

# Methode zur kostenoptimalen Losgrößenbildung unter der Berücksichtigung des Verschleißes

Method for lot sizing planning in consideration of die wear

Alexander Martini  
Jan Langner  
Malte Stonis  
Bernd-Arno Behrens

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

**W**erkzeugverschleiß ist für Schmiedeunternehmen von großer wirtschaftlicher Relevanz. Neben den Instandhaltungskosten fallen ebenfalls Kosten für verschleißabhängige Ausschussteile an. Im Zuge des Forschungsprojektes „Verfahren zur kostenoptimalen Losgrößenbildung unter Berücksichtigung des Verschleißes von Schmiedewerkzeugen“ wurde eine Methode zur Ermittlung bauteilindividueller Kostenfunktionen in Abhängigkeit des Verschleißes entwickelt. Die Methode ermöglicht die Bestimmung einer Losgröße, mit der eine maximale Kosteneinsparung erzielt werden kann.

[Schlüsselwörter: Losgrößenbildung, Werkzeugverschleiß, Methode, Softwaredemonstrator, Schmiedewerkzeuge]

**T**ool wear is of great economic relevance for forging companies. In addition to the maintenance costs, wear-related rejects are also produced. In the course of the research project “Processes for lot sizing planning in consideration of abrasion”, a method was developed for the determination of component-specific cost functions depending on the tool wear. The method allows the determination of a lot size, that leads to a most cost saving production.

[Keywords: lot sizing planning, tool wear, method, software demonstrator, forging tools]

## 0 ALLGEMEINES VORGEHEN

Die Losgrößenbildung ist eine elementare Aufgabe der Produktionsplanung, um einen effizienten Prozessablauf zu gewährleisten. Bisherige Modelle zur Berechnung der kostenoptimalen Losgröße berücksichtigen üblicherweise Herstellkosten, Auftragsauflagekosten und Lagerhaltungskosten [Mue13, And29]. Der Aspekt von Instandhaltungskosten durch losgrößenabhängigen Verschleiß

wurde bisher vernachlässigt. In der Schmiedeindustrie findet die Herstellung von Bauteilen mittels Werkzeugen, den sogenannten Gesenken, statt. Diese Gesenke unterliegen vielfach einem abrasiven Verschleiß. Dieser wird u. a. beeinflusst durch thermischen Wechselbelastungen, sowohl im Umformprozess als auch beim Ein- und Ausbau der Werkzeuge. Durch die Erwärmung des Gesenkes auf die Werkzeuggrundtemperatur und der abschließenden Abkühlung bei Produkt- oder Schichtwechsel entsteht ein losgrößenabhängiger, thermischer Zyklus. Die thermischen Belastungen, die mit solchen Zyklen einhergehen, beeinflussen den Werkzeugverschleiß und damit einhergehend den Umfang der benötigten Instandhaltungsmaßnahmen. Innerhalb des am IPH durchgeführten Forschungsprojektes „Verfahren zur kostenoptimalen Losgrößenbildung unter Berücksichtigung des Verschleißes von Schmiedewerkzeugen“ wurde untersucht, in wieweit die thermischen Zyklen zwischen zwei Losen Einfluss auf den kumulierten Werkzeugverschleiß und somit auf die Berechnung einer kostenoptimalen Losgröße haben [Lav11]. Um den im Projekt ermittelten Einfluss für industrielle Unternehmen zugänglich zu machen, wurde eine Methode erarbeitet, welche die Vorgehensweise zur Anwendung eines um den Werkzeugverschleiß erweiterten Losgrößenberechnungsverfahrens ermöglicht. Diese Methode soll Unternehmen die praktische Anwendung des erweiterten Losgrößenberechnungsverfahrens ermöglichen. Durch die systematische Anwendung des projektintern entwickelten Softwaredemonstrators wird eine wirtschaftliche Optimierung expliziter Fertigungsprozesse unterstützt. Durch die Verwendung der angeführten Methode und des Softwaredemonstrators können Produktions- und Fertigungsplaner zukünftig die kostenoptimale Losgröße prozessspezifisch berechnen und wirtschaftliche Folgen einer Abweichung erkennen [Pri16].

