

Losgrößenoptimierter Werkzeugeinsatz

zu IGF-Vorhaben Nr. 18780 N / 1

1. Thema

Verfahren zur kostenoptimalen Losgrößenbildung unter der Berücksichtigung des Verschleißes von Schmiedewerkzeugen

2. Projektzeitraum

01.09.2015 bis 31.03.2018

3. Forschungsvereinigung

Verkehrsbetriebswirtschaft

4. Forschungseinrichtung(en)

Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) gGmbH

Hannover, 25.06.2018



Henrik Prinzhorn, Johannes Richter

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Zusammenfassung | 1 |
| 2 | Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung..... | 3 |
| 3 | Darstellung der erzielten Ergebnisse | 5 |
| 3.1 | BS I: Auswahl von geeigneten Versuchsgeometrien | 5 |
| 3.2 | BS II: Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Losgröße und Verschleiß..... | 9 |
| 3.3 | BS III: Aufstellen der losgrößenabhängigen Instandhaltungskostenfunktion sowie Erweiterung eines Verfahrens zur Losgrößenbildung | 14 |
| 3.3.1 | Aufstellen einer losgrößenabhängigen Instandhaltungskostenfunktion..... | 14 |
| 3.3.2 | Erweiterung eines bestehenden Verfahrens zur Losgrößenbildung | 18 |
| 3.4 | BS IV: Entwicklung eines Leitfadens sowie Erstellung eines Softwaredemonstrators..... | 20 |
| 3.4.1 | Entwicklung eines Softwaredemonstrators..... | 20 |
| 3.4.2 | Entwicklung eines Leitfadens zur Anwendung des Softwaredemonstrators. | 22 |
| 4 | Durchführende Forschungsstelle | 24 |
| 5 | Förderhinweis | 24 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 25 |
| 7 | Bilderverzeichnis | 25 |
| 8 | Tabellenverzeichnis | 26 |

1 Zusammenfassung

Beim Gesenkschmieden stellen die Werkzeugkosten neben den Materialkosten einen der wesentlichen Kostenfaktoren der Herstellungskosten dar. Für Schmiedeunternehmen ist es demnach von hoher wirtschaftlicher Bedeutung, dass die Werkzeuge gewartet bzw. instandgesetzt werden, um Produktionsausfälle zu vermeiden. Die Anzahl an durchzuführenden Instandhaltungen hängt dabei von der Belastungscharakteristik des Werkzeuges und dem daraus resultierenden Verschleiß ab. Eine Möglichkeit Werkzeugbelastungen bzw. den Verschleiß zu beeinflussen besteht in der Anpassung der Losgröße.

Das durchgeführte Forschungsprojekt „Verfahren zur kostenoptimalen Losgrößenbildung unter Berücksichtigung des Verschleißes von Schmiedewerkzeugen – Losgrößenoptimierter Werkzeugeinsatz“ (LöWe) hatte das Ziel, eine Methode für die Losgrößenbildung in der Warmmassivumformung zu entwickeln. Die Methode soll die Bestimmung einer kostenoptimalen Losgröße unter Berücksichtigung von losgrößenabhängigen Instandhaltungskosten und Logistikkosten ermöglichen. Das Projekt wurde entsprechend der im Antrag beschriebenen Arbeitspakete (AP) in sechs Bearbeitungsschritte (BS) bearbeitet. Im ersten BS wurde aus verschiedenen möglichen Versuchsgeometrien eine geeignete Versuchsgeometrie ausgewählt. Im zweiten BS wurden mit Hilfe der ausgewählten Geometrie die Abhängigkeiten zwischen der Losgröße und dem Gesenkverschleiß untersucht, um ein Verschleißmodell zu erstellen. Im dritten BS wurde das Verschleißmodell zum einen mit den wesentlichen Parametern der Instandhaltungskosten verknüpft, die sich aus dem verwendeten Instandhaltungsprozess (Strategie und Maßnahme) ergeben, um eine losgrößenabhängigen Instandhaltungskostenfunktion zu formulieren. Zum anderen wurden die Losgrößenmodelle von ANDLER und MÜNZBERG um die losgrößenabhängige Instandhaltungskostenfunktion erweitert. Zudem wurde auf Wunsch der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) zusätzlich eine Methode zur Ermittlung der Sensitivität der ermittelten kostenoptimalen Losgrößen erarbeitet. Die Gesamtmethode zur Ermittlung der kostenoptimalen Losgröße und ihrer Sensitivität wurde im vierten BS in einen MS-EXCEL basierten Softwaredemonstrators implementiert und getestet. Diese Implementierung der Methode als EXCEL-Applikation ermöglicht zukünftig die einfache Anwendung der Gesamtmethode durch produzierende Unternehmen. Die einfache Anwendbarkeit der Methode wird zusätzlich durch einen bereitgestellten Leitfaden unterstützt. Im fünften BS erfolgte die Validierung des erweiterten Losgrößenbildungsverfahrens bzw. des Leitfadens sowie des Softwaredemonstrators in Kooperation mit dem PA mit ausgewählten Bauteilgeometrien aus der Praxis. Parallel zur Bearbeitung wurden die Projektergebnisse in mehreren Veröffentlichungen dokumentiert (sechster Bearbeitungsschritt).

Es konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung von losgrößenabhängigen Instandhaltungskosten zu einer Reduzierung der Herstellkosten in der Warmmassivumformung führt. Nach Aussage der Unternehmen des PA wurden durch die Methode im praxisnahen Umfeld die Voraussetzungen für einen losgrößenoptimierten Werkzeugeinsatz geschaffen.

Aufgrund der positiven Diskussion mit den Mitgliedern des PA wurde, zusätzlich zum ursprünglichen Antragsplan, noch ein Konzept für eine zustandsabhängige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von im Verschleiß fortschreitenden Schmiedewerkzeugen erarbeitet (vgl. Exkursbetrachtung in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dazu wurde zunächst ein Beschreibungsmodell für eine zustandsbasierte Instandhaltung entwickelt. Im zweiten Schritt wurden monetäre Bewertungsgrößen formuliert, um eine

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu ermöglichen. Eine ausführliche Validierung der Methode für eine zustandsabhängige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von verschlissenen Werkzeugen konnte im Forschungsprojekt jedoch nicht mehr umgesetzt werden.

2 Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Gesenkschmieden ermöglicht die Produktion hoch belastbarer Bauteile in hoher Stückzahl [Doe10]. Beispielhafte Bauteile sind Pleuel, Fahrwerksteile und Kurbelwellen. Die größte Anwendung finden Gesenkschmiedeteile in der Automobilindustrie, aber auch in der Luftfahrtindustrie sowie im Maschinenbau [Imu16]. Hersteller von Gesenkschmiedeteilen sind zum überwiegenden Teil kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Laut Branchenangaben beträgt der Anteil an Firmen mit weniger als 200 Mitarbeitern ca. 84 % [Imu16]. Hauptkostenfaktor der Herstellungskosten beim Gesenkschmieden sind die Werkzeugkosten [Awi12]. Für KMU ist es demnach von hoher wirtschaftlicher Bedeutung, dass die Werkzeuge gewartet bzw. instandgesetzt werden, um Produktionsausfälle zu vermeiden. Die Anzahl an durchzuführenden Instandhaltungen hängt dabei von der Belastungscharakteristik des Werkzeuges und dem daraus resultierenden Verschleiß ab.

Aufgrund der hohen thermischen und mechanischen Belastungen infolge der hohen Roh-teiltemperaturen von bis zu 1280°C, der großen Gesenkinnendrucke und des ausgeprägten Werkstoffflusses entlang der Gesenkoberfläche ist der Verschleiß an den Gesenkschmiedewerkzeugen sehr hoch [Doe10]. Durch Änderungen an der Werkzeug- oder Vorformgeometrie, der Umformmaschine oder durch Anpassungen des verfahrenstechnischen Prozesses kann der Werkzeugverschleiß reduziert werden. Diese Möglichkeiten sind jedoch häufig mit einem großen Aufwand verbunden, weil diese nicht willkürlich durchgeführt werden können, sondern u. a. den Anforderungen der Produkt- und Prozesseigenschaften entsprechen müssen. Neben dem personellen Aufwand entstehen mit bisherigen Methoden zur Reduzierung des Werkzeugverschleißes auch Beschaffungskosten, bspw. für neue Werkzeugbeschichtungen [Hof12].

Eine alternative Möglichkeit Werkzeugbelastungen zu verändern, besteht in der Anpassung der Losgröße. Für die schmiedetechnische Fertigung eines Loses wird ein sogenannter thermischer Zyklus beim Schmieden durchlaufen. Dieser besteht aus der Erwärmung des Gesenkes, den der Losgröße entsprechenden Schmiedehüben und der abschließenden Abkühlung. Je mehr thermische Zyklen durchlaufen werden, umso größer ist die thermische Belastung und damit der Werkzeugverschleiß bzw. die damit verbundenen Instandhaltungskosten. Vor diesem Hintergrund erscheint die Fertigung einer geringeren Anzahl von Losen aber dafür einer höheren Anzahl von Teilen pro Los vorteilhaft.

Eine einseitige Optimierung der Losgröße bezüglich einer Senkung der Instandhaltungskosten ist jedoch nicht zielführend (siehe Bild 2-1). Vielmehr müssen die zentralen logistischen Zielgrößen in Form von Logistikkosten und Logistikleistung Berücksichtigung finden. Eine Veränderung der Losgröße beeinflusst u. a. direkt Lagerhaltungs- und Auftragsauflagekosten. So führt beispielsweise eine Vergrößerung der Losgröße zu höheren Lagerhaltungskosten. Des Weiteren entstehen auch indirekte Logistikkosten, wie z. B. Termintreue- und Durchlaufzeitkosten [Mün13]. Die Logistikleistung in Form von Durchlaufzeit und Termintreue wird direkt und indirekt durch Mittelwert und Streuung der Auftragszeiten beeinflusst, welche wiederum aus der Losgröße resultieren [Mün13]. Eine geringe Logistikleistung eines Unternehmens kann zu Mehraufwand und zusätzlichen Kosten auf Seiten seiner Kunden führen.

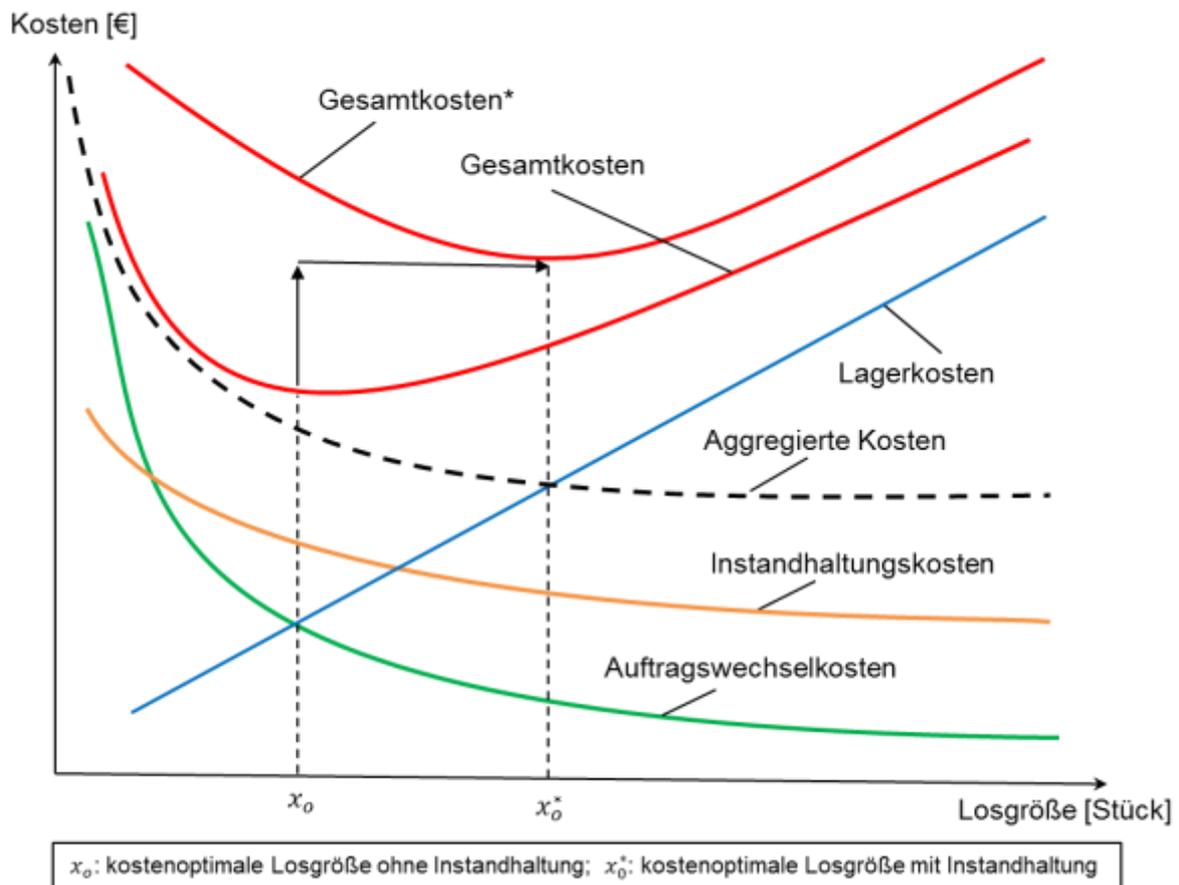


Bild 2-1: Logistische Positionierung in der Losgrößenbildung

Die dargelegte Ausführung zeigt die Notwendigkeit einer kostenoptimalen Losgrößenbildung in der Warmmassivumformung sowohl unter Beachtung der Instandhaltungskosten als auch der direkten und indirekten Logistikkosten. Gelingt die Erweiterung eines bestehenden Verfahrens zur Losgrößenbildung, ist eine Reduzierung der gesamten Herstellungskosten in der Warmmassivumformung möglich. Diese Hypothese konnte durch das beantragte Forschungsvorhaben „Losgrößenoptimierter Werkzeugeinsatz“ bestätigt werden.

