
Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen durch methodische Prozessoptimierung in der Fertigungstechnik



Zusammenfassung

Steigender Innovationsdruck auf produzierende Unternehmen fordert diese zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit durch eine ständige Verbesserung ihrer bestehenden Fertigungsprozesse auf. Mit steigender Komplexität der Prozesse erhöht sich der Optimierungsaufwand und es werden strukturierte Methoden für ein systematisches Optimierungsvorgehen benötigt. Der „Plan-Do-Check-Act“-Zyklus (PDCA-Zyklus) stellt dabei ein allgemeines Vorgehen mit einer Vielzahl von Instrumenten zur inkrementellen Verbesserung dar. Dieses Whitepaper erläutert die Grundidee des PDCA-Zyklus sowie ausgewählte Optimierungsmethoden und projiziert diese auf fertigungstechnische Problemstellungen. Zusätzlich werden einzelne Methoden am Praxisbeispiel „Mehrdirektionales Schmieden von Stahlkolben zur Minimierung des Zerspannungsaufwandes“ anschaulich erklärt.

Kontinuierliche Verbesserung garantiert Unternehmenserfolg

Starker Wettbewerb, neue Gesetze und steigende Kundenforderungen zwingen produzierende Unternehmen regelmäßig zu inkrementellen und disruptiven Innovationen ihres Produktportfolios. Um im globalen Kontext wettbewerbsfähig zu bleiben, benötigen Unternehmen ein strukturiertes Vorgehen zur kontinuierlichen Effizienzsteigerung. Solch ein Vorgehen ist der in Bild 1 dargestellte „Plan-Do-Check-Act“-Zyklus. Zu Beginn erfolgt die Erfassung des aktuellen IST-Zustandes mit anzustrebender Zieldefinition für den angestrebten SOLL-Zustand. Anschließend folgt die zielgerichtete Maßnahmenplanung („Plan“). Die Umsetzung entsprechender Maßnahmen geschieht im darauffolgenden Schritt („Do“). Abschließend wird ein Vergleich des SOLL- und IST-Zustandes vorgenommen („Check“), um weitere Verbesserungspotenziale zu identifizieren und gegebenenfalls neue Maßnahmen in die Wege zu leiten („Act“) [INT01].

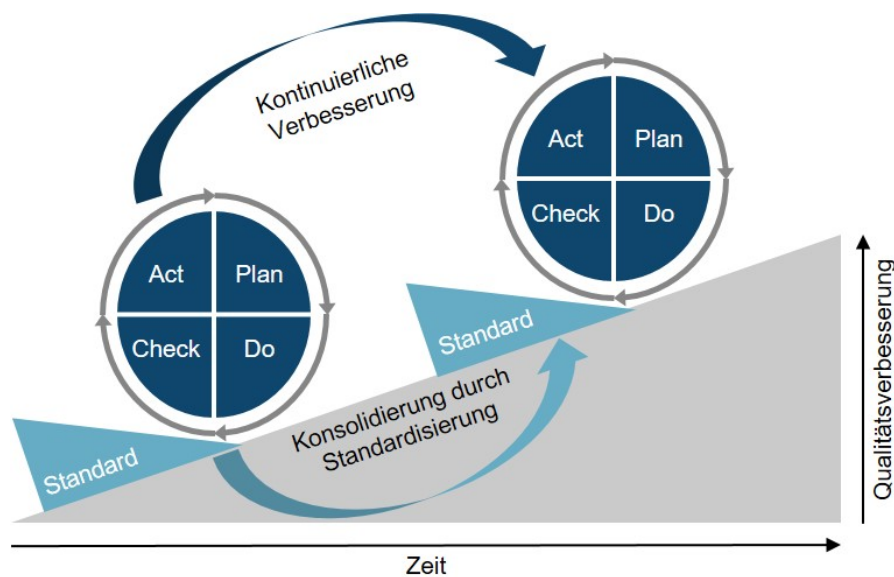


Bild 1: Schritte des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses nach Kaizen im "Plan-Do-Check-Act"-Zyklus [DEM18]

Der verbesserte Prozess wird als neuer Standard implementiert. Sobald dieser jedoch Mängel aufweist, wird der PDCA-Zyklus erneut durchlaufen, um weiteres Verbesserungspotenzial auszuschöpfen. Dieses Vorgehen ist allgemeingültig und kann auf Technik- und Managementprozesse projiziert werden. Die Absicht dieses Whitepapers ist die Erläuterung des PDCA-Zyklus im Kontext der methodischen Prozessoptimierung in der Fertigungstechnik mit Fokus auf umformtechnische Fragestellungen.