Die Methode zur Prozessoptimierung durch die Berücksichtigung des losgrößenabhängigen Werkzeugverschleiß-

bes ist in allgemeiner Form Bild 1 zu entnehmen. Im Folgenden werden die genauen Handlungsschritte P1 bis P7 erklärt und anhand eines Beispielprozesses verdeutlicht.

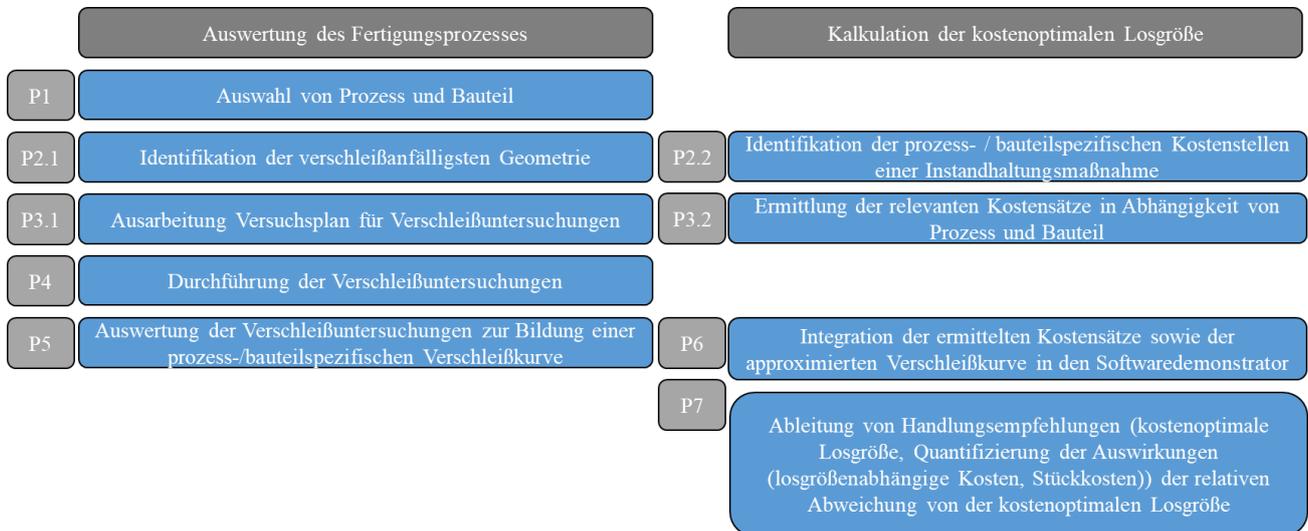


Bild 1: Methode zur Bestimmung einer verschleißabhängigen, kostenoptimalen Losgröße

## 1 AUSWAHL VON PROZESS UND BAUTEIL (P1)

Die entwickelte Methode ist universell für alle verschleißbedingten Schmiedeprozesse adaptierbar. Grundsätzlich steht zu Beginn die Auswahl des zu betrachtenden Prozesses, bzw. Bauteils, für den das erweiterte Losgrößenberechnungsverfahren durchgeführt werden soll.

Zur Verdeutlichung der folgenden Vorgehensweise wurde ein exemplarisches Bauteil ausgewählt, das eine einfache Verschleißuntersuchung an den korrespondierenden Schmiedegesenken ermöglicht (Bild 2). Da Werkzeugbereiche mit konvexen Radien in der Theorie in besonderem Maße Verschleißerscheinungen aufweisen [Zhi13], wurde die im Beispielprozess verwendete Versuchsgeometrie diesbezüglich konzipiert und eine tiefe Senke in das Versuchsbauteil konstruiert (Bild 2 rot).