3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse anhand der einzelnen Bearbeitungsschritte (BS) ausführlich dargestellt. Für jeden BS werden die durchgeführten Arbeiten und anschließend die daraus resultierten Ergebnisse detailliert beschrieben. Bild 3-1 ordnet die Bearbeitungsschritte den drei genannten Teilzielen zu.

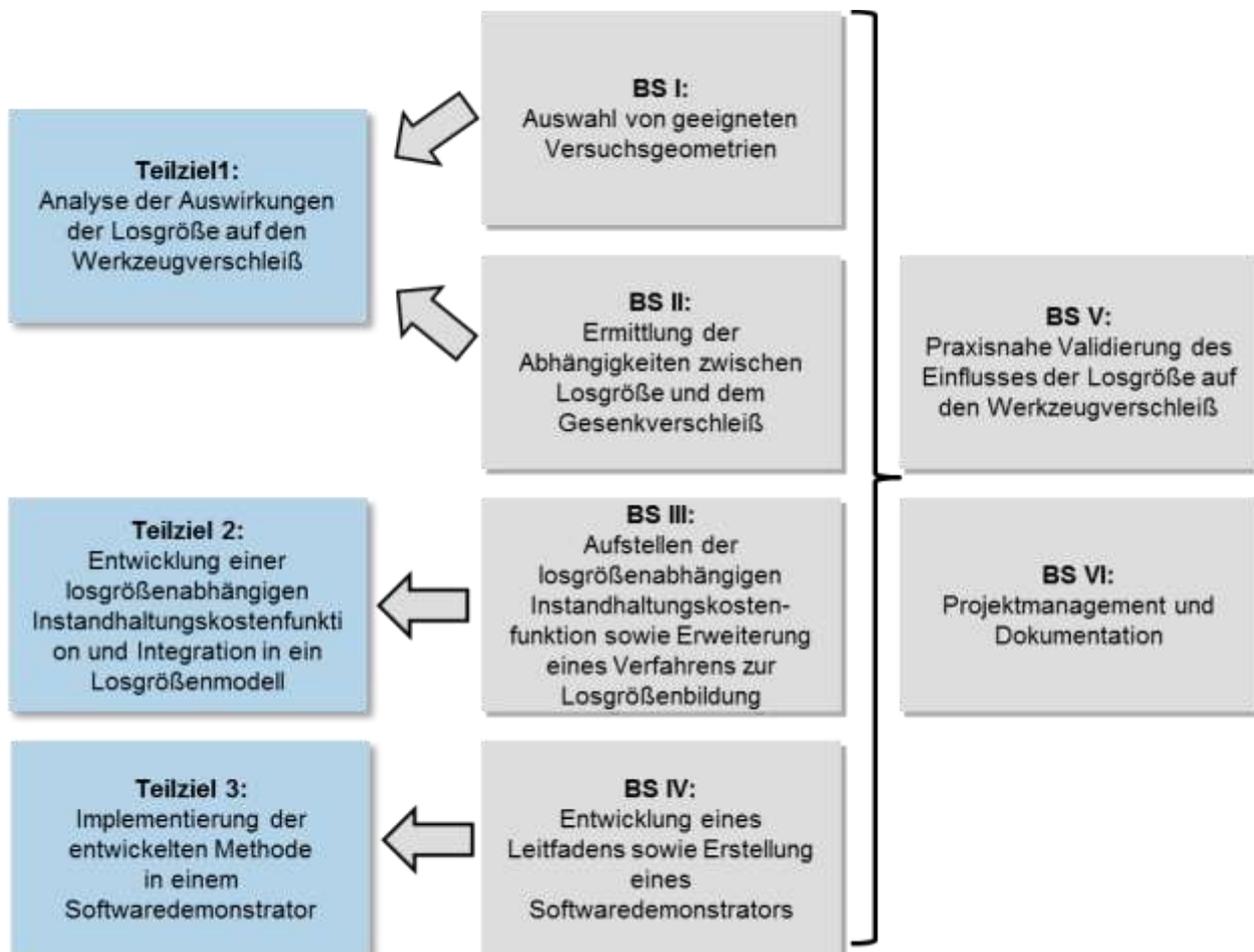


Bild 3-1: Zuordnung von Bearbeitungsschritten zu Teilzielen

3.1 BS I: Auswahl von geeigneten Versuchsgeometrien

Werkzeugbereiche mit konvexen Radien weisen in der Theorie in besonderem Maße Verschleißerscheinungen auf. Im Forschungsprojekt wurden zwei unterschiedliche Versuchsgeometrien mit konvexen Radien in den korrespondierenden Schmiedewerkzeugen entwickelt (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Mit Hilfe von Stoffflusssimulationen des entsprechenden Umformprozesses mit FORGE NX T unter konstanten Prozessbedingungen wurden für beide Geometrien die Bereiche mit hohem zu erwartenden Verschleiß lokalisiert und die Verschleißspitzen qualitativ evaluiert. Das Ziel war es, bereits vor experimentellen Verschleißuntersuchungen die Bereiche mit hohem erwartenden Verschleiß bestimmen zu können, um die experimentellen Untersuchungen effizienter durchführen zu können. Die Ergebnisse erster FEM-Simulationen mit Stoffflusssimulationssoftware Forge NxT zeigten, dass der abrasive Gesenkverschleiß bei Geometrie 2 ca. um den Faktor zwei höher ist. Daher wurde im weiteren Verlauf nur die in Bild 3-2 dargestellte Geometrie betrachtet.

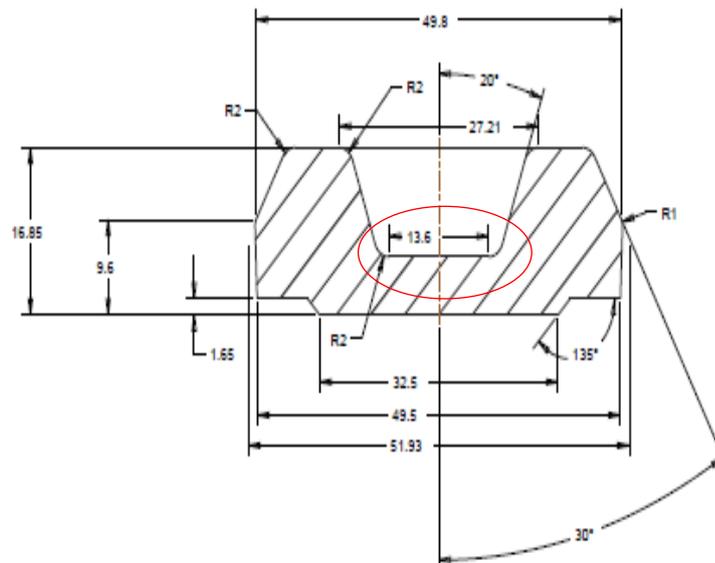


Bild 3-2: Werkstückzeichnung der Versuchsgeometrie (links)

Die zur Versuchsgeometrie korrespondierenden Schmiedewerkzeuge weisen ausgeprägte konvexe Radien im Bereich des Stempels auf. Der ausschlaggebende Bereich ist in Bild 3-3 rot markiert. In diesen Bereichen wurden in den qualitativ ausgewerteten FEM-Simulationen ebenfalls die Verschleißspitzen ermittelt.

Stempel der Versuchsgeometrie



Bild 3-3: Obergesenk der entwickelten Versuchsgeometrie für experimentelle Untersuchungen des losgrößenabhängigen Werkzeugverschleißes

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) wurden bereits zahlreiche Verschleißuntersuchungen anhand der ausgewählten Versuchsgeometrie durchgeführt. Im Rahmen des Projektes bestand die Möglichkeit, die experimentellen Verschleißversuche durch das Schmieden mittels in Bild 3-3 dargestellten Versuchsgeometrie auf den Anlagen des IFUM durchzuführen. Der Vorteil der Durchführung auf den Anlagen des IFUM lag in der schnellen Erwärmung der zylindrischen Rohteile in einem Induktor und der automatisierten Rohteil Zu- und Abfuhr in das bzw. aus dem Schmiedegesenk. Damit bildet dieser Prozess einen realen industriellen Schmiedeprozess ab und die Verschleißuntersuchungen ließen sich unter praxisnahen Bedingungen durchführen.

Ebenfalls zusätzlich zum ursprünglichen Antragsplan wurden aufwendige FEM-Simulationen mit deformierbaren Gesenken durchgeführt, um vor den experimentellen Verschleißuntersuchungen eine Prognose für den abrasiven Gesenkverschleiß in Abhängigkeit der gefertigten Stückzahl zu erhalten. Da die Materialhärte der Gesenke und damit auch der Verschleiß temperaturabhängig sind, wurden zunächst das sich einstellende Temperaturfeld in Ober- und Untergesenk numerisch bestimmt. Dazu wurden ausgehend von einer Werkzeuggrundtemperatur von $T = 150 \text{ °C}$ sogenannte Thermal-Steady-State-Simulationen durchgeführt. Dabei wird der Schmiedezyklus über das Einlegen des Bauteils, das

Umformen des Bauteils im Gesenk, das anschließende Auswerfen und Entfernen des Bauteils aus dem Gesenk sowie die Schmierung des Gesenkes iterativ so oft simuliert, bis sich ein Gleichgewicht des Temperaturfeldes in den Schmiedegesenken eingestellt hat. Der Temperaturverlauf bei einem erneuten Schmiedezyklus verläuft ab diesem Zeitpunkt annähernd gleich. In Bild 3-4 ist das Temperaturfeld in Ober- und Untergesenk jeweils direkt vor und nach dem Schmieden abgebildet.

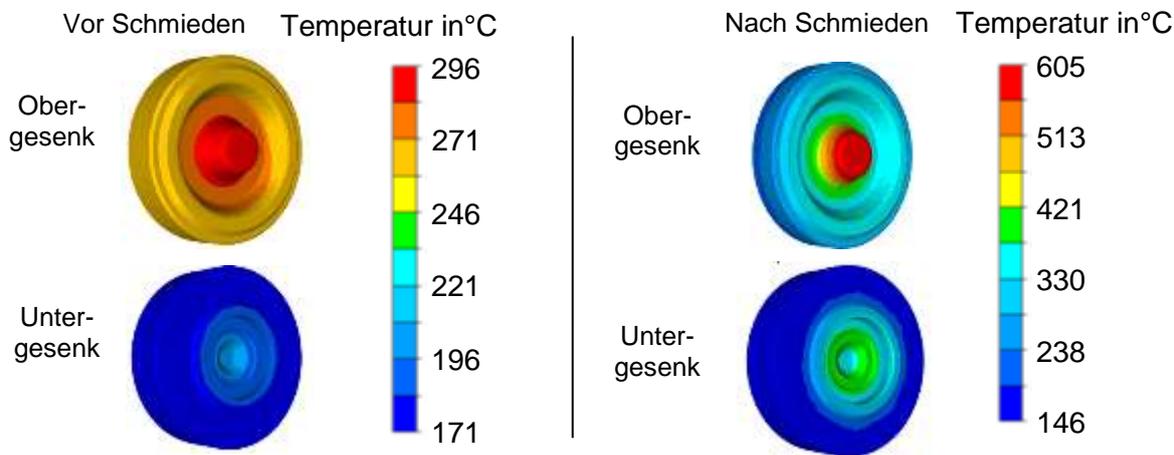


Bild 3-4: Simulative Ermittlung des Temperaturfeldes in Obergesenk und Untergesenk nach Einstellen des thermischen Gleichgewichtes (Thermal-Steady-State-Simulationen)

Die Verwendung durch die Simulationen erhaltenen Temperaturfelds ermöglicht eine genauere Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialhärte und damit des Gesenkverschleißes bei der simulativen Ermittlung des abrasiven Verschleißes in den Schmiedegesenken. Zudem konnten auf diese Weise bereits das in den experimentellen Umformversuchen an den Werkzeugen zu erwartende Temperaturfeld ermittelt werden. Um den Verschleiß in den Simulationen mit höchstmöglicher Genauigkeit bestimmen zu können, wurden erneut FEM-Simulationen durchgeführt, die in diesem Fall die rechenaufwendige Modellierung deformierbarer Gesenke beinhalteten. Die Simulationsbilder der Verschleißsimulationen sind in Bild 3-5 zu sehen. Auf der Skala ist die Verschleißtiefe in μm nach 1000 Schmiedezyklen zu sehen. 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.

