuchsführung zur Folge gehabt. Daher wurde mit der Produktion zusammen entschieden, dass ein Betriebsmittel aus der Auftragsabwicklung herausgelöst wird und nur für Versuche zum Thema bleifreie Legierungen zur Verfügung steht.

Weiterhin wurde organisatorisch festgelegt, dass ein Mechaniker für Einricht- bzw. Umbautätigkeiten am Betriebsmittel, sowie die Versuchsdurchführung zur Verfügung steht. Dieses hat natürlich Einfluss auf die Auftragsabwicklung und die zur Verfügung stehenden Produktions- bzw. Mechanikerkapazitäten. Das zur Verfügung stellen des Betriebsmittels plus des Mechanikers verursacht zusätzliche Kosten in Höhe von ca. 36.000 €.

Weiterhin sind die Betriebsmittel standardmäßig nicht mit einer Messtechnik ausgerüstet. Um die bleifreien Werkstoffe mit dem Serienwerkstoff vergleichbar zu machen, mussten Investitionen in neue Messtechnik des Versuchsbetriebsmittels getätigt werden. Diese Investitionen beliefen sich insgesamt auf ca. 40.000 €. Die aufgezeigten Kosten sind nur die Anschaffungskosten. Die Aufwände für Ein- bzw. Umbau an Betriebsmittel und die Inbetriebnahme können nicht mehr beziffert werden. Für die Auswertung der Daten der Messsysteme wurde intern noch eine statistische Versuchsauswertung programmiert. Der Aufwand dafür beläuft sich auf ca. 3.000 €.

**1.6. Kurzzusammenfassung: Kosten der Versuche**

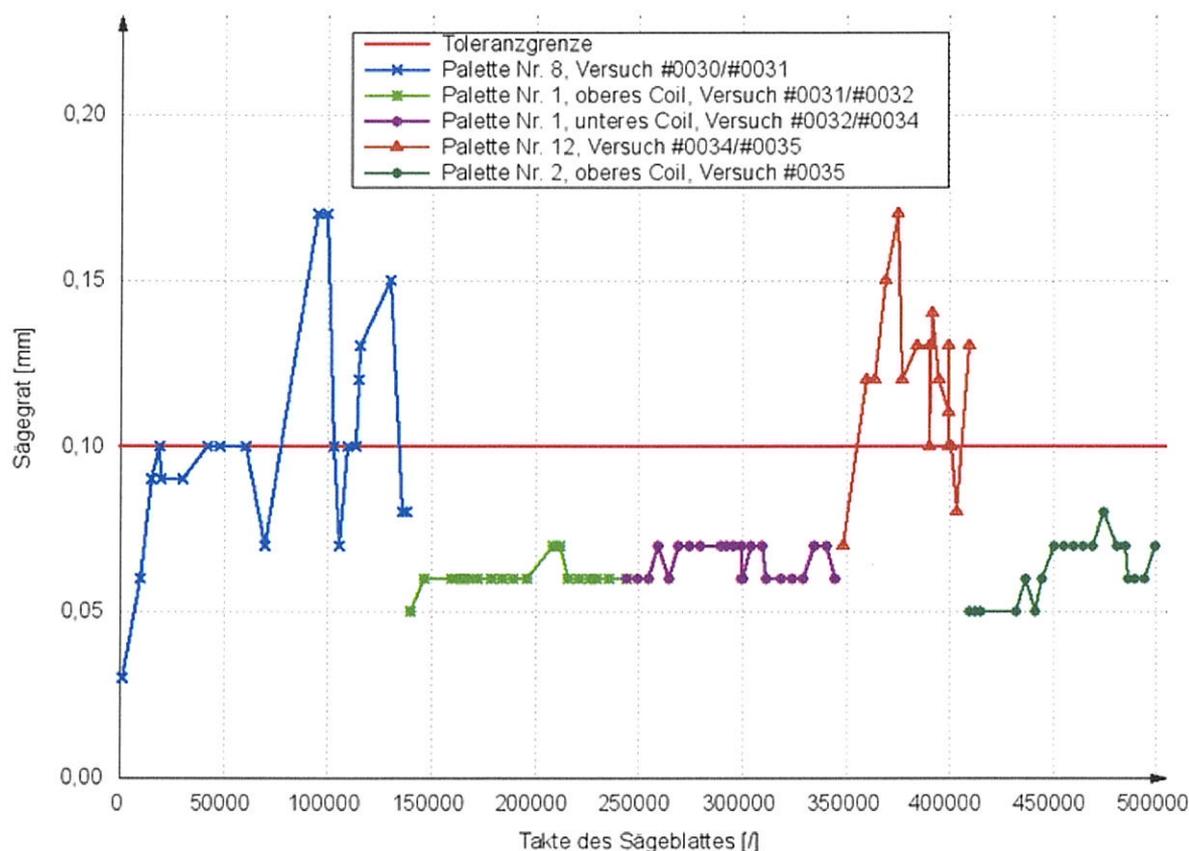
[Redacted text]