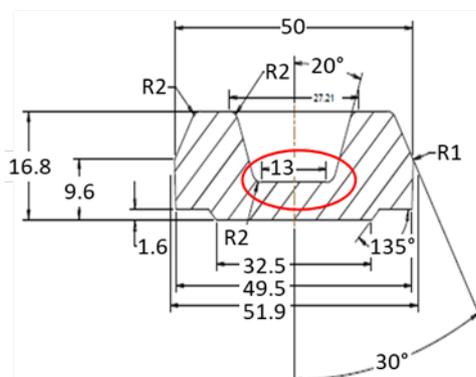


Bild 2: Exemplarische Werkstückgeometrie für die Projektuntersuchungen

## 2 IDENTIFIKATION DER VERSCHLEISSANFÄLLIGSTEN WERKZEUGBEREICHE (P2.1)

Im Anschluss an die Prozessauswahl gilt es, die verschleißanfälligsten Bereiche der Geometrie vorzeitig zu identifizieren. Bei bereits durchgeführten bzw. im Betrieb laufenden Prozessen können diese Geometrien auf Basis von Erfahrungen oder der Auswertung verwendeter Schmiedegesenke identifiziert werden. Bei geplanten Prozessen, über die noch keine verschleißbedingten Erfahrungswerte bestehen, ermöglichen FEM-Simulationen eine schnelle Identifikation der verschleißanfälligsten Bereiche der Geometrie. Mit Hilfe einer gängigen Simulationssoftware (bspw. FORGE NXT, SIMUFACT.FORMING) lässt sich der Gesamtverschleiß eines Schmiedegesenks aufwandsarm darstellen und die Maximalwerte mit zugehörigen Geometrien extrahieren. In FEM-Simulationen kann der Einfluss von verschiedenen Losgrößen und damit der unterschiedlichen Anzahl thermischer Zyklen auf den Gesenkverschleiß aktuell nicht untersucht werden, da aktuelle Verschleißmodelle lediglich Normalbewegungen berücksichtigen. Die Simulation der Verschleißerscheinungen ermöglicht lediglich eine zielgerichtete Identifikation der verschleißrelevanten Gesenkgeometrien. Der Verschleiß an diesen Geometrien ist in den meisten Fällen für die Limitierung der Standmenge und die Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme mit einhergehenden Instandhaltungskosten verantwortlich. Die Identifikation der Verschleißmaxima führt im Folgenden zu einer vereinfachten Untersuchung des Verschleißverlaufs, da eine Fokussierung auf die essenziellen Bereiche der Geometrie ermöglicht wird.

Für die in Kapitel 1 ausgewählte Bauteilgeometrie wird bspw. eine Gesenkgeometrie benötigt, die konvexen Radien im Bereich des Stempels aufweist. In diesen Bereichen sind in den qualitativ ausgewerteten FEM-Simulationen bestehende Verschleißspitzen deutlich erkennbar. Die Darstellung der Verschleißsimulationen ist in Bild 3 zu sehen. Auf der Skala ist die Verschleißtiefe in  $\mu\text{m}$  nach 1000 Schmiedezyklen zu erkennen. Im Obergesenk im Bereich des konvexen Radius des Stempels ist der Verschleiß mit  $33,6 \mu\text{m}$  am höchsten. Im Untergesenk ist der Verschleiß im Bereich des Gratspaltes am höchsten, jedoch mit  $4 \mu\text{m}$  etwa um den Faktor 8 geringer als im Radius des Stempels des Obergesenks [Ric17]. Der Stempelradius wurde somit als verschleißanfälligste Geometrie identifiziert.

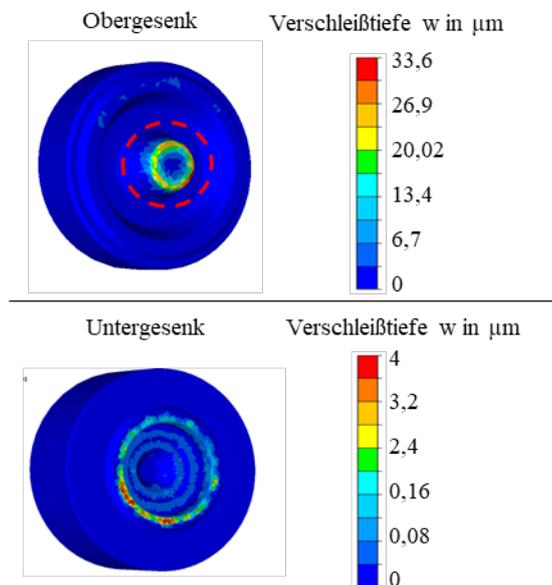


Bild 3: Simulative Ermittlung des abrasiven Verschleißes an Ober- und Untergesenk nach 1000 Schmiedezyklen