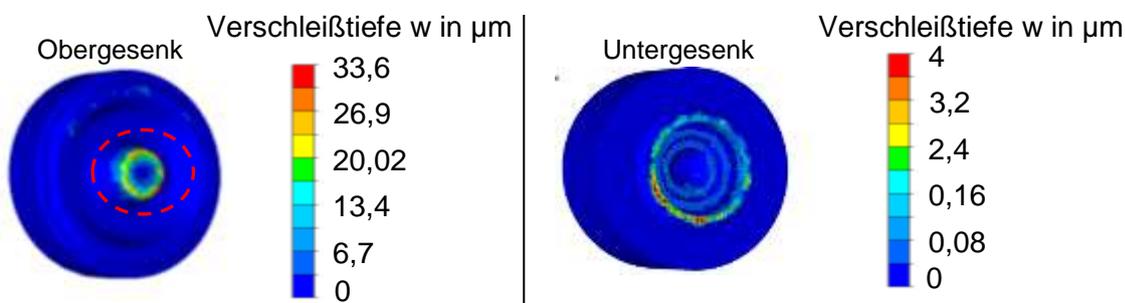


Bild 3-5: Simulative Ermittlung des abrasiven Verschleißes an Ober- und Untergesenk nach 1000 Schmiedezyklen

In Folge der Auswertung aus Bild 3-5 wurde sich für die weiteren, detaillierten simulativen und experimentellen Verschleißuntersuchungen auf den Bereich des konvexen Radius des Stempels des Obergesenks fokussiert (siehe Bild 3-5, links). Der abrasive Verschleiß am

Stempel wurde entlang einer Konturlinie S in der mittleren Schnitt-Ebene über die Flanken und die konvexen Radien des Stempels erfasst (siehe Bild 3-6).

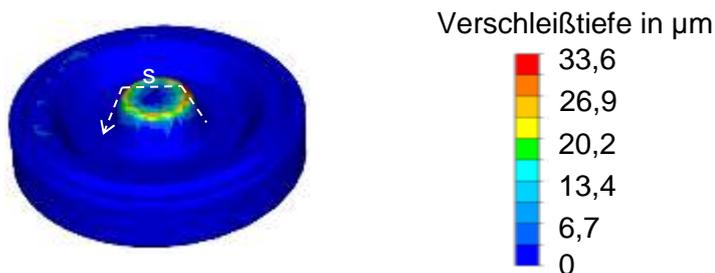


Bild 3-6: Konturlinie zur Erfassung des Verschleißbildes am Stempel

Auf Basis der Simulationen wurde der Verschleiß nach 100, 200, 500 und 1000 Schmiedezyklen erfasst und in Bild 3-7 dargestellt. Das Bild zeigt die Tiefe des abrasiven Verschleißes am Stempel in μm entlang der fiktiven Konturlinie S.

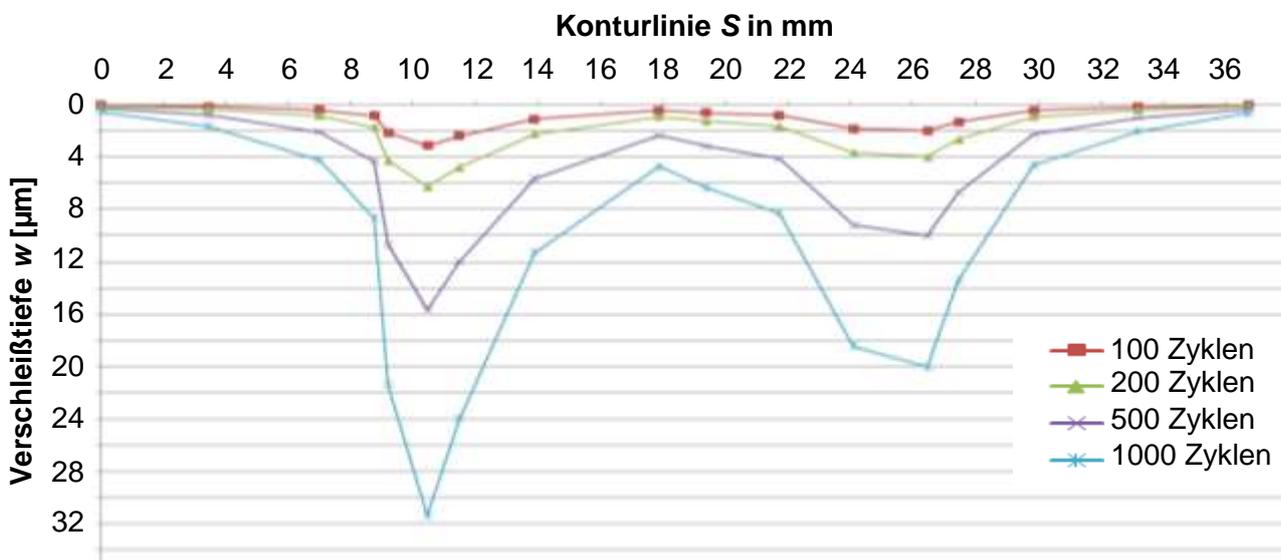


Bild 3-7: Abrasiver Verschleiß am Stempel entlang Konturlinie S

Die Simulationen zeigen, dass der simulierte abrasive Verschleiß bei einer Stückzahl von 1000 Teilen in den Spitzenbereichen bei ca. 32 μm liegt und damit mit den für die Vermessung der experimentell eingesetzten Schmiedegesenke vorgesehenen Messverfahren bereits deutlich messbar ist. Der Verschleiß im konvexen Radius des Stempels liegt im Bereich zwischen 14 und 32 μm während der Verschleiß an den Flanken des Stempels zwischen 5 und 10 μm liegt. Insgesamt lässt sich auf Basis der Simulationsergebnisse feststellen, dass das Verschleißverhalten in den Gesenken bei der experimentellen Herstellung der vorgesehenen Bauteilgeometrie bereits bei einer Herstellung von 1000 Teilen gut zu erfassen und zu untersuchen ist.

In den Simulationen kann der Einfluss von verschiedenen Losgrößen und damit der unterschiedlichen Anzahl thermischer Zyklen auf den Gesenkverschleiß nicht untersucht werden. Ursächlich hierfür ist, dass durch das Schmieden von 1000 Teilen in beispielsweise 10 x 100 Teilen bzw. 1 x 1000 Teilen simulativ kein Unterschied im Verschleißverhalten festzustellen ist. Nach der Forschungshypothese dieses Projektes werden in den experimentellen Schmiedeversuchen jedoch Unterschiede im Verschleißverhalten bei der Ferti-

gung in unterschiedlichen Losgrößen erwartet. Daher wird nach Abschluss der experimentellen Schmiedeversuche das experimentell ermittelte Verschleißbild mit dem simulativ ermittelten Verschleißbild verglichen. Dabei wurde erwartet, dass der experimentell ermittelte Verschleißwert über dem simulativ ermittelten Verschleißwert (ohne Einfluss der Losgröße) liegt.

Insgesamt konnte in diesem BS eine geeignete Versuchsgeometrie entwickelt und entscheidende Verschleißbereiche durch FEM-Simulationen bereits vorab identifiziert werden. Die vergleichende Auswertung in Form der Grafiken aus Bild 3-7 ist für die nachfolgenden experimentellen Versuche sehr zielführend, um den Einfluss der unterschiedlichen Losgrößen auf den Verschleiß zu visualisieren. Daher wurde die entwickelte Vergleichsmethode weiterverfolgt.

3.2 BS II: Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Losgröße und Verschleiß

Zur Durchführung der experimentellen Schmiedeversuche wurden im Vorfeld unterschiedliche Werkzeugkonzepte entwickelt. Die Konzepte unterscheiden sich einerseits hinsichtlich der Anordnung der Heiz- sowie Isolierungselemente und andererseits hinsichtlich der Montage der Ober- und Untergesenke an der oberen bzw. unteren Werkzeuggrundplatte. Die erstellten Werkzeugkonzepte sind im Anhang in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Da die Durchführung der experimentellen Schmiedeversuche am IFUM erfolgte, wurde ein Werkzeugkonzept gewählt, das sich an den dort vorhandenen Anlagengegebenheiten orientiert. Das in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellte Werkzeugkonzept 2 entspricht diesen Gegebenheiten. Da zur Untersuchung des Verschleißverhaltens während der geplanten Fertigungsunterbrechungen Teile des Ober- und Untergesenkes demontiert und anschließend wieder eingebaut werden müssen, ist die vergleichsweise aufwandsarme Montage und Demontage der Komponenten bei dem in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Konzept vorteilhaft. Die wesentlichen Werkzeugkomponenten für die Verschleißuntersuchungen, das Ober- und das Untergesenk, sind in Bild 3-8 dargestellt. Die Geometrie von Gravur und Stempel entsprechen den in den FEM-Simulationen in BS I verwendeten Geometrien.

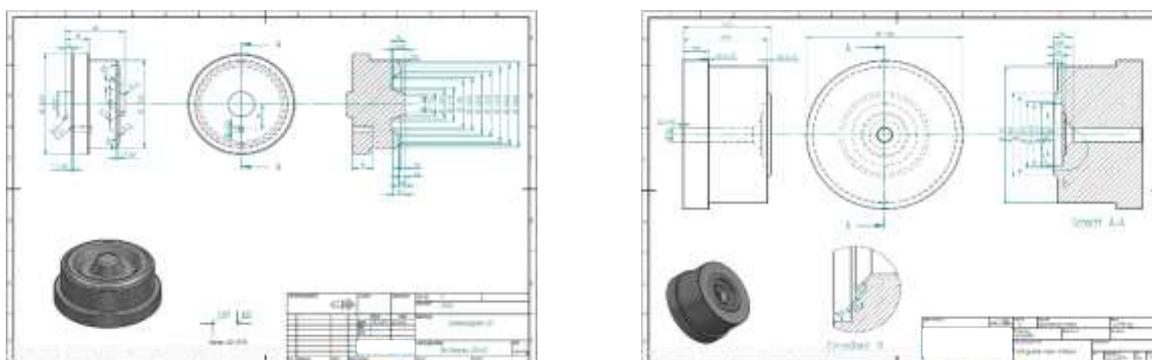


Bild 3-8: Fertigungszeichnungen von Obergesenk (links) und Untergesenk (rechts)

Zur Analyse des losgrößenabhängigen Gesenkverschleißes wurden Verschleißversuche anhand der Versuchsgeometrie aus Bild 3-3 durchgeführt. Das entstehende Werkstück,

bzw. das korrespondierende Werkzeugsystem ist in Bild 3-9 dargestellt. Im Vorfeld durchgeführte FEM-Simulationen (siehe BS I) zeigten, dass im Bereich des Radius in der Bauteilvertiefung Verschleißspitzen zu erwarten sind (siehe rote Markierung Bild 3-9, links).