Einen Gesamtüberblick zur strukturierten Prozessoptimierung in der Fertigungstechnik liefert das Flussdiagramm in Bild 2. In den folgenden Kapiteln werden Details der einzelnen Bereiche und die dazugehörigen Methoden kurz erläutert sowie anhand eines Praxisbeispiels verdeutlicht.

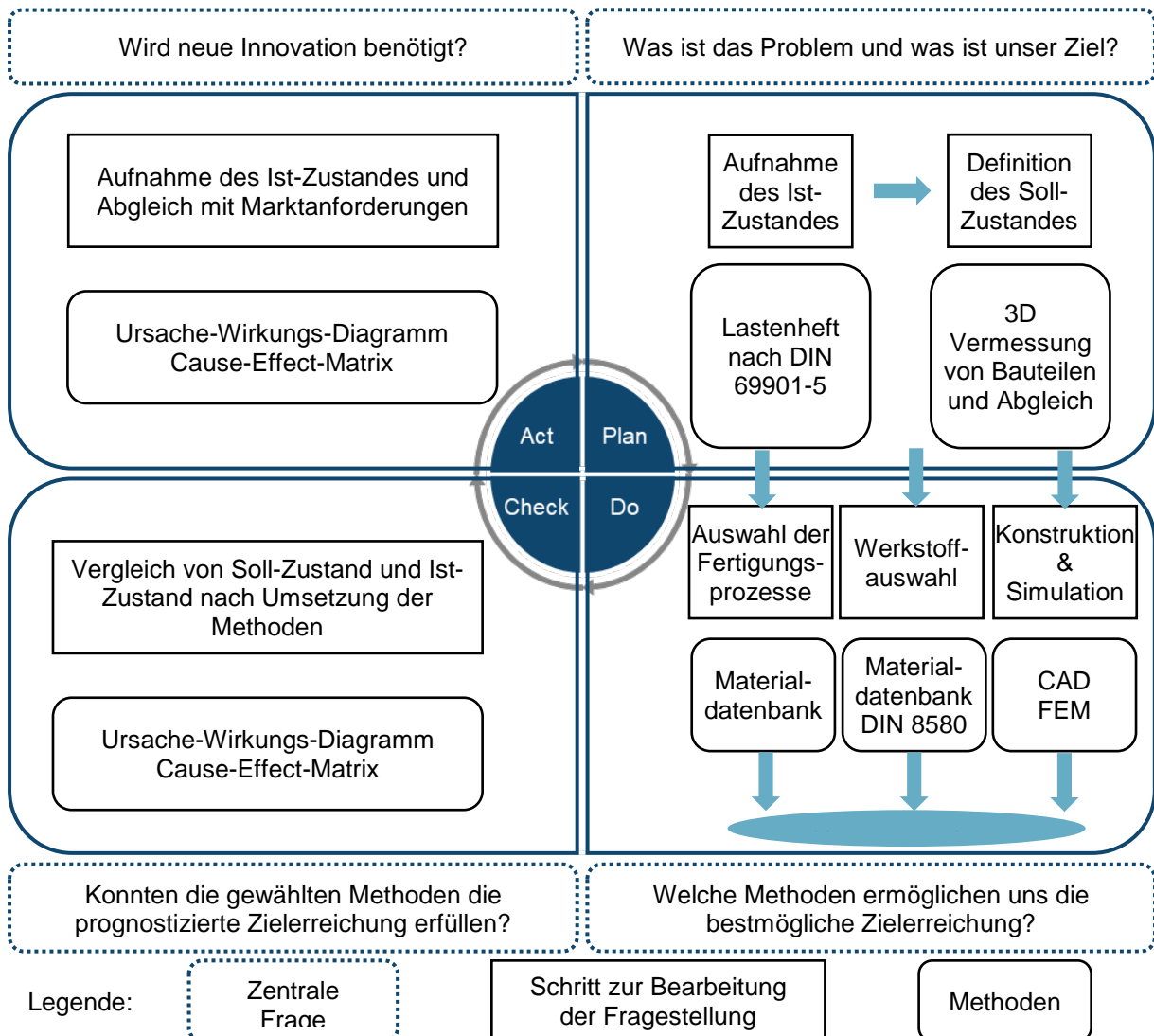


Bild 2: Schaubild eines auf fertigungstechnische Fragestellungen adaptierten PDCA-Zyklus zur methodischen Prozessoptimierung