### 3 ERMITTLUNG DER FALLSPEZIFISCHEN ABHÄNGIGKEITEN ZWISCHEN LOSGRÖßE UND WERKZEUGVERSCHEIß (P3.1; P4)

Für die Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen Losgröße und Werkzeugverschleiß muss jeder Prozess individuell betrachtet und der Einfluss unterschiedlicher Losgrößen auf den Werkzeugverschleiß untersucht werden. Um diese Abhängigkeiten zu ermitteln, bestehen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen.

Zum einen kann für eine detaillierte Identifikation des Einflusses die Produktion vorübergehend mit unterschiedlichen Losgrößen provoziert werden. Hierfür muss eine konstante Produktionsmenge mit mindestens drei unterschiedlichen Losgrößen hergestellt werden. Um die Abhängigkeit zwischen Losgröße und Gesenkverschleiß genau ermitteln zu können, müssen während der Produktion – ausgenommen der Losgröße – alle übrigen Prozessparameter (z. B. Presskraft, Schmierung, Aufwärm- und Handlingszeiten) konstant gehalten werden. Im Anschluss werden die nach

Kapitel 2 identifizierten verschleißanfalligen Geometrien vermessen und die Formabweichung (abrasiver Verschleiß) für die drei „Versuchsreihen“ aufgenommen. In Abhängigkeit des Prozesses, bzw. der Gesenkgeometrie, kann diese Messung durch Radienlehren, optische oder taktile Messsysteme ermittelt werden.

Zum anderen besteht für eine vereinfachte Näherungslösung die Option, nach der Herstellung eines Fertigungsloses  $x_1$  den Zustand, bzw. Verschleiß des verwendeten Gesenks  $\Delta w(x_1)$  zu überprüfen. Der so gemessene Verschleiß kann im Anschluss über eine Dreisatzrechnung für eine alternative Produktionsmenge nach Gleichung 1 extrapoliert und die kumulierte Formabweichung  $\Delta w(x_i)$  ermittelt werden.

$$\Delta w(x_i) = \frac{\Delta w(x_1)}{x_1} * x_i \quad \text{für } x_i > 0 \quad (1)$$

Innerhalb des hier betrachteten exemplarischen Prozesses wurde eine Produktionsmenge von 1000 Werkstücken unter Einsatz der Losgrößen 100, 500 und 1000 gefertigt (Bild 4).

Versuchsreihe	I	II	III
Losgröße	100	500	1000
Anzahl der Fertigungslose	10	2	1
Anzahl der thermischen Zyklen	10	2	1
Anzahl Teile pro Werkzeug	1000	1000	1000

Bild 4: Parameter zur experimentellen Untersuchung des losgrößenabhängigen Verschleißes

Um einen verschleißanfalligen Fertigungsprozess zu simulieren, wurden die Gesenke in diesem Beispiel aus dem Werkstoff 1.2343 gefertigt und lediglich auf HRC 44 vergütet. Durch diese vergleichsweise geringe Härte wurde ein erhöhtes Verschleißverhalten provoziert, wodurch die zu untersuchenden Abhängigkeiten zwischen Losgröße und Werkzeugverschleiß besser verdeutlicht werden können. Außerdem wurden die Schmiedegesenke zur Beschleunigung des Werkzeugverschleißes mit Hilfe eines Gasbrenners vorgeschädigt.