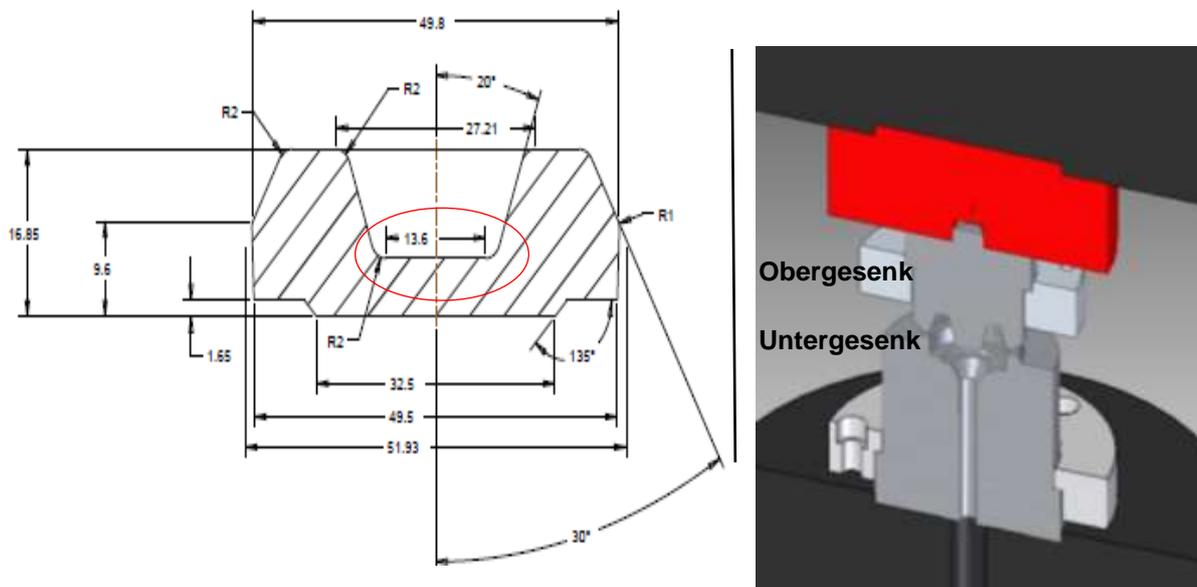


Bild 3-9: Werkstückzeichnung der Versuchsgeometrie (links) und CAD-Modell des korrespondierenden Werkzeugsystems (rechts)

Die für die Umformversuche verwendeten Schmiedegesenke wurden aus dem Werkstoff 1.2343 gefertigt und 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. Um Rückschlüsse auf den Verlauf und die Ausprägung des Zusammenhangs zwischen Losgröße und Gesenkverschleiß ziehen zu können, wurde eine Produktionsmenge von 1000 Werkstücken unter Einsatz unterschiedlicher Losgrößen gefertigt. Die Losgrößen variieren zwischen 100, 500 und 1000 (vergleiche Versuchsplan in Tabelle 1).

Tabelle 1: Parameter zur experimentellen Untersuchung des losgrößenabhängigen Verschleißes

| Versuchsreihe | I | II | III |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|
| Losgröße (Anzahl Teile ohne geplante Unterbrechung) | 100 | 500 | 1000 |
| Anzahl der Fertigungslose | 10 | 2 | 1 |
| Anzahl der thermischen Zyklen | 10 | 2 | 1 |
| Anzahl Teile pro Werkzeug | 1000 | 1000 | 1000 |

Die ursprünglich im Antrag vorgesehene Anzahl von 6000 Schmiedeteilen pro Werkzeugsatz konnte bereits vor Durchführung der experimentellen Schmiedeveruche für die gewählten Bauteilgeometrien als unnötig hoch und dementsprechend ineffizient identifiziert werden. Die Ergebnisse der experimentellen Verschleißuntersuchungen bestätigten dies, da bereits bei der gewählten Produktionsmenge von 1000 Teilen pro Werkzeugsatz ein deutlicher Verschleiß an den Gesenken zu sehen war. Eine Produktionsmenge deutlich größer als 1000 Teile hätte zu Werkzeugversagen geführt. Die Produktion von 6000 Teilen

ohne Werkzeugschädigung erscheint auf Basis des Verschleißbilds, das sich bereits nach 1000 Teilen zeigt, als höchst unwahrscheinlich.

Die experimentellen Schmiedeversuche wurden bei einer Rohteiltemperatur von ca. 1200 °C durchgeführt, wobei die Rohteile induktiv erwärmt und mit einem Manipulator zugeführt wurden. Die zylindrischen Rohteile hatten einen Durchmesser von 30 mm bei einer Höhe von 40 mm. Zur Beschleunigung des Werkzeugverschleißes wurden die Schmiedegesenke mit Hilfe eines Gasbrenners vorgeschädigt, in dem sie im Bereich des Dorns am Obergesenk auf ca. 600 °C erhitzt wurden. Die Anzahl der Vorschädigungszyklen wurde entsprechend der jeweiligen Losanzahl gewählt (z. B. bei Werkzeug I: 10 Vorschädigungszyklen, da 10 x 100 Teile). Um den fortschreitenden Verschleiß an den Werkzeugen weiter zu beschleunigen, wurden pro Werkzeugsatz die ersten 80 Teile aus dem Werkstoff 1.4301 (Edelstahl) geschmiedet. Durch die höhere Fließspannung dieses Werkstoffes steigt folglich der Werkzeugverschleiß schneller. Weitere 920 Teile wurden aus dem Werkstoff 1.0503 (C45) geschmiedet. Nach jedem Fertigungslos wurden die Werkzeuge 45 Minuten bei Raumtemperatur abgekühlt, um den thermischen Zyklus abzubilden. Die Versuche wurden auf einer Eumuco Exzenterpresse mit einer maximalen Presskraft von $F_{\max} = 3100$ kN durchgeführt.

Um die Abhängigkeit zwischen Losgröße und dem Gesenkverschleiß genau ermitteln zu können, wurden über die gesamten Versuchsreihen – ausgenommen der Losgröße – alle übrigen Prozessparameter (z. B. Presskraft, Schmierung, Aufwärm- und Handlingszeiten etc.) konstant gehalten. 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 (der die Bauteilvertiefung mit dem konvexen Radius umformt) miteinander verglichen. In Bild 3-10 sind oben die jeweiligen Messaufnahmen der Werkzeuge im Bereich des Dorns zu sehen, während unten die ermittelten Verschleißwerte gezeigt sind.

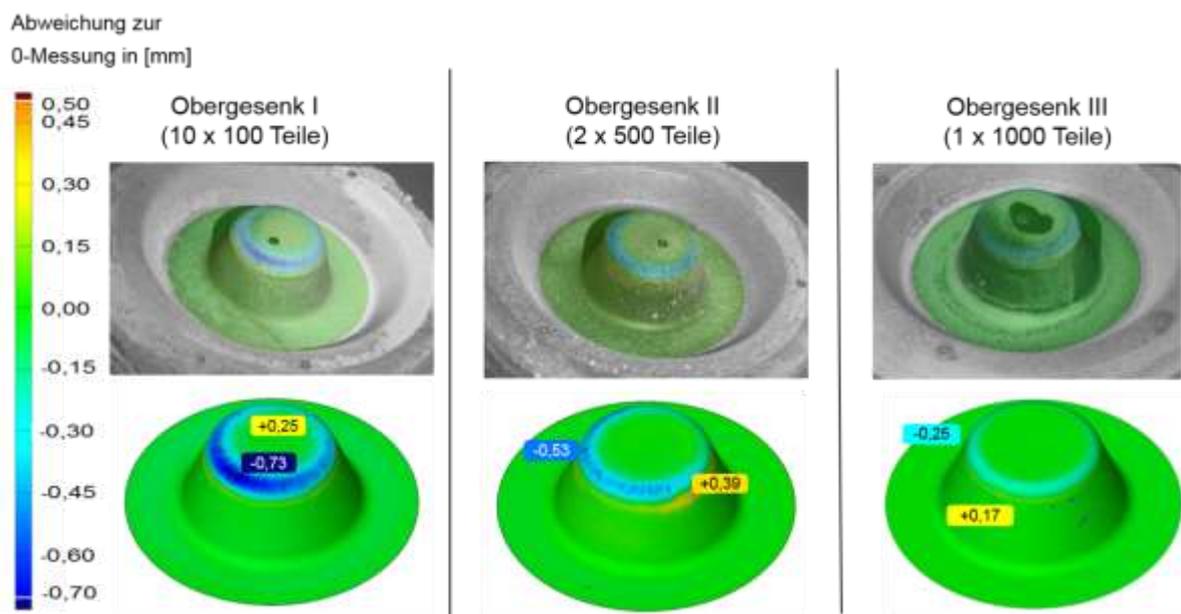


Bild 3-10: Optische Verschleißmessung der Obergesenke für Versuchsreihe I, II, III

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 3-10). Die plastische Verformung ist möglicherweise auf ein prozessbedingtes Ungleichgewicht der Temperaturverteilung zurückzuführen, welche beim Ausblasen des Zunders aus dem Schmiedegesenk entsteht.

In Bild 3-10 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. Als Vergleichsbasis diente die vor den Versuchen durchgeführte 0-Messung der baugleichen Gesenke im nicht verschlissenen Werkzeugzustand. Durch die jeweiligen Punkte des maximalen Verschleißes wurde zudem eine fiktive Konturlinie über die Flanke des Dorns und die jeweiligen konvexen Radien gezogen, anhand derer wiederum die Verschleißmesswerte in Form der Abweichung von der jeweiligen 0-Messung für die Gesenke I, II und III ermittelt wurden. Bild 3-11 zeigt den Vergleich der so ermittelten Verschleißmesswerte.

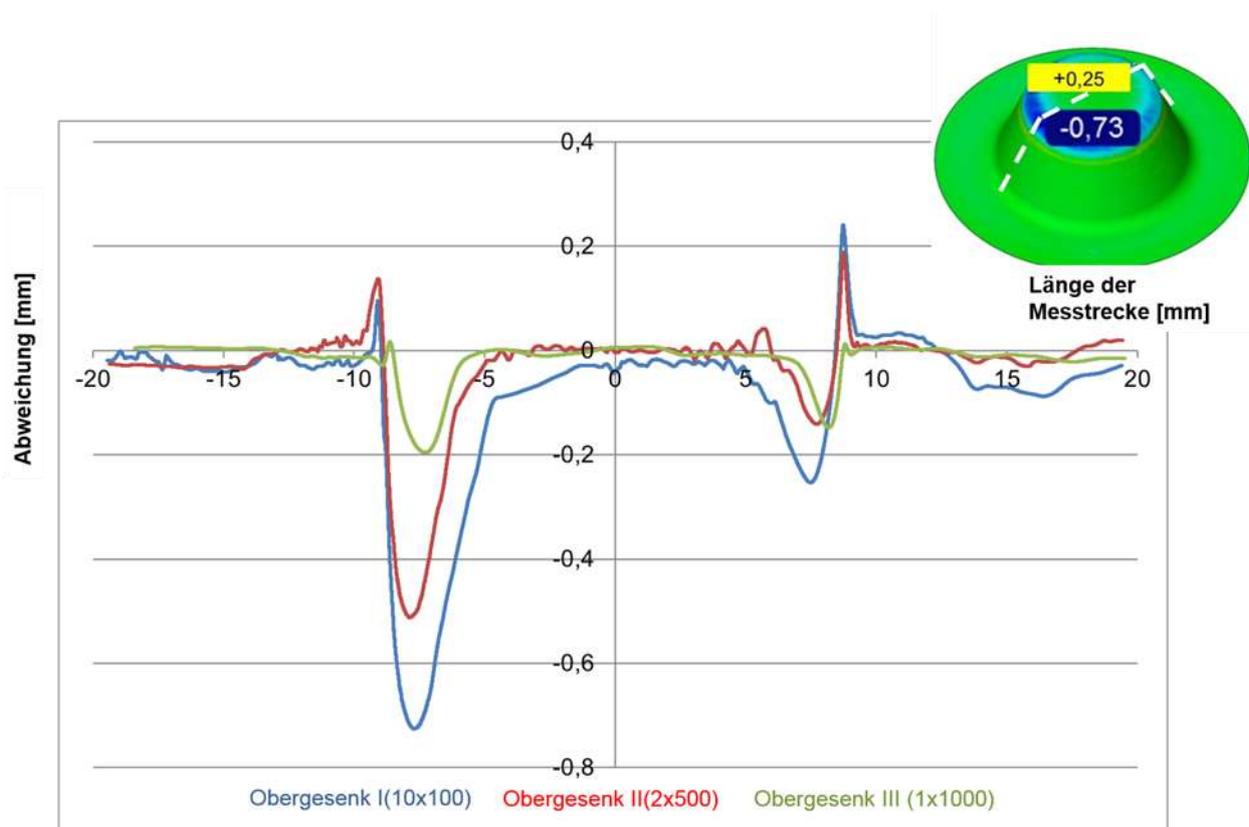


Bild 3-11: Vergleich des Verschleißverlaufs entlang der Konturlinie am Obergesenk für die Versuchsreihen I, II und III

Die Ergebnisse in Bild 3-10 und Bild 3-11 zeigen, dass der Verschleiß entlang der Schnittlinie durch das jeweilige Verschleißmaximum am Gesenk I (10 x 100 Teile) in jedem Punkt der Konturlinie größer ist als bei den Gesenken II (2 x 500 Teile) und III (1 x 1000 Teile). Dabei steigt der maximale abrasive Flächenverschleiß um 0,28 mm bei einer Produktion von 2 x 500 Teilen statt 1 x 1000 Teilen und noch mal um 0,2 mm, wenn 10 x 100 Teile statt 2 x 500 Teile geschmiedet werden.