Praxisbeispiel – Nachbearbeitungsarmes Schmieden von Stahlkolben

Ein Hauptkostenpunkt bei der Fertigung von Schmiedeteilen liegt in der spanenden Endbearbeitung der Schmiedeteile. Zur Ausbildung von Funktionsflächen muss ein Materialabtrag erfolgen, dessen Kosten auf durchschnittlich etwa 50 Prozent der Herstellungskosten geschätzt werden [HIR11]. Große Bedeutung besitzt dies für in Massenfertigung produzierte Schmiedeteile im Automobilbau, da diese strikten Lieferfristen, hohen Qualitätsansprüchen und geringen Margen unterliegen. Verbesserte Fertigungsprozesse, die bei gleicher Qualität Verbesserungspotenziale besitzen, z. B. durch Verkürzung der Durchlaufzeiten, Minimierung der Fertigungsschritte und Materialeinsatz,

senken Herstellungskosten und sichern so die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Bild 3 links zeigt einen typischen Zylinderkopfkolben mit seitlichen Kolbenbolzenbohrungen. Diese Bohrungen werden beim konventionellen Gesenkschmieden durch einen zusätzlichen Zerspanungsschritt angefertigt. Entsprechende Kosten für die Zerspanung und Kosten durch Materialverlust können eingespart werden, indem die Kolbenbolzenbohrungen bereits im Schmiedeprozess realisiert werden. Das Bild 3 verdeutlicht, wie beim mehrdirektionalen Schmieden die Stempel die Kolbenbolzenbohrungen zu einem dünnwandigen Hohlraum eindrücken. Dadurch wird die Zerspanung zur Endkontur vereinfacht und Material gespart. Anhand dieses Beispiels erfolgt die Erläuterung der in Bild 2 illustrierten methodischen Prozessoptimierung in der Fertigungstechnik.

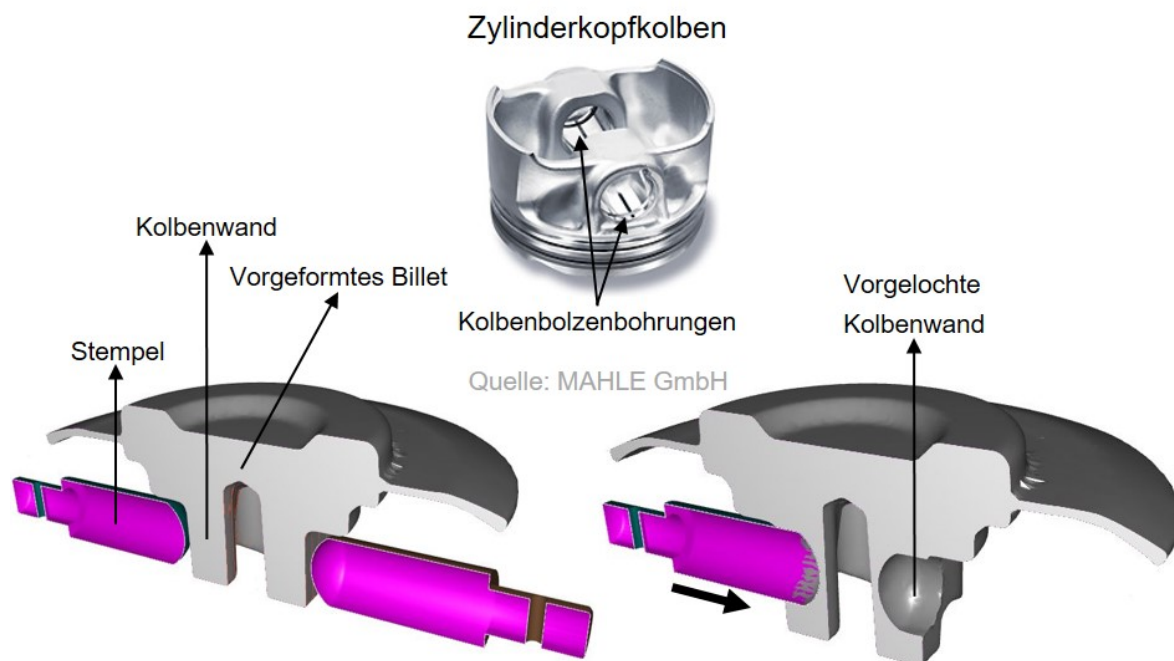


Bild 3: CAD-Darstellung eines Zylinderkopfkolbens (oben) und Vollschnittdarstellung eines Simulationsergebnisses der Ausformung der Kolbenbolzenbohrungen durch mehrdirektionales Schmieden (unten links: Prozessbeginn, unten rechts: Prozessende)