Die Obergesenke der Versuchsreihen I, II und III wurden mit dem optischen 3D-Scanner ATOS Core 80 des Herstellers GOM vermessen und im Bereich des Dornes miteinander verglichen. In Bild 5 sind oben die jeweiligen Messaufnahmen der Werkzeuge im Bereich des Dorns zu sehen, während unten die ermittelten Verschleißwerte gezeigt sind.

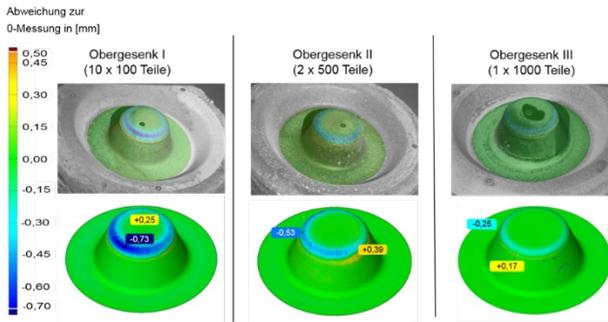


Bild 5: Optische Verschleißmessung der Obergesenke [Ric17]

Die Verschleißerscheinungen treten am Dorn in zwei verschiedenen Formen auf. Zum einen ist abrasiver Verschleiß zu erkennen, welcher durch Werkstoffreduzierung an dem Dornradius erkennbar ist. Zum anderen tritt plastische Verformung in Form einer Ausbeulung des Dorns auf (siehe Bild 5). Da beide Verschleißarten Einfluss auf das fortlaufende Prozessverhalten haben, sind auch beide Varianten für eine Auswertung relevant. Es wird deutlich, dass der abrasive Verschleiß im Bereich des konvexen Radius des Dorns beim Schmieden von 10 x 100 Teilen -0,73 mm beträgt während der Verschleiß beim Schmieden von 2 x 500 Teilen bei -0,53 mm und beim Schmieden von 1 x 1000 bei lediglich -0,25 mm liegt [Ric17]. Als Vergleichsbasis diente die vor den Versuchen durchgeführte 0-Messung der baugleichen Gesenke im nicht verschlissenen Werkzeugzustand.

#### 4 AUSWERTUNG DER VERSCHLEIBUNTERSUCHUNGEN ZUR BILDUNG EINER PROZESS- UND BAUTEILSPEZIFISCHEN VERSCHLEIBFUNKTION (P5)

Basierend auf den gemessenen Verschleißwerten kann nun eine Verschleißfunktion aufgestellt werden. Zu diesem Zweck muss dem Schmiedegesenk für den bestehenden Prozess eine maximal zulässige Formabweichung  $\Delta w_{max}$  zugeordnet werden, ab der das Schmiedegesenk nicht mehr für die Fertigung eines Gutteils verwendet werden kann. Eine solche individuelle Einschätzung wird in der Praxis durch die vom Kunden geforderte Qualität der Werkstücke beeinflusst. Diese Qualität ist den geforderten Form- und Lagetoleranzen des Werkstücks zu entnehmen. Die resultierende maximale Formabweichung ist produzierenden Unternehmen meist bekannt und wird aktuell durch Markierungen der Verschleißgrenze im Schmiedegesenk visualisiert.

Durch die Normierung der losgrößenabhängigen kumulierten Formabweichungen  $\Delta w(x_i)$  entstehen nach Gleichung 2 normierte Verschleißwerte zwischen null und eins, die in ihrer Gesamtheit eine spezifische losgrößenabhängige Verschleißfunktion bilden.

$$VF(x_i) = \frac{\Delta w(x_i)}{\Delta w_{max}} \quad \text{für } x_i > 0 \quad (2)$$

- $VF(x_i)$  normierter Verschleißwert
- $\Delta w(x_i)$  Formabweichung bei der Losgröße  $x_i$
- $\Delta w_{max}$  maximal zulässige Formabweichung
- $i$  Index für Messwerte I bis III
- $x_i$  Losgröße bei der Verschleißmessung

Innerhalb des zuvor angegebenen Beispielprozesses wurde festgelegt, dass eine Formabweichung von  $\Delta w > 1$  mm eine nicht zu tolerierende Abweichung und die produzierten Teile somit Ausschuss darstellen. Durch eine Normierung der gemessenen Formabweichung (Gleichung 2) wird das Aufstellen einer resultierenden losgrößenabhängigen Verschleißfunktion ermöglicht, die sich aus den einzelnen normierten Verschleißwerten zusammensetzt (Bild 6).