Zusätzlich zu dem abrasiven Flächenverschleiß wurde der Kantenverschleiß bzw. Radienverschleiß im Bereich des Dornes mit dem optischen 3D-Scanner Atos Core des Herstellers GOM vermessen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wurden optisch zwei

Schnittkurven durch die Obergesenke projiziert. Mit Hilfe von Tastkreisen wurden die Radien der Schnittkurven am Dorn vermessen (R_{ist}) und anschließend Abweichungen von dem angestrebten Radius (R_{soll}) detektiert (siehe Bild 3-12). Eine solche Messstrategie entspricht der Anwendung einer Art digitalen Radienlehre stellt aber gleichzeitig erheblich detailliertere Ergebnisse zur Verfügung.

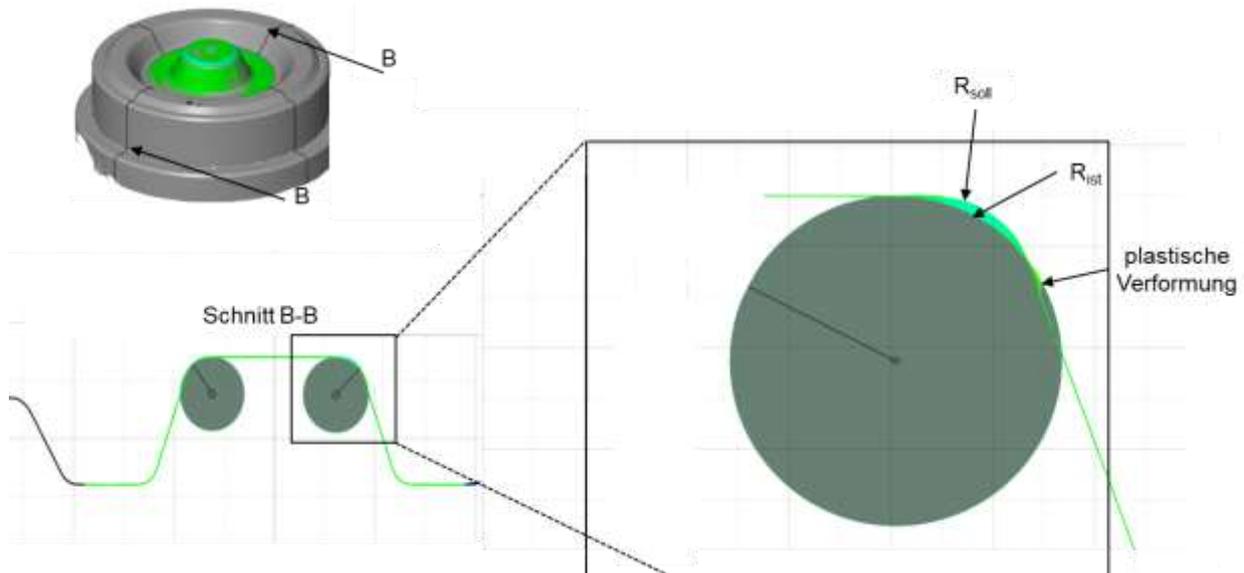


Bild 3-12: Messstrategie zur Erfassung des Kanten- bzw. Radienverschleißes am Dorn im Obergesenk

Mit dieser Messstrategie wurden die Obergesenke der Versuchsreihen I, II und III vermessen und die Abweichungen miteinander verglichen. In Bild 3-13 sind oben die jeweiligen Messaufnahmen des Kantenverschleißes im Bereich des Dorns zu sehen, während unten Querschliffe von oberflächennahen Bereichen der Gesenke dargestellt sind. Hierbei wurde der Fokus erneut auf den Dorn im Obergesenk gelegt, da dort die Verschleißspitzen sowohl simulativ als auch experimentell detektiert wurden.

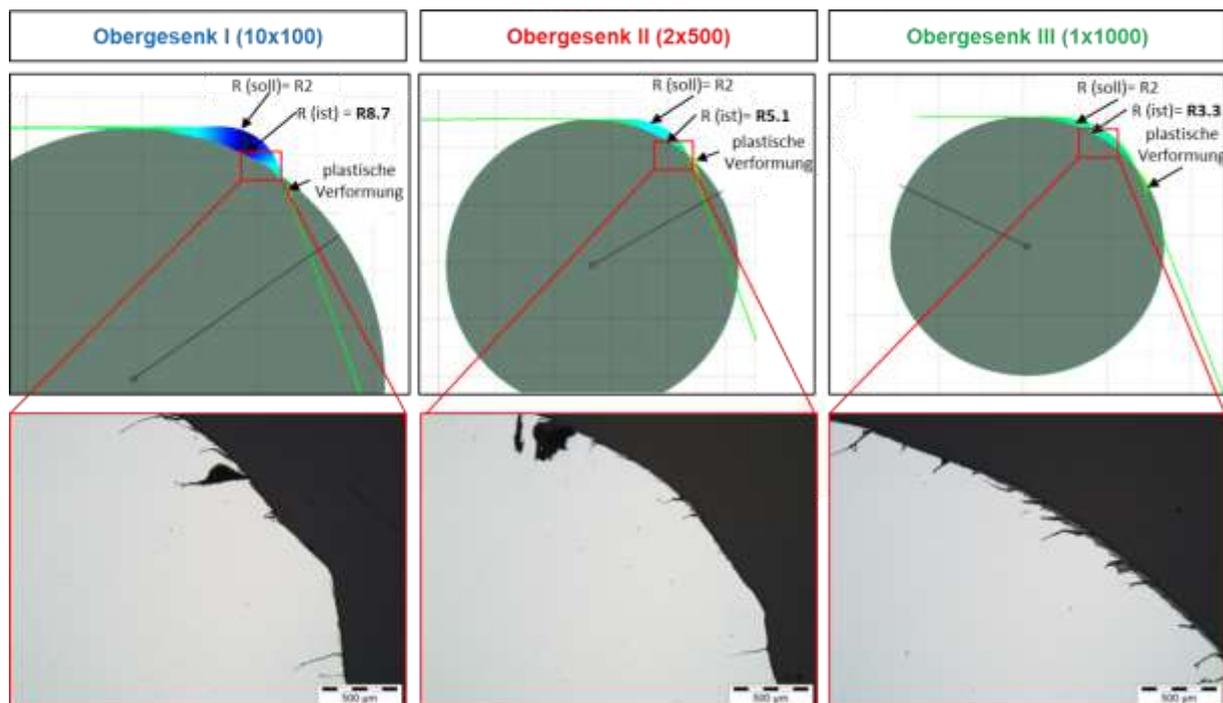


Bild 3-13: Vergleich des Kantenverschleiß (oben) und metallografische Analyse (unten) der Obergesenke der Versuchsreihen I, II und III

Die Schnittkurven zeigen sowohl die Abweichung der Radien am verschlissenen Dorn, als auch die plastische Verformung unterhalb des Radius. In Bild 3-13 wird deutlich, dass der Kantenverschleiß im Bereich des konvexen Dorns beim Schmieden von 10 x 100 Teilen eine Radienabweichung von $\Delta R = 6,7$ mm hervorruft, während die Radienabweichung beim Schmieden von 2 x 500 Teilen bei $\Delta R = 3,1$ mm und beim Schmieden von 1 x 1000 bei lediglich $\Delta R = 1,3$ mm liegt. Dieses $\Delta R = 6,7$ mm im Vergleich zu $\Delta R = 1,3$ mm stellt eine Verschleißreduzierung durch Losgrößenoptimierung von ca. 80 % dar. Als Vergleichsreferenz diene erneut die vor den Versuchen durchgeführte 0-Messung der baugleichen Gesenke im nicht verschlissenen Werkzeugzustand.

Die metallografische Analyse zeigte erhebliche Rissbildungen und Materialausbrüche im Bereich des konvexen Dorns der Obergesenke I und II (Bild 3-13, unten). Eine quantitative Auswertung der metallografischen Rissanalyse wurde nicht als sinnvoll erachtet. Die Erkenntnis, dass die Rissmenge bei der Losgröße 1 x 1000 vergleichsweise hoch ausfällt, lässt sich auf die erhöhte Rissbreite der Versuchsreihen mit der Losgröße 100 und 500 zurückzuführen (Bild 3-13). Diese erhöhte Rissbreite stellt einen Werkstoffausbruch dar, welcher durch das Zusammentreffen mehrere Risse entsteht und führt quantitativ zu einer geringeren Anzahl an Rissen, welche sich qualitativ jedoch erheblich negativer auf den Zustand des Werkzeuges und die Stabilität des Prozesses auswirken. Eine quantitative Auswertung der internen Risse ist aus diesem Grund nicht zielführend, da die schlichte Rissanzahl weder zustandsidentifizierend ist, noch eine Ursache für den Ausfall eines Werkzeuges darstellt. Dennoch zeigt die metallografische Analyse der Querschliffe den verstärkten Verschleißzustand der Gesenke aus den Versuchsreihen I und II im Vergleich zum Gesenk aus der Versuchsreihe III (1 x 1000 Teile).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die über die Losgröße geregelte Variation der thermischen Zyklen einen deutlichen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß hat. Bei konstanter Produktionsmenge ist der Werkzeugverschleiß bei geringen Losgrößen signifikant größer im Vergleich zur hohen Losgrößen. Im Gespräch mit den Mitgliedern des PA wurden die Auswertungsstrategien der Messung des abrasiven Verschleißverlaufs aus Bild 3-11 sowie des Kantenverschleißes Bild 3-13, oben als besonders geeignet identifiziert.

3.3 BS III: Aufstellen der losgrößenabhängigen Instandhaltungskostenfunktion sowie Erweiterung eines Verfahrens zur Losgrößenbildung

3.3.1 Aufstellen einer losgrößenabhängigen Instandhaltungskostenfunktion

In diesem BS wurde zunächst eine theoretische, exemplarische Instandhaltungskostenfunktion erarbeitet und im Anschluss für die durchgeführten Verschleißuntersuchungen aus BS II (vgl. vorangegangenes Kapitel) validiert.

Für eine theoretische Verschleißfunktion wurde allgemein angenommen, dass diese durch einen minimalen und maximalen Wert begrenzt wird, weil ab einem bestimmten Verschleißwert ein Werkzeug versagt bzw. zerbricht. Der Verschleiß hat demnach einen prozessspezifischen Maximalwert. Zudem ist der Verschleiß minimal, wenn das Werkzeug kaum beansprucht wird. Dieser Wertebereich lässt sich normieren, wodurch die Funktion des kumulierten Werkzeugverschleißes von 0 bis 1 begrenzt ist. Dabei entspricht der Wert „1“ einem vollständig verschlissenen Werkzeug und „0“ einem Werkzeug ohne Verschleißerscheinungen. Auf Basis der Diskussion mit Mitgliedern des PA wird eine Hyperbel als losgrößenabhängige Verschleißfunktion angenommen. Mithilfe des Peripheriewinkelsatz

für Hyperbeln besteht nun die Möglichkeit anhand von 3 Verschleißmessungen eine Verschleißfunktion zu approximieren. Als Ergebnis lässt sich durch diese Vorgehensweise eine losgrößenabhängige Verschleißfunktion $VF(x)$ bilden, mit Hilfe derer beliebige weitere Funktionswerte (kumulierte Verschleißwerte) approximiert werden können (Bild 3-14).

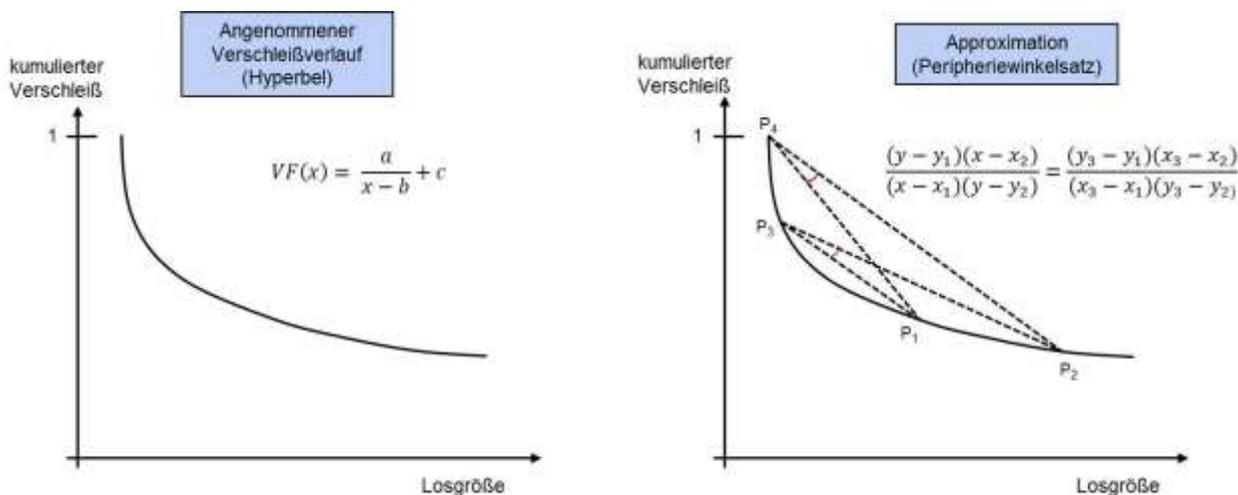


Bild 3-14: Exemplarische Ermittlung der Verschleißfunktion

Die Variable x stellt im allgemeinen Ansatz die bestimmende Einflussgröße auf den Funktionswert (abhängige Größe, in diesem Fall: Verschleiß) dar. Im vorliegenden Fall steht die Variable x für die Losgröße.