[Redacted text]

[Redacted text]

**1.7. Reproduzierbarkeit der Halbzeuge**

Während der Versuchsdurchführung wurde eine bleifreie Legierung für Standzeitversuche der Werkzeuge in einer Großmenge von 10 to. geordert. Es hat sich gezeigt, dass es innerhalb der bestellten Charge unterschiedliche Zerspanungsergebnisse gibt. Abbildung 7 zeigt die Auswirkungen dieser Feststellung.



**Abbildung 7: unterschiedliche Sägegrate bei einer bleifreien Legierung**

In der Darstellung ist der zulässige Sägegrat über der Taktzahl eines Sägeblattes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass unterschiedliche Paletten der Charge verschiedene Sägegrate an den produzierten Teilen hervorrufen. Alle Teile mit Sägegrat über 0,1mm wären dabei Ausschuss. Es lässt sich daher feststellen, dass die Qualität innerhalb der großen Charge unterschiedlich und für einen Serienprozess ungeeignet ist.

Inzwischen hat das Halbzeugwerk die Ursache für dieses Sachverhalt identifiziert. Um die Serientauglichkeit zu überprüfen, müsste jedoch eine erneute Charge von 10 to. bestellt werden. Dieses ist derzeit, auch aus Kostengesichtspunkten, nicht geplant.

### 1.8. Szenariobetrachtung Umstellung auf bleifreie Legierung

Im Folgenden ist eine Szenariobetrachtung aufgestellt, die verdeutlicht, welche Konsequenzen eine Umstellung von bleihaltiger auf bleifreie Legierung mit sich bringt.

Die Taktrate der Betriebsmittel müsste aufgrund der schwerer zerspanbaren Legierung drastisch reduziert werden. Dieses hat zur Folge, dass die Produktionskapazität um 31% niedriger ist. Damit ist die heutige Lieferfähigkeit nicht mehr gewährleistet. Um diese Differenz auffangen zu können und damit wieder lieferfähig zu werden, müsste dementsprechend in Maschinen - d.h. Produktionskapazität - investiert werden. Bei der betrachteten Fertigung wären das 19 Maschinen.

Zum einen bedeutet dieses eine zusätzliche Maschineninvestition von insgesamt 10.450.000 €. Zum anderen wurde ermittelt, dass ein Betriebsmittel pro Jahr vom Energiebedarf umrechnet eine CO<sub>2</sub>- Ausstoß von 11 to. hat. Die zusätzlichen Maschinen in dem Szenario mit bleifreiem Werkstoff würden dementsprechend 209 to. mehr an CO<sub>2</sub> ausstoßen, als die jetzige Fertigung mit bleihaltigem Material.