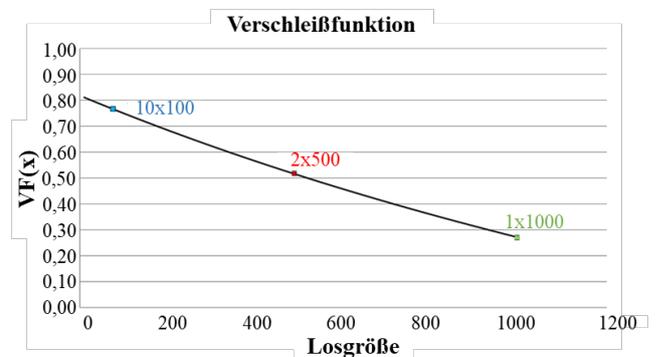


Bild 6: Spezifische losgrößenabhängige Verschleißfunktion

#### 5 IDENTIFIKATION DER RELEVANTEN KOSTENSÄTZE IN ABHÄNGIGKEIT VON PROZESS UND BAUTEIL (P2.2; P3.2)

Zusätzlich zu den losgrößenabhängigen Verschleißeigenschaften des Fertigungsprozesses muss eine fallspezifische Instandhaltungsmaßnahme geplant werden, welche das Werkzeug in den Grundzustand zurückversetzt. Diese Instandhaltungsmaßnahme kann unterschiedliche Reparaturmaßnahmen (z. B. Nachsetzen der Gravur, Nachpolieren, Schweißreparatur) sowie die Neufertigung des Schmiedegesenks beinhalten. Eine spezifische Instandhaltungsmaßnahme führt zu Instandhaltungskosten, die von dem notwendigen Maßnahmenaufwand abhängig sind. Eine differenzierte Betrachtung des Instandhaltungsaufwands in unterschiedliche Kostenstellen ermöglicht eine Quantifizierung der direkten Instandhaltungskosten [Zha90]. Diese Kostenstellen lassen sich unterteilen in Fremddienstleistungen ( $C_f$ ), Material und Ersatzteile ( $C_m$ ), Energie ( $C_e$ ), Hilfs- und Betriebsstoffe ( $C_h$ ), Betriebsmittel ( $C_b$ ), Personal ( $C_p$ ) und Stillstand ( $C_s$ ). Jede dieser Kostenstellen hat während der Instandhaltung einen finanziellen Aufwand,

der den jeweiligen Kostensatz darstellt. Aus Veranschaulichungsgründen wird die Summe der einzelnen Kostenstellen im Folgenden zu  $c_g$  zusammengefasst.

Die Annahme, dass mit fortschreitendem Werkzeugverschleiß die Wahrscheinlichkeit für eine kostenintensivere Instandhaltungsmaßnahme steigt, führt zu der Entstehung divergierender Instandhaltungsaufwände bzw. Kosten in Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes. Dieser Zusammenhang ermöglicht das Aufstellen einer von der Losgröße  $x$  abhängige Instandhaltungskostenfunktion  $IK$  für eine Produktionsmenge  $m$  nach Gleichung 3 [Pri17].

$$IK(x) = VF(x) \cdot c_g(x) \cdot \left(\frac{m}{x}\right) \quad (3)$$

- $IK$  Instandhaltungskosten
- $x$  Losgröße
- $m$  Produktionsmenge
- $c_g$  Summe der Kostensätze