Basierend auf dieser theoretischen Vorgehensweise wurde eine Verschleißfunktion für die in BS II durchgeführten Verschleißversuche aufgestellt. Die Überführung der theoretischen Verschleißfunktion in eine reale Verschleißfunktion ist nur mittels einer spezifischen Messgröße an der verschleißanfälligsten Geometrie möglich. Die in BS I entwickelte Verschleißgeometrie wurde so ausgelegt, dass Verschleiß am Radius des konvexen Dorns hervorgerufen wird. Aus diesem Grund wurde, im Dialog mit den Mitgliedern des PA, der Kantenverschleiß als ausschlaggebende Größe für den Zustand dieses fallspezifischen Schmiedegesenks festgelegt und entsprechend bei dem Aufstellen der Verschleißfunktion ausgewertet. Bild 3-13 zeigt die gemittelte Abweichung der Radien im Verhältnis zu dem ursprünglichen Radius R_2 . Es ist zu erkennen, dass die Abweichung ΔR für Obergesenk I 6,7 mm, für Obergesenk II 3,1 mm und für Obergesenk III 1,3 mm beträgt. Für den bestehenden Prozess wird dem Schmiedegesenk subjektiv eine Funktionsfähigkeit zugesagt, bis ein $\Delta R_{max} = 10$ mm erreicht ist. Eine solche subjektive Einschätzung wird in der Praxis in erster Linie durch die von Kunden geforderte Qualität der Werkstücke beeinflusst. In diesem hypothetischen Fall würde eine Radienabweichung von $\Delta R > 10$ mm eine, hinsichtlich der Qualität, nicht zu tolerierenden Abweichung und die produzierten Teile und somit Ausschuss darstellen.

Durch eine Normierung des gemessenen Kantenverschleiß (Gleichung 1) wird das Aufstellen einer resultierenden Verschleißfunktion ermöglicht, die sich aus den einzelnen normierten Verschleißwerten zusammensetzt. Die Berechnung der losgrößenabhängigen normierten Verschleißwerte erfolgt nach Gleichung (1).

$$VF(x_i) = \frac{\Delta R(x_i)}{\Delta R_{max}} \quad \text{für } x_i > 0 \quad (1)$$

- $VF(x_i)$ normierter Verschleißwert

- $\Delta R(x_i)$ Radienabweichung bei der verwendeten Losgröße
- ΔR_{max} maximal zulässige Radienabweichung
- i Index für Messwerte I bis III
- x_i Losgröße bei der Verschleißmessung

Somit ist in Bild 3-15 die resultierende Verschleißfunktion für die in BS II experimentell untersuchte Schmiedeteilgeometrie dargestellt. Die drei abgetragenen Punkte stehen jeweils für die unter Verwendung der entsprechenden Losgrößen ermittelten Verschleißwerte.

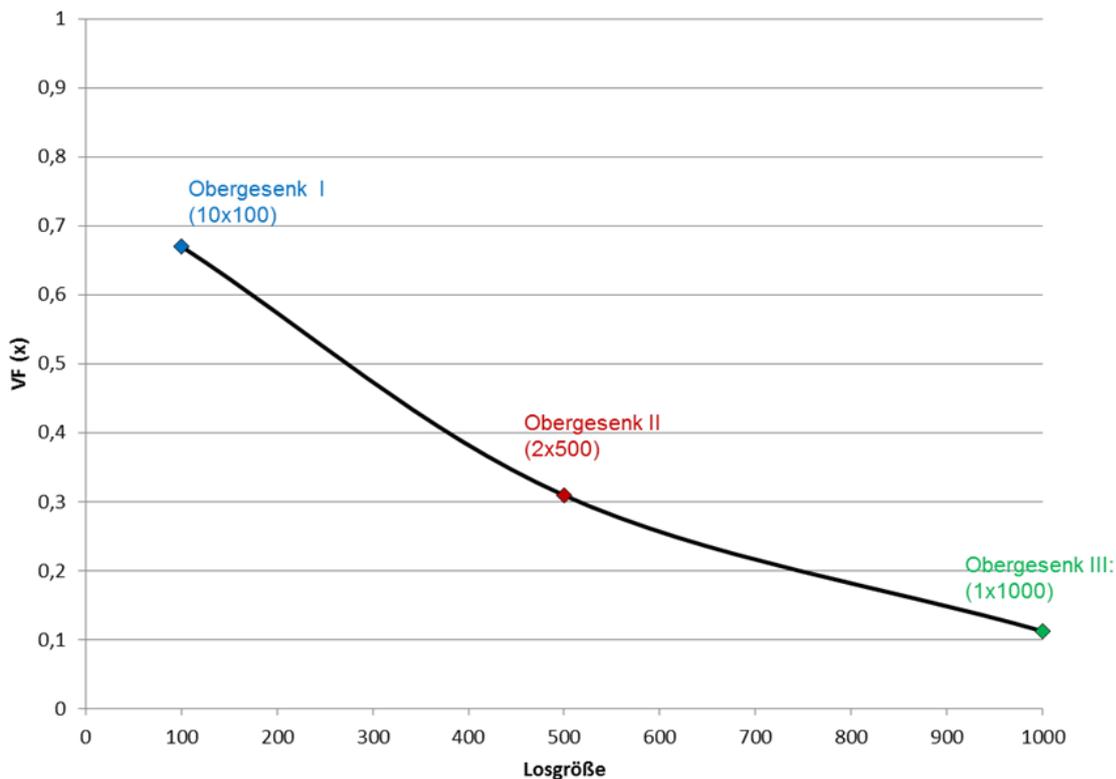


Bild 3-15: Spezifische ermittelte losgrößenabhängige Verschleißfunktion für die in BSII experimentell erfassten Verschleißwerte

Unter Verwendung der losgrößenabhängigen Verschleißfunktion $VF(x)$ und den Kostenstellen c_i der direkten Instandhaltungskosten wurde eine von der Losgröße x abhängige Instandhaltungskostenfunktion (IK) ohne Werkzeugwechsel für eine Produktionsmenge m nach Gleichung 2 formuliert. Zum einen ist unter „ohne Werkzeugwechsel“ zu verstehen, dass kein zweites Werkzeug zur Verfügung steht. Zum anderen ist die Lebensdauer des Werkzeugs größer als die Bedarfsmenge des Produktes in der Planungsperiode definiert.

$$IK(x) = \left(VF(x) \cdot (c_p(x) + c_m(x) + c_f(x) + c_e(x) + c_b(x) + c_h(x) + c_s(x)) \right) \cdot \frac{m}{x} \quad (2)$$

- x Losgröße
- m Produktionsmenge
- c_p Personal
- c_f Fremddienstleistung
- c_m Material und Ersatzteile
- c_e Energie

- c_h Hilfs und Betriebsstoffe
- c_b Betriebsmittel
- c_s Stillstand

In Gleichung (2) sind alle Kostensätze von der Losgröße x abhängig, weil nach Aussagen der PA Mitglieder von der Losgröße die Häufigkeit und die Dauer der Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst wird. Damit werden auch alle aufgeführten Kostensätze auch von der Losgröße x beeinflusst. Zur Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße unter Berücksichtigung losgrößenabhängiger Instandhaltungskosten wurden die bestehenden deterministischen Modelle der Losgrößenbildung von ANDLER und MÜNZBERG um die losgrößenabhängigen Instandhaltungskosten erweitert. Aus Veranschaulichungsgründen wurden hierfür die direkten Instandhaltungskosten zu IK^* zusammengefasst. Hierbei sind in IK^* prozessspezifische Kosten impliziert, die direkt aus Instandhaltungsmaßnahme hervorgehenden und den einzelnen Kostenstellen zugeordnet werden können (vgl. Gleichung 2). Für das Losgrößenmodell von ANDLER ergibt sich die Gesamtkostenfunktion (Auftragswechselkosten, Rüstkosten, Instandhaltungskosten) nach Gleichung 3:

$$GK^{Andler^*} = \frac{x}{2} \cdot s \cdot p + \left((VF(x) \cdot IK^*(x)) + E \right) \cdot \frac{m}{x} \quad (3)$$

- GK Gesamtkosten nach Andler
- s Herstellkosten
- p Lagerhaltungskostensatz
- IK^* direkte Instandhaltungskosten
- E Auftragswechselkostensatz

Zur Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße ist eine Differenzierung der Gleichung 3 nach der Losgröße x erforderlich. Die Instandhaltungskosten sind allerdings wesentlich vom Werkzeugverschleiß abhängig. Für die Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße ist aus mathematischer Sicht eine spezielle Lösungsheuristik erforderlich. Diese spezielle Lösungsheuristik ist allerdings nicht erforderlich, wenn zum einen deterministische Verschleißfaktoren VF_n (im Gültigkeitsbereich n) für eine Losgröße angenommen werden und zum anderen davon ausgegangen wird, dass unabhängig vom Werkzeugverschleiß immer dieselbe Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt wird. Im Zuge dessen wurde der Verlauf der Instandhaltungskosten in Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes als linear angenommen, d.h. es wurde von einem maximalen Instandhaltungsaufwand $IK^{*,max}$ beim größtmöglichen Werkzeugschleiß ausgegangen. Zur Bildung von deterministischen Verschleißfaktoren wurde die losgrößenabhängige Verschleißfunktion als Sprungfunktion betrachtet. Hierdurch wurde für jeden Verschleißfaktor ein Gültigkeitsbereich n definiert, welcher sich von der minimal gültigen Losgröße x_n^{min} bis zu der maximal gültigen Losgröße x_n^{max} erstreckt. Vereinfacht lässt sich das Intervall eines Gültigkeitsbereichs bzw. der Gültigkeitsbereiche bestimmen, indem die prozesstechnisch maximale Losgröße durch die Anzahl der betrachteten Gültigkeitsbereiche dividiert wird. Durch die Anzahl der betrachteten Gültigkeitsbereiche besteht somit die Möglichkeit, die Genauigkeit der Ergebnisse bzw. den Rechenaufwand zu beeinflussen. Für eine exakte Approximation der Verschleißfunktion als Sprungfunktion sind hingegen spezielle mathematische Verfahren erforderlich. Eine schematische Darstellung des vereinfachten Vorgehens zeigt Bild 3-16. Das angepasste

Losgrößenmodell nach ANDLER und die sich daraus ergebende kostenoptimale Losgröße können somit nach Gleichung 4 berechnet werden.

$$GK_n^{Andler*} = \frac{x}{2} \cdot s \cdot p + ((VF_n \cdot IK^{*,max}) + E) \cdot \frac{m}{x} \text{ für } x_n^{min} \leq x \leq x_n^{max} \quad (4)$$