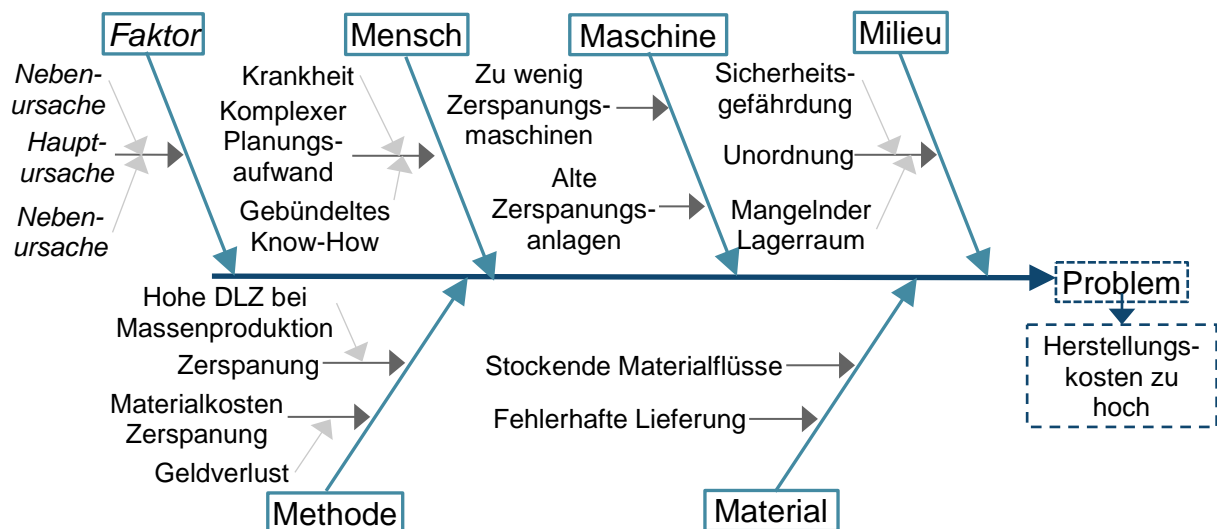
PDCA-Zyklus - Plan

Aufnahme des Ist-Zustandes

Ziel der Ist-Analyse ist die systematische Identifikation aller prozessrelevanten Informationen. Erkenntnisse über alle prozessbestimmenden Informationen geben Aufschluss über Unzulänglichkeiten des zu optimierenden Prozesses und ermöglichen die Suche nach Ursachen. Die Identifikation aller wichtigen Informationen und Wirkzusammenhänge stellt eine Herausforderung an die Unternehmen dar. Gründe wie der Umfang, die Komplexität und Wechselwirkung von Einflussgrößen sind dafür maßgeblich verantwortlich. Aus diesem Grund benötigt es Methoden zur systematischen und strukturierten Aufnahme des Ist-Zustandes. Hierbei werden qualitative und quantitative Methoden zur Informationserfassung und Ursachenbewertung unterschieden.

Das sogenannte Ursache-Wirkungs-Diagramm ist in Bild 4 zu sehen und ist eine qualitative Methode, bei der alle Haupt- und Nebenursachen strukturiert aufgelistet werden. Durch die verknüpfte Darstellung der Teilursachen aus den Faktoren „Mensch“, „Maschine“, „Material“, „Milieu“ und „Methode“ lassen sich konkrete Wirkzusammenhänge ableiten und der Grund für das bestehende Problem identifizieren [ORG18]. Im Fall der Stahlkolbenproduktion herrscht das Problem, dass die hohen Herstellungskosten von vorgeschmiedeten und nachträglich zerspannten Stahlkolben nur einen Einsatz in großen und hochpreisigen Motoren erlauben. Verantwortlich dafür sind unter anderem der komplexe Fertigungsplanungsaufwand, hohe Anforderungen an die Positionierung bei der Zerspanung, was lange Durchlaufzeiten bedeutet, und hohe Kosten durch Materialverlust bei der Zerspanung.

Bild 4: Illustration eines Ursache-Wirkungs-Diagramms von vorgeschmiedeten und nachträglich zerspannten



Stahlkolben, [in Anlehnung an ORG18].

Nach der qualitativen Ursachenerkennung muss eine Quantifizierung der Wirkung erfolgen, um einzelne Ursache in ihrer Bedeutung gegenüberstellen zu können. Hierfür wird wie in Tabelle 1 eine Cause-Effect-Matrix aufgestellt. Diese gibt durch die Zuordnung von Zahlenwerten zu den einzelnen Ursachen an, wie stark eine Ursache vom Ursachenkollektiv beeinflusst wird („Passivsumme“) oder eine Ursache ein Ursachenkollektiv beeinflusst („Aktivsumme“). Das Auftreten von lokalen Maxima dient als Indikator für die problemverursachenden Hauptursachen, deren Lösung oberste Priorität hat [ORG18].