## 6 BESTIMMUNG DER KOSTENOPTIMALEN LOSGRÖßE UNTER VERWENDUNG DES SOFTWAREDEMONSTRATORS (P6)

Zur Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße unter Berücksichtigung losgrößenabhängiger Instandhaltungskosten, wird das bestehende deterministische Modell der Losgrößenbildung von ANDLER um den Faktor der Instandhaltungskosten erweitert (Gleichung 4) [Pri17].

$$GK = \frac{x}{2} \cdot s \cdot p + \left( (VF(x) \cdot c_g(x)) + E \right) \cdot \frac{m}{x} \quad (4)$$

- $GK$  Gesamtkosten
- $s$  Herstellkosten
- $p$  Lagerhaltungskostensatz
- $IK$  Instandhaltungskosten
- $E$  Auftragswechselkostensatz

Die kostenoptimale Losgröße kann durch Differenzierung und Umstellung der Gleichung 4 nach der Losgröße ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Rechenoperationen zeigt Gleichung 5.

$$x_{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot \left( (VF(x) \cdot c_g(x)) + E \right)}{p \cdot s}} \quad (5)$$

Um eine vereinfachte Anwendung der erweiterten Losgrößenmodelle zu gewährleisten, wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der bei Eingabe der notwendigen Kostensätze und zuvor bestimmten Verschleißverhalten, eine direkte Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße ermöglicht. Unter Verwendung von MS EXCEL wurde mittels

VBA die Programmierung des Demonstrators durchgeführt. Innerhalb des Softwaredemonstrators erfolgt eine Unterteilung zwischen Benutzeroberfläche und Kostensensitivität (zusätzliche Kosten bei Abweichung von der kostenoptimalen Losgröße). Dieses ermöglicht eine separate Betrachtung der einzelnen Aspekte sowie eine vereinfachte Anwendung. Die Benutzeroberfläche ermöglicht die Eingabe aller relevanten unternehmensspezifischen Daten sowie das Auslösen der relevanten Funktionen. Die Ergebnisse für die kostenoptimalen Losgrößen werden direkt in der Benutzeroberfläche dargestellt.

Innerhalb des zuvor angegebenen Beispielprozesses wurden die notwendigen Kostensätze für eine funktionale Validierung des Losgrößenmodells ausgewählt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Exemplarische Kostensätze

m	E	s	p
400 €	500 €	22 €	0,15
$c_p$	$c_e$	$c_f$	$c_m$
50 €	12,50 €	0 €	75 €
$c_s$	$c_b$	$c_h$	-
25 €	12,50 €	25 €	-

Auf Basis dieser Kostensätze lässt sich die kostenoptimale Losgröße nach ANDLER sowie dem um die Instandhaltungskosten erweiterten Losgrößenberechnungsverfahren bestimmen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Abweichung der optimalen Losgröße ANDLER/erweitert

$x_{opt.}^{ANDLER}$	$x_{opt.}^{erweitert}$
348 Stk.	383 Stk.

Durch den steigenden Verschleiß mit einhergehenden erhöhten Instandhaltungskosten bei kleineren Losgrößen (Vergleich Kapitel 3 und 4), steigt wie erwartet die kostenoptimale Losgröße im erweiterten Modell vergleichsweise an.

## 7 Ableitung von Handlungsempfehlungen der relativen Abweichung von der kostenoptimalen Losgröße (P7)

Zusätzlich zu der Ausgabe der resultierenden Kostenfunktionen ermöglicht der Softwaredemonstrator die fallspezifische Darstellung der Kostensensitivität. Diese dient bei der praktischen Anwendung als objektive Entscheidungshilfe und ermöglicht es Unternehmen die zu erwartenden zusätzlichen Kosten bei einer Abweichung von der kostenoptimalen Losgröße zu bestimmen. Damit können entsprechende Auswirkungen einer Änderung der Fertigungsplanung direkt ermittelt werden. Hier werden einerseits die relativen losabhängigen Kosten (Lagerhaltungs-, Auftragsauflage- und Instandhaltungskosten) in

Abhängigkeit der relativen Losgrößenabweichung dargestellt. Darüber hinaus wird die Auswirkung einer prozentualen Abweichung von der kostenoptimalen Losgröße auf die prozentualen Mehrkosten pro Stück dargestellt (Bild 7).