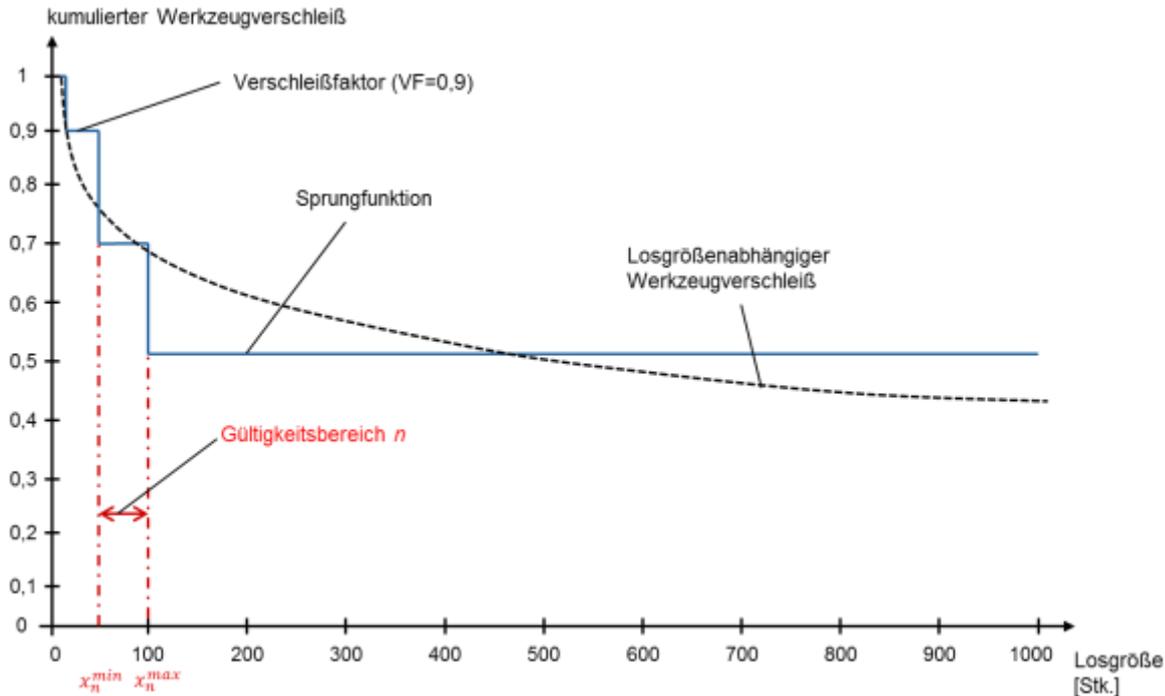


Bild 3-16: Bestimmung der deterministischen Verschleißfaktoren

3.3.2 Erweiterung eines bestehenden Verfahrens zur Losgrößenbildung

Die Erweiterung der bestehenden Verfahren zur Losgrößenbildung erfolgt auf Basis der theoretischen Herleitung einer Verschleißfunktion mittels einer approximierten Sprungfunktion, da dadurch eine besser Allgemeingültigkeit der Gesamtmethode gewährleistet werden kann. (vgl. Kapitel 3.3.1, Bild 3-16). Durch das oben beschriebene Vorgehen wird letztlich eine Funktion über alle Gültigkeitsbereiche n erzeugt, die unterschiedliche lokal optimale Losgrößen für einen Fertigungsprozess besitzen. Um festzustellen, wo das globale Minimum der Funktionsschar liegt, muss eine Fallunterscheidung vorgenommen werden. Generell wird iterativ geprüft, ob die berechnete Losgröße innerhalb oder außerhalb des für den deterministischen Verschleißfaktor zulässigen Gültigkeitsbereichs liegt. Die berechnete Losgröße entspricht der globalen kostenoptimalen Losgröße, wenn die berechnete Losgröße innerhalb des für den deterministischen Verschleißfaktor zulässigen Gültigkeitsbereichs liegt. Sofern die berechnete Losgröße unterhalb des zulässigen Bereiches liegt, handelt es sich um eine lokale optimale Losgröße. Diese wird durch die kleinste mögliche Losgröße des Gültigkeitsbereichs definiert. Hierbei ist zu beachten, dass die kleinste mögliche Losgröße nicht der kostenoptimalen Losgröße entsprechen muss. Im Gegensatz dazu wird die maximal mögliche Losgröße als lokal optimale Losgröße definiert, wenn die berechnete Losgrößer oberhalb des für den Verschleißfaktor zulässigen Gültigkeitsbereichs liegt. Die entsprechenden Rechenvorschriften sind in der folgenden Gleichung (5) aufgeführt.

$$x_{n,opt}^{lokal,Andler}(y) = \begin{cases} y & \text{für } x_n^{min} < y < x_n^{max} \\ x_n^{min} & \text{für } x_n^{min} \geq y \\ x_n^{max} & \text{für } x_n^{max} \leq y \end{cases} \quad (5)$$

- mit $y = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot (VF_n \cdot IK^{*,max} + E)}{p \cdot s}}$

Für die Integration der Instandhaltungskosten in das Losgrößenmodell von MÜNZBERG wurden in gleicher Weise deterministische Verschleißfaktoren angenommen. Die erweiterte Gesamtkostenfunktion nach MÜNZBERG ohne Werkzeugwechsel ergibt sich in Gleichung (6) wie folgt:

$$GK_n^{Münzberg*} = \frac{m}{x} \cdot (E + VF_n \cdot IK^{*,max}) + \frac{x}{2} \cdot s \cdot p \cdot LF \quad (6)$$

- LF Logistikkostenfaktor

Der Unterschied zwischen dem Losgrößenmodell nach Münzberg zu dem Losgrößenmodell von ANDLER ist der Logistikkostenfaktor LF . Zur Berechnung der kostenoptimalen Losgröße unter Berücksichtigung deterministischer Verschleißfaktoren ergibt sich für das erweiterte Losgrößenmodell nach MÜNZBERG die in Gleichung (7) dargestellte Fallunterscheidung:

$$x_{n,opt}^{lokal,Münz}(z) = \begin{cases} z & \text{für } x_n^{min} < z < x_n^{max} \\ x_n^{min} & \text{für } x_n^{min} \geq z \\ x_n^{max} & \text{für } x_n^{max} \leq z \end{cases} \quad (7)$$

- mit $z = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot (VF_n \cdot IK^{*,max} + E)}{LF \cdot p \cdot s}}$

Innerhalb des ersten Falls liegt die berechnete Losgröße innerhalb des für den deterministischen Verschleißfaktor zulässigen Bereiches. Das bedeutet, dass die berechnete Losgröße dem globalen Kostenoptimum entspricht. Im zweiten Fall befindet sich die berechnete Losgröße unterhalb des zulässigen Bereiches. Das lokale Optimum entspricht demnach der kleinsten möglichen Losgröße x_n^{min} . Für den dritten Fall wird die obere Grenze x_n^{max} als lokaloptimale Losgröße definiert. Diese lokalen Optima sind in Bild 3-17 visualisiert. Der wesentliche Unterschied zu dem Modell von ANDLER ist die Berücksichtigung des sogenannten Logistikkostenfaktors beim Modell von MÜNZBERG. In Bild 3-17 wird der Logistikkostenfaktor exemplarisch mit $LF = 8$ definiert. Letztlich hängt der Einfluss von Instandhaltungskosten bei der Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße vom Verhältnis der Instandhaltungskosten zu den Logistikkosten ab.

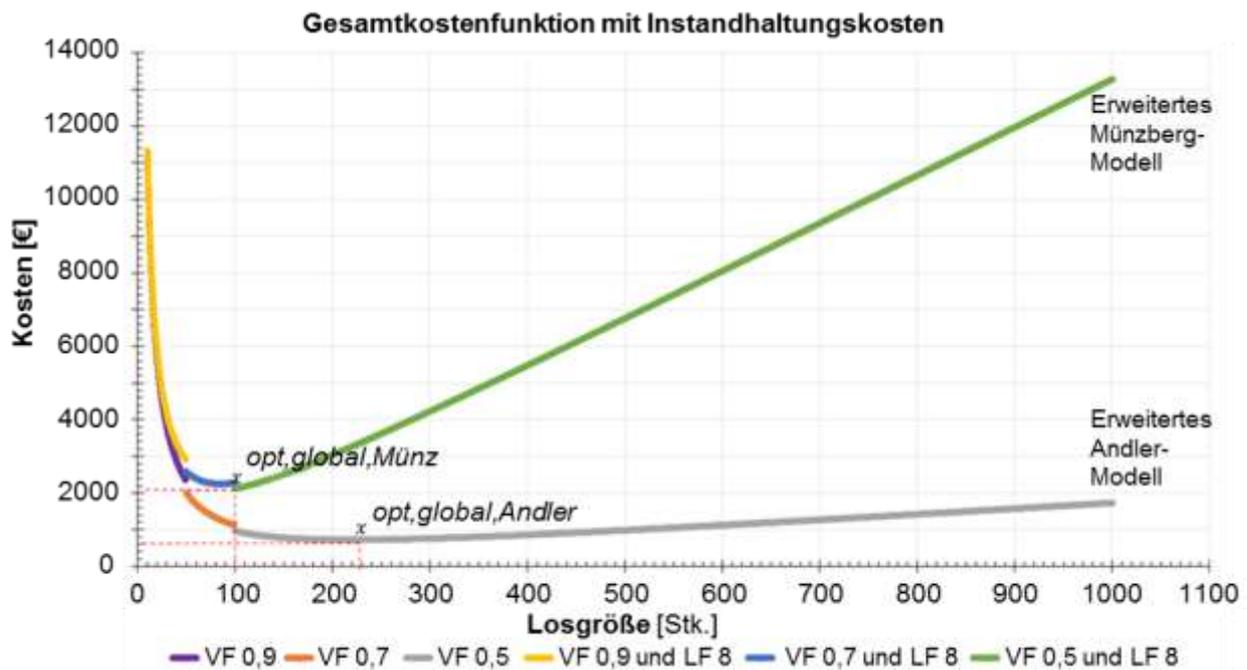


Bild 3-17: Beispielhafte Anwendung des erweiterten Losgrößenbildungsverfahrens

3.4 BS IV: Entwicklung eines Leitfadens sowie Erstellung eines Softwaredemonstrators

3.4.1 Entwicklung eines Softwaredemonstrators

Zur vereinfachten Anwendung der erweiterten Losgrößenmodelle wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der eine automatisierten Berechnung von entstehenden Kosten und kostenoptimalen Losgrößen ermöglicht. Unter Verwendung von MS EXCEL wurde mittels VBA die Programmierung eines solchen Demonstrators durchgeführt. Die Verwendung des weiterverbreiteten Programms MS EXCEL stellt eine breite und barrierefreie Anwendbarkeit der entwickelten Gesamtmethode sicher, da in der Regel von den anwenden Unternehmen keine zusätzlichen Softwarelizenzen beschafft werden müssen.

Die im Softwaredemonstrator erfolgte Unterteilung zwischen Benutzeroberfläche, Kostenfunktionen und Kostensensitivität 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. Darüber hinaus werden die Ergebnisse einer kostenoptimalen Losgröße für die Berechnungsverfahren nach ANDLER, MÜNZBERG sowie die erweiterten Verfahren dargestellt (siehe Bild 3-18).

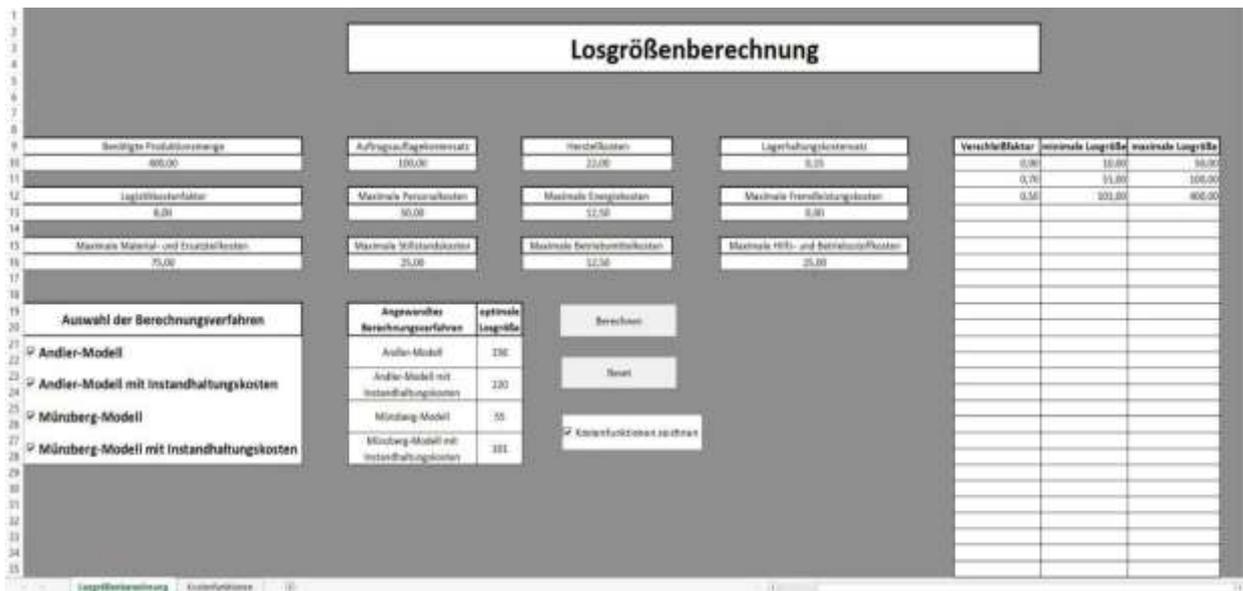


Bild 3-18: Screenshot der Benutzeroberfläche des entwickelten Softwaredemonstrators

Zusätzlich zu der Eingabe benötigter Parameter besteht die Möglichkeit mittels Checkboxen zu wählen, welche der betrachteten Berechnungsverfahren durchgeführt werden sollen. Die Ergebnisse für die optimalen Losgrößen werden direkt auf dem ersten Tabellenblatt dargestellt. Die resultierenden Kostenfunktionen werden in einem separaten Tabellenblatt dargestellt (siehe Bild 3-19).