Die Gewichtung der Ursachen im Praxisbeispiel hinsichtlich ihrer Einflussstärke zeigt, dass die hohen Materialkosten und die langen Durchlaufzeiten, hervorgerufen durch den nachgelagerten Zerspanungsschritt, für die Kolbenbolzenbohrungen die Hauptursache für die hohen Herstellungskosten sind. Die Fertigung der Stahlkolben muss dementsprechend zerspanungsfrei beziehungsweise einen minimalen Anteil an spanender Nachbearbeitung besitzen, um wirtschaftlicher zu werden.

Tabelle 1: Beispielhafte Cause-Effect-Matrix des mehrdirektionalen Schmiedeprozesses von Stahlkolben

Wirkung von ...		Wirkung auf ...						Aktivsumme:
		A	B	C	D	E	F	
Anzahl Fertigungsschritte	A	x	0	1	2	3	1	7
Belegungsplan der Zerspanungsanlagen	B	3	x	1	1	1	2	8
Alter Zerspanungsanlagen	C	1	1	x	2	1	2	7
Know-How der Mitarbeiter	D	2	3	0	x	1	1	7
Materialkosten Zerspanung	E	2	2	1	3	x	3	11
Durchlaufzeiten	F	2	3	2	1	2	x	10
	Passivsumme:	10	9	5	9	8	9	

Definition des Soll-Zustandes

Das Lastenheft dient zur Zielbestimmungen im Projekt und der genauen Eigenschaftsdefinition des gewünschten Produktes. Hierbei werden alle funktionalen Anforderungen und nicht funktionalen Anforderungen nach der DIN 69901-5 Projektmanagement(-systeme) strukturiert erfasst und als anzustrebender SOLL-Zustand festgelegt. Ein Meilensteinplan mit zeitabhängigen Teilzielen dient als Kontrollinstrument zur Überprüfung des Bearbeitungsstandes und soll eventuelle Missstände frühzeitig aufdecken [DIN09]. Funktionale Anforderungen im Projekt zum nachbearbeitungsarmen Schmieden von Stahlkolben sind die Umsetzung des beanspruchungsgerechten Faserverlaufs in der Kolbenbolzenbohrung, die Einhaltung der geforderten Maß- und Formtoleranzen sowie die Prozessstabilität bei der Massenfertigung. Auf der Seite der nicht-funktionalen Anforderungen stehen die Lebensdauer des Werkzeuges, die Integrierbarkeit des Schmiedeprozesses in die bestehende Fertigungskette und die Kalkulation der Fertigungskosten im Vordergrund.

Um die Relevanz einzelner Anforderungen priorisieren zu können, benötigt es einer Bewertungsmethode, die technische und wirtschaftliche Anforderungen quantitativ vergleichbar macht. Eine Methode ist die „technisch-wirtschaftliche Bewertung“ nach VDI 2225. Hierbei lassen sich quantitativ vergleichbare Festanforderungen und Mindestanforderungen ableiten. Erstere müssen unter allen Umständen erfüllt werden, wobei letztere einen gewissen Spielraum hinsichtlich ihrer Präzision der Erfüllung zulassen [VDI98].

PDCA-Zyklus – Do

Strategische Werkstoffauswahl

Jegliche Produkte sind aus einem Werkstoff gefertigt, der maßgeblich die geforderten Endigenschaften bestimmt und die Fertigungsparameter beeinflusst. Dementsprechend bildet die strategische Werkstoffauswahl eine der grundlegenden Aufgaben in der methodischen Prozessoptimierung.

Im ersten Schritt gilt es auf Basis des Lastenhefts die benötigten Eigenschaften des Werkstoffes zu identifizieren. Aktuell existieren mehrere konkurrierende Werkstoffdatenbanken, die sich in der Vielfalt der hinterlegten Werkstoffdatenblätter und in den Funktionsmöglichkeiten unterscheiden. Leistungsstarke Vertreter sind die Materialdatenbanken von MATWEB, TOTALMATERIA, WIAM und CES SELECTOR. Letzter verfügt über die Möglichkeit, einzelne Werkstoffeigenschaften in einem funktionellen Zusammenhang zu setzen und alle Werkstoffe entsprechend ihrer Werte zu clustern. Dieses Vorgehen ermöglichte es, aus einer Vielzahl von Werkstoffen den 42CrMo4 als optimalen Kompromiss aus Werkstoffeigenschaften und Preis zu identifizieren.