### 1.9. Kommentierung Zerspanbarkeitsindex

Im Schlussbericht des Forschungsvorhabens des WZL der RWTH Aachen geht der Autor unter anderem auf das Thema Zerspanbarkeitsindex ein (Nobel, 2013; S.90 ff.). Es wird erläutert, dass der Zerspanbarkeitsindex eine Zahl ist, die sich aus vier verschiedenen Kriterien zusammensetzt. Diese sind Spanform, Werkzeugverschleiß, Zerspankraft und Oberflächenqualität. Mittels Nutzwertanalyse werden die Kriterien unter verschiedenen Gewichtungen zusammengeführt. Die Gewichtungen sind dabei abhängig von der jeweiligen Bearbeitungsaufgaben.

Dieses ist ein wichtiger Punkt aus Anwendersicht. Je nach Bearbeitungsaufgabe differieren die Gewichtungen der Einzelkriterien und haben demzufolge auch unterschiedliche Ergebnisse des Zerspanbarkeitsindex zur Folge. Anzuführen ist hier beispielsweise die bleifreie Legierung CuZn21Si3P (Ecobrass) vom Halbzeuglieferanten Wieland. In deren Datenblatt ist eine Zerspanbarkeit von 80 genannt.

In dem Schlussbericht vom WZL sind jedoch Zerspanbarkeitsindexe, je nach Gewichtungen, von 60 bis 69 berechnet worden. Daher gibt es schon einmal unterschiedliche Aussagen über die Zerspanbarkeit der genannten Legierung.

Fazit: Bei der Versuchsplanung und -durchführung beim Anwender kann durchaus der Zerspanbarkeitsindex ein entscheidender Punkt bei der Auswahl der Legierung sein. Aus Erfahrung bei [REDACTED] ist es daher durchaus ratsam, beim Zerspanbarkeitsindex genauer hinzuschauen und gegebenenfalls anzufragen, unter welchen Bearbeitungsbedingungen und Gewichtungen der Zerspanbarkeitsindex genau ermittelt wurde. Denneine Legierung kann bei der Bearbeitung bei Steckkontakten funktionieren, bei Klemmhülsen wiederum nicht.

#### 1.10. Kommentierung Untersuchungen Mikrobohren

Das Deutsche Kupferinstitut hat zusammen mit dem WZL der RWTH Aachen Untersuchungen zum Thema Mikrobohren durchgeführt (Kupferinstitut, 2013). Dabei ging es um den Vergleich von verschiedenen bleifreien Legierungen gegenüber der bleihaltigen Legierung CuZn39Pb3. Die Bohrverhältnisse waren dabei 1mm Durchmesser bei 10mm Bohrtiefe. Das entspricht einem Verhältnis von  $l/d = 10$ .

Bei den Ergebnissen zum Werkzeugverschleiß (S.21, Abbildung 16) ist zu erkennen, dass zwei von drei bleifreien Legierungen die geforderten 1000 Bohrungen erst gar nicht erreichen. Die bleifreie Legierung, die die 1000 Bohrungen erzielt hat, hatte vergleichend zur CuZn39Pb3 Legierung die doppelten Schnittkräfte.

Die angeführten Ergebnisse der Untersuchungen wurden mit der so genannten Fertigungsstrategie 4 durchgeführt. Diese beinhaltet, dass die 10mm Bohrtiefe in zehn aufeinanderfolgenden Bohrungen je 1mm mit vollständigem Entlüften erstellt wurden.

Fazit: Aus der Praxissicht von [REDACTED] (Bohrverhältnis  $l/d > 5$ , Anforderungen an einen Bohrer: min. 1.500.000 Bohrungen) zeigen die mit der Fertigungsstrategie 4 untersuchten bleifreien Legierungen keine für die Massenfertigung annäherungsweise akzeptablen Ergebnisse.

## **2. Literaturverzeichnis**

Kupferinstitut, D. (2013). *Influence of lead in mirco drilling of copper alloys with diameter of 1mm*. Düsseldorf.

Nobel, C. et. al. (2013). *Entwicklung einer Hochleistungserspannung für schwererspanbare bleifrei Kupferknet- und Gusslegierungen*. Aachen.