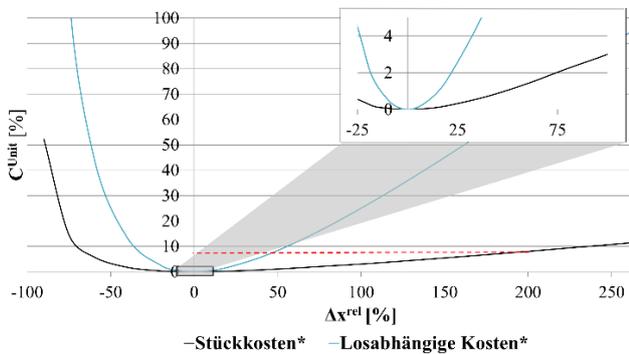


Bild 7: Kostensensitivität bei Abweichung von der kostenoptimalen Losgröße

Ein solch detailliertes Vorgehen ermöglicht zum einen die wirtschaftliche und zielgerichtete Produktionsplanung unter Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes. Zum anderen wird durch den Softwaredemonstrator eine Möglichkeit zur Sensibilisierung geboten und die wirtschaftlichen Folgen individueller Losgrößenplanungen gezeigt.

Für den exemplarischen Prozess führt eine eigenmächtig entschiedene Fertigungsplanung unter Verwendung der Losgröße  $x = 1000$  Stk. (relative Losgrößenabweichung von ca. 200 %) zu einer Steigerung der Stückkosten von 8 % (Bild 7).

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Für Schmiedeunternehmen ist eine wirtschaftliche Fertigung von höchster Priorität. Da die Werkzeugkosten einen der Hauptkostenfaktoren innerhalb der Fertigung darstellen, bieten diese ein erhebliches Einsparpotenzial. Werkzeugkosten resultieren insbesondere aus der Instandhaltung des Werkzeugs aufgrund der Verschleißbildung, die nachweislich von der gewählten Losgröße abhängig ist. Aktuell wird der losgrößenabhängige Werkzeugverschleiß bei der Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde eine Methode erarbeitet, die es ermöglicht fallspezifisch für jeden verschleißbedingten Schmiedeprozess eine kostenoptimale Losgröße, unter Berücksichtigung der verschleißbedingten Instandhaltungskosten, zu berechnen. Diese Methode dient zum einen der Sensibilisierung fertigungstechnischer Unternehmen hinsichtlich der Abhängigkeit einer kostenoptimalen Losgrößenbildung von dem resultierenden Werkzeugverschleiß. Zum anderen ermöglicht eine schrittweise Befolgung der einzelnen Abläufe innerhalb der Methode, eine wirtschaftliche Optimierung der Produktionsplanung

## LITERATUR

- [And29] Andler, K.; *Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße*. Oldenbourg, 1929
- [Lav11] Lavtar, L. et al.; *Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms*. In: Engineering Fatigue Analysis, Vol. 18 (2011), Issue 4
- [Mue13] Münzberg, B.; *Multikriterielle Losgrößenbildung* Garbsen: PZH-Verlag, 2013
- [Pri16] Prinzhorn, H. et al.; *Losgrößenabhängiger Werkzeugverschleiß*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 111. Jg. (2016) H. 7-8
- [Pri17] Prinzhorn, H. et al.; *Lot sizing in the forging industry considering lot size dependent tool wear*. In: Production Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [Ric17] Richter, h. et al.; *Wie die Losgröße den Gesenkverschleiß bestimmt*. In: Umformtechnik, Meisenbach Verlag GmbH, 51. Jg. (2017), H. 3
- [Zha90] Zhang, S.; *Instandhaltung und Anlagenkosten*. Wiesbaden, 1990
- [Zhi13] Zhi, J. et al.; *The effect of temperature condition on material deformation and die wear*. In: Journal of materials engineering and Performance, ASM International, Vol. 22 (2013), Issue 7

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18780 N der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. (GVB) wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.