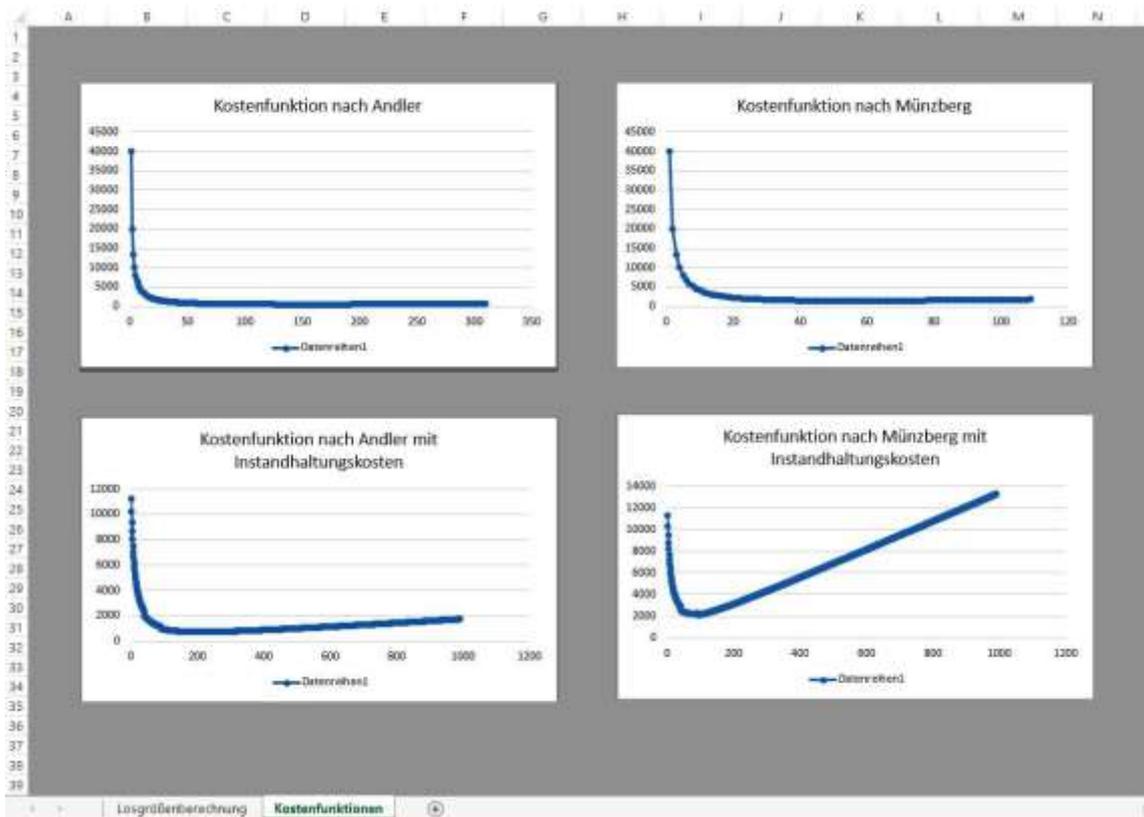


Bild 3-19: Darstellung der Kostenfunktionen im Softwaredemonstrator

Die hier gezeigten Funktionen bestehen aus Datenreihen, die für jeden relevanten Losgrößenwert die entsprechenden Kosten zeigen. Somit finden sich die kostenoptimalen Losgrößen als Minima der entsprechenden Diagramme wieder.

3.4.2 Entwicklung eines Leitfadens zur Anwendung des Softwaredemonstrators

Der entwickelte Gestaltungsleitfaden enthält die Vorgehensweise zur Anwendung des erweiterten Losgrößenberechnungsverfahrens und des Softwaredemonstrators. Dieser Leitfaden soll KMU bei der systematischen Ableitung der in Abhängigkeit ihrer Werkzeuggeometrien stehenden Modellfunktion des Verschleißes unterstützen, die wiederum in die Instandhaltungskostenfunktion und somit den Softwaredemonstrator einfließen. Auf Basis dieser Methode können Produktions- und Fertigungsplaner zukünftig die kostenoptimale Losgröße prozessspezifisch berechnen und wirtschaftliche Folgen einer Abweichung erkennen. Der Gestaltungsleitfaden wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Die allgemeine Vorgehensweise zur Anwendung der in diesem Forschungsprojekt entwickelten Gesamtmethode und entsprechend des Softwaredemonstrators ist im Leitfaden in Form einer teil-sequenziellen, teil-simultanen Handlungsanweisung Bild 3-20 dargestellt.

Dieses Leitfadenschaubild beschreibt letztlich nichts anderes als das im Forschungsprojekt angewendete Vorgehen zur kostenoptimalen Losgröße für ein spezifisches Schmiedeteil. Unternehmen können diesem Leitfaden entnehmen, welche Schritte, in welcher Form und in welcher Reihenfolge durchgeführt werden müssen, damit der im Projekt entwickelte Softwaredemonstrator zur Ermittlung der kostenoptimalen Losgröße angewendet werden kann.

Leitfaden für Verwendung des Softwaredemonstrators

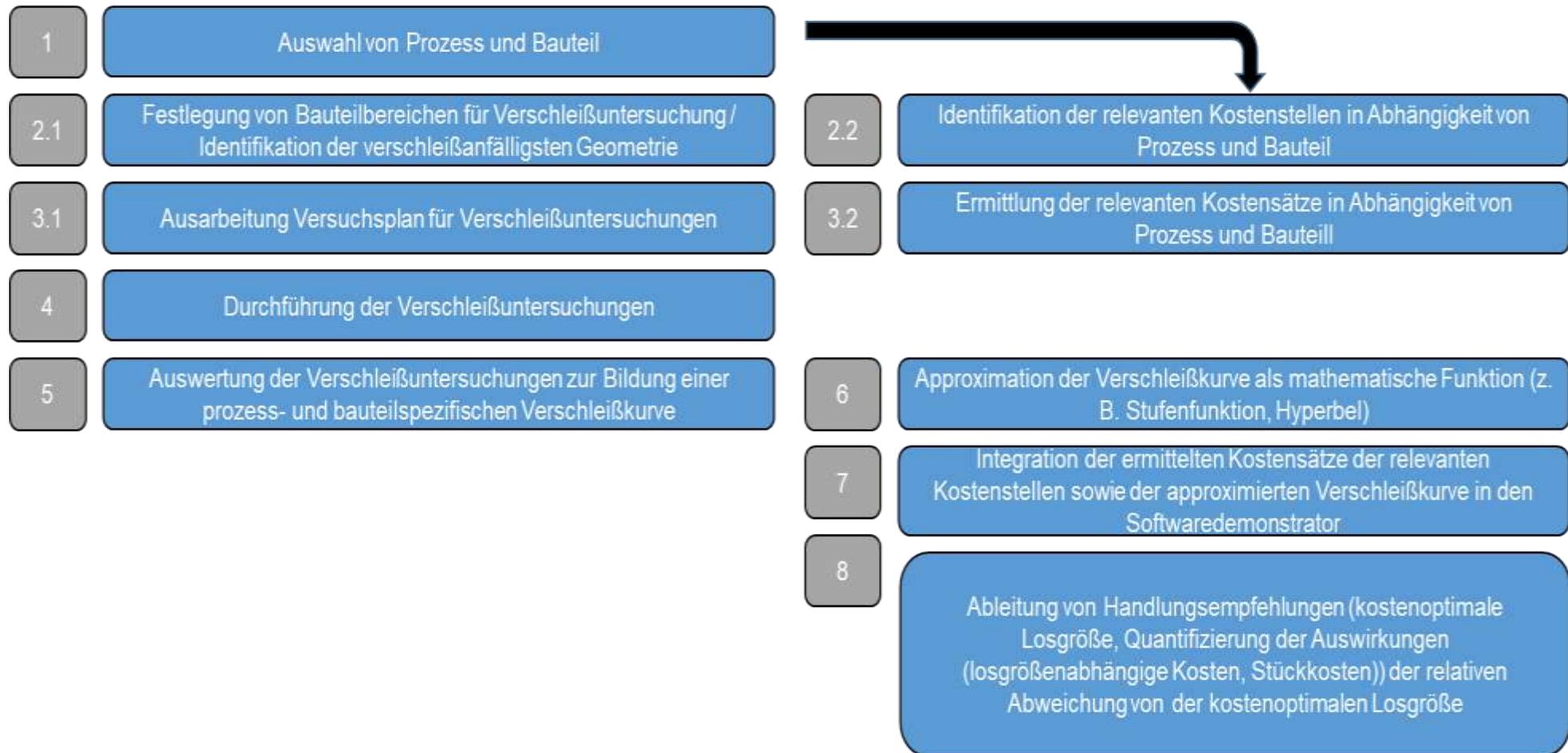


Bild 3-20: Leitfaden zur Verwendung des Softwaredemonstrators in Form einer teil-sequenziellen, teil-simultanen Handlungsanweisung

4 Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Leibniz Universität Hannover. Während die universitären Mutterinstitute des IPH den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Projekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Anschriften

| | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Forschungsstelle | IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH |
| Anschrift | Hollerithallee 6, 30419 Hannover |
| Institutsleiter | Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer Dr.-Ing. Malte Stonis |
| Projektleiter | Johannes Richter, Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Henrik Prinzhorn, M. Sc. |

5 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 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

6 Literaturverzeichnis

- [And29] Andler, K.: Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße, Oldenburg Verlag, Berlin, 1929.
- [Awi12] Awizus, B.; Bast, J.; Dürr, H.; Matthes, K.-J.: Grundlagen der Fertigungstechnik, München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [Doe10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [Hof12] Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spor, G.: Handbuch Umformen, München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [Imu16] Industrieverband Massivumformung: Kennzahlen Industrieverband Massivumformung. [Online]. Available: www.massivumformung.de, 2016.
- [Mün13] Münzberg, B.: Multikriterielle Losgrößenbildung (Dissertation), Garbsen: Berichte aus dem IFA, 2013.
- [Pri17] Prinzhorn, H.; Richter, J.; Langner, J.; Stonis, M.: Lot sizing in the forging industry considering lot size depending tool wear. In: Production Engineering, Volume 12, Issue 1, pp 53–63, Springer Berlin Heidelberg, 2017.

7 Bilderverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 2-1: Logistische Positionierung in der Losgrößenbildung..... | 4 |
| Bild 4-1: Zuordnung von Bearbeitungsschritten zu Teilzielen | 5 |
| Bild 4-2: Werkstückzeichnung der Versuchsgeometrie (links) | 6 |
| Bild 4-3: Obergesenk der entwickelten Versuchsgeometrie für experimentelle Untersuchungen des losgrößenabhängigen Werkzeugverschleißes | 6 |
| Bild 4-4: Simulative Ermittlung des Temperaturfeldes in Obergesenk und Untergesenk nach Einstellen des thermischen Gleichgewichtes (Thermal-Steady-State-Simulationen) | 7 |
| Bild 4-5: Simulative Ermittlung des abrasiven Verschleißes an Ober- und Untergesenk nach 1000 Schmiedezyklen | 7 |
| Bild 4-6: Konturlinie zur Erfassung des Verschleißbildes am Stempel..... | 8 |
| Bild 4-7: Abrasiver Verschleiß am Stempel entlang Konturlinie S..... | 8 |
| Bild 4-8: Fertigungszeichnungen von Obergesenk (links) und Untergesenk (rechts)..... | 9 |
| Bild 4-9: Werkstückzeichnung der Versuchsgeometrie (links) und CAD-Modell des korrespondierenden Werkzeugsystems (rechts)..... | 10 |
| Bild 4-10: Optische Verschleißmessung der Obergesenke für Versuchsreihe I, II, III..... | 11 |
| Bild 4-11: Vergleich des Verschleißverlaufs entlang der Konturlinie am Obergesenk für die Versuchsreihen I, II und III | 12 |
| Bild 4-12: Messstrategie zur Erfassung des Kanten- bzw. Radienverschleißes am Dorn im Obergesenk | 13 |
| Bild 4-13: Vergleich des Kantenverschleiß (oben) und metallografische Analyse (unten) der Obergesenke der Versuchsreihen I, II und III..... | 13 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 4-14: Exemplarische Ermittlung der Verschleißfunktion..... | 15 |
| Bild 4-15: Spezifische ermittelte losgrößenabhängige Verschleißfunktion für die in BSII experimentell erfassten Verschleißwerte | 16 |
| Bild 4-16: Bestimmung der deterministischen Verschleißfaktoren | 18 |
| Bild 4-17: Beispielhafte Anwendung des erweiterten Losgrößenbildungsverfahrens..... | 20 |
| Bild 4-19: Screenshot der Benutzeroberfläche des entwickelten Softwaredemonstrators | 21 |
| Bild 4-20: Darstellung der Kostenfunktionen im Softwaredemonstrator | 21 |
| Bild 4-22: Leitfaden zur Verwendung des Softwaredemonstrators in Form einer teilsequenziellen, teil-simultanen Handlungsanweisung..... | 23 |

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Parameter zur experimentellen Untersuchung des losgrößenabhängigen Verschleißes | 10 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|