Strategische Auswahl des Fertigungsprozesses

Nachdem der Werkstoff definiert ist, erfolgt die strategische Auswahl eines geeigneten Fertigungsprozesses. Einen ersten Überblick liefert die DIN 8580 mit entsprechenden Prozesscharakteristika und -grenzen. Zusätzlich wird auf Unterverfahren verwiesen, die jeweils durch eine modifizierte Prozessauslegung konventionelle Prozessgrenzen erweitern [DIN03].

Eine Alternative zu der DIN 8580 und deren Unterverfahren stellt das Online-Portal efunda.com dar. Ähnlich zu den Materialdatenbanken, erlaubt dieses Online-Portal die systematische Suche nach Verfahren. Das Einbeziehen von internationalen Quellen macht diese Datenbank deutlich umfangreicher als die DIN 8580.

Sobald geeignete Fertigungsprozesse aus den genannten Quellen ausgewählt sind, benötigt es einer ersten Abschätzung des Potenzials der Prozesse. Dies kann mittels einer Nutzwertanalyse, wie in Tabelle 2 illustriert, erfolgen.

Die Nutzwertanalyse ermöglicht es, den für den SOLL-Zustand identifizierten Kriterien eine Wertung zuzuordnen und diese entsprechend ihrer Bedeutung zu gewichten. Die Summe der gewichteten Bewertung gibt Aufschluss über die gesamte Zielerreichung. Dadurch werden einzelne Fertigungsprozesse quantitativ vergleichbar. Jedoch handelt es sich bei den Werten der Prozesskombination „konventionelles Gesenkschmieden“ um bereits bekannte IST-Werte, wohingegen die des „mehrdirektionalen Schmiedens“ Schätzwerte sind. Aus diesem Grund ist zur Kontrolle der Zielerreichung ein erneuter Vergleich mittels Nutzwertanalyse nötig, sobald der mehrdirektionale Schmiedeprozesse ausgelegt ist. Der abschließende Vergleich zeigt, ob die angestrebte Verbesserung tatsächlich erfüllt wurde oder ob noch weiteres Verbesserungspotenzial besteht.

Tabelle 2: Nutzwertanalyse einzelner Kriterien zum Vergleich des konventionellen und mehrdimensionalen Schmiedens

Mehrdirektionales Schmieden				
Schmieden und Zerspanen				
Nr.	Kriterium	Gewichtungsfaktor	Zielerreichung	
1	Kosten der Fertigung	6	5	7
2	Bauteilgewicht	3	7	7
3	Materialeffizienz	1	6	9
4	Anzahl Prozessschritte	1	6	8
5	Belastbarkeit des Bauteils	4	8	10
6	Anlagenbelegung	4	7	10
7	Aufwand Nachbearbeitung	1	6	9
8	Montageaufwand	3	9	9
9	Durchlaufzeiten	3	8	10
10	Oberflächenbeschaffenheit	1	7	5
11	Maßtoleranzen	1	7	5
Summe der Zielerreichung:			69%	84%

1 = niedrigste Wertung
10 = höchste Wertung

CAD -Konstruktion

Nach der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes und Fertigungsprozesses gilt es, die relevanten Fertigungsparameter und deren Wertebereiche zu identifizieren, die Gutteile produzieren. Um die Entwicklungskosten möglichst gering zu halten, wird bei der Prozessauslegung auf die computerunterstützte Entwicklung zurückgegriffen. Eine etablierte Methode ist die Nutzung von sogenannter Computer Aided Design-Software (CAD).

Diverse Programme wie AUTOCAD, CATIA, SOLIDWORKS ODER CREO ermöglichen die einfache Erstellung und Modifizierung von dreidimensionalen Modellen oder technischen Zeichnungen. Von großem Vorteil ist dieses Vorgehen bei komplizierten Konstruktionen mit einer Vielzahl von Einzelteilen und komplexen Kinematiken. Bild 5 illustriert das mehrteilige Werkzeug beim mehrdirektionalen Schmieden von Stahlkolben. Auf einen Blick lassen sich die verschiedenen Funktionselemente durch die farblichen Markierungen unterscheiden. Dadurch entsteht ein übersichtliches Werkzeugverständnis.

FE-basierte Detailauslegung des Fertigungsprozesses

Die Methode der CAD-Konstruktion stellt nur die erste Stufe der Prozessauslegung dar. Nachdem die grundlegenden Rahmenbedingungen konstruktiv ausgelegt sind, gilt es die prozessspezifischen Einflussfaktoren mittels der Finite-Element-Methode (FEM) zu

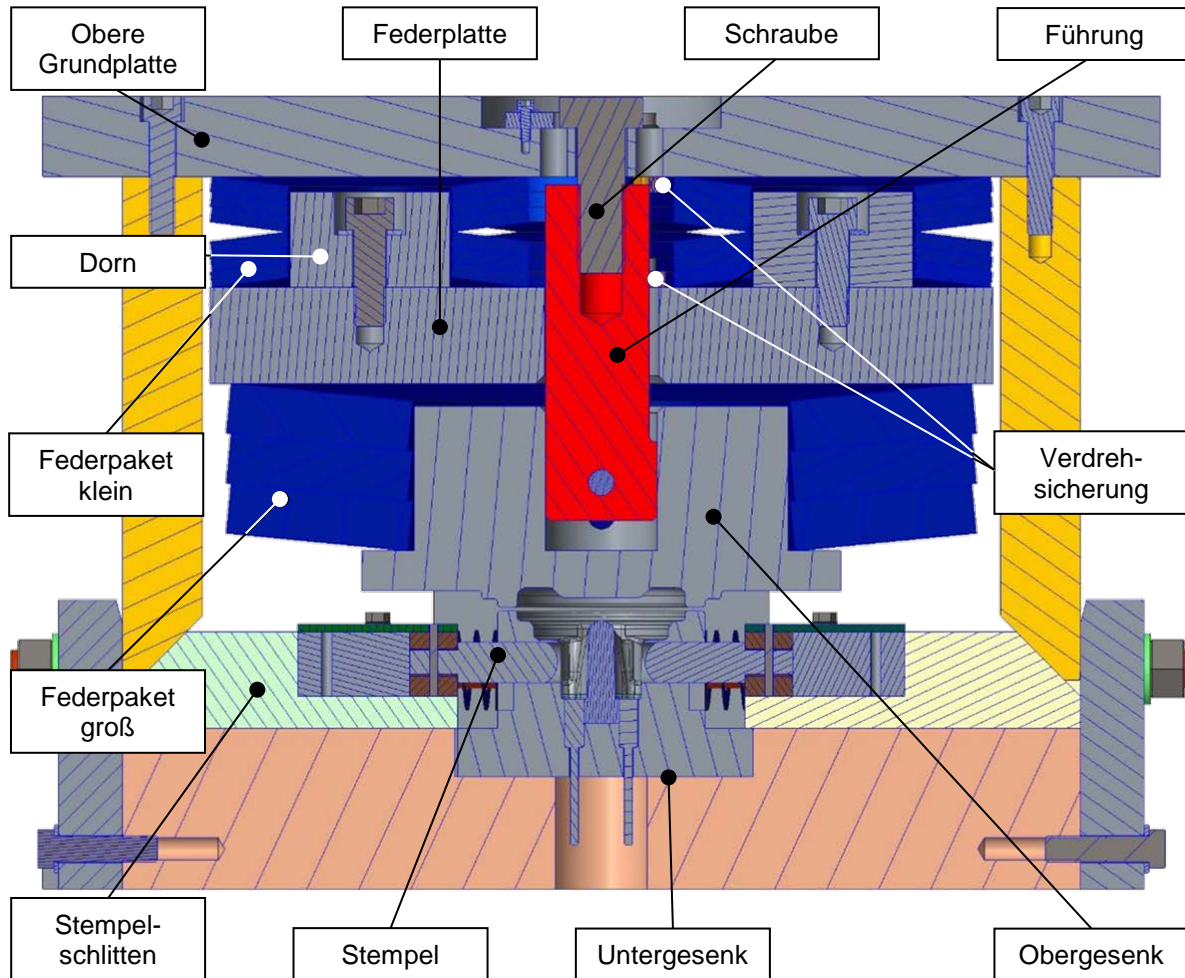


Bild 5: CAD-Vollschnittdarstellung des Gesenks beim mehrdirektionalen Schmieden

identifizieren. Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung kontinuierlicher thermomechanischer Probleme. Die Zusammensetzung der Lösungen endlich vieler Teilprobleme liefert eine Aussage über Werte und Verteilung verschiedener Zustandsgrößen in Werkstück und Werkzeug während und nach der Umformung. Bild 6 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Schmiedesimulation des Stahlkolbens. Die Farbskala verdeutlicht den Abstand des Werkstücks zum Werkzeug. Bereiche, die keine dunkelblaue Färbung aufweisen, machen Stellen mangelhafter Formfüllung kenntlich. Somit stellen die gewählten Simulationsparameter nicht die optimale Lösung dar und benötigen einer Anpassung. Die korrekte Auswahl von Prozesswerten erfordert langjährige Erfahrung aufgrund der Komplexität und Wechselwirkung diverser Einflussgrößen. Um eine langwierige Detailauslegung zu vermeiden, existiert die Methode der statistischen Versuchsplanung „Design of Experiment“. Diese erstellt eine gezielte Variation der Einflussgrößen, sodass ein Minimum an Versuchsaufwand notwendig ist, um einen mathematischen Zusammenhang von Einfluss- und Ergebnisgröße herzustellen. Der minimale Versuchsaufwand garantiert die vollständige Problembetrachtung bei einem Bruchteil der Kosten eines vollständigen Versuchsplans [SIE17].

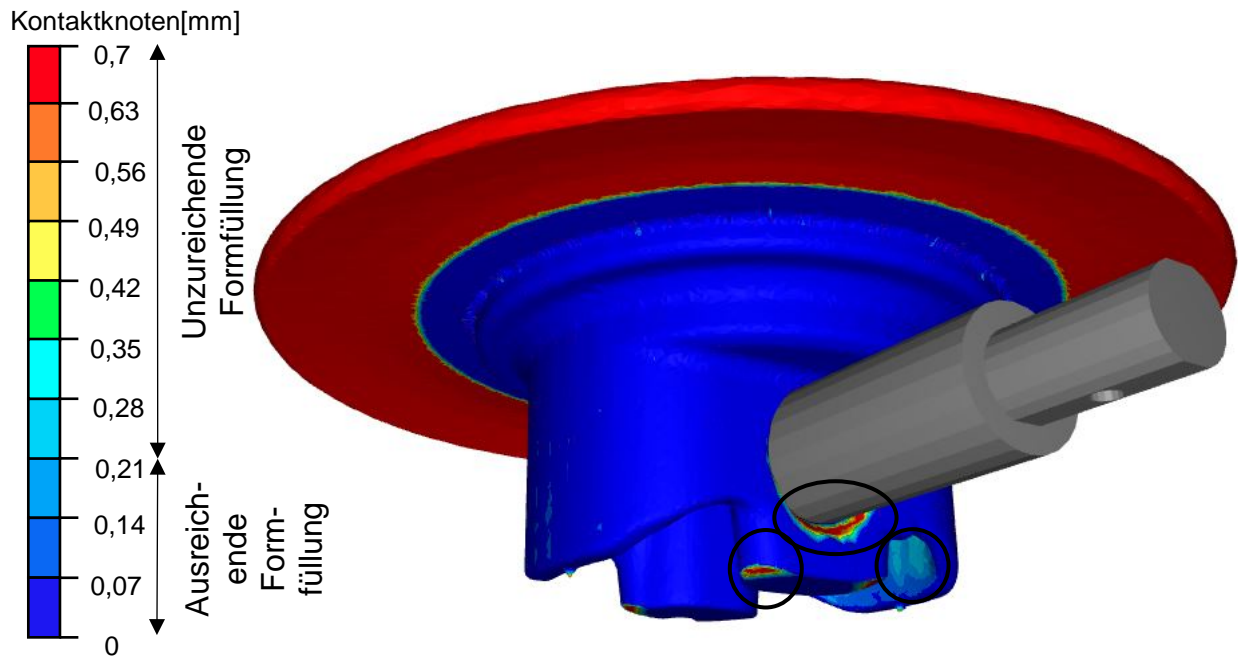


Bild 6: Darstellung eines Simulationsergebnisses für die kritischen Bereiche, die keine vollständige Formfüllung beim mehrdirektionalen Schmieden von Stahlkolben erreichen

PDCA-Zyklus - Check

Auslegung des realen Prozesses / Bauteils

Nach Abschluss der Prozessauslegung auf Basis der FEM werden die Ergebnisse genutzt, um einen Prototypen zu fertigen. Dabei findet ein Abgleich von Ergebnissen der FEM und dem Realbauteil statt. Eine Methode zur Erfassung von geometrischen Abweichungen bieten optische 3D-Messsysteme. Im Falle einer Abweichung erfolgt eine Anpassung der Simulation bis die Ergebnisse den Anforderungen aus dem definierten SOLL-Zustand entsprechen. Der Kreislauf aus dem Vergleich von IST- und SOLL-Zustand ist in Bild 7 abgebildet.

PDCA-Zyklus – Act

Technische Komponenten unterliegen regelmäßigen Innovationszyklen, sodass die optimierte Lösung nur einen temporären Idealzustand darstellt. Dementsprechend müssen diese den Kreislauf der Prozessoptimierung beim Auftreten von Mangelerscheinungen von Neuem durchlaufen. Dieses Vorgehen schafft es, die Forderungen sich stetig ändernder Märkte zu befriedigen und sichert langfristig die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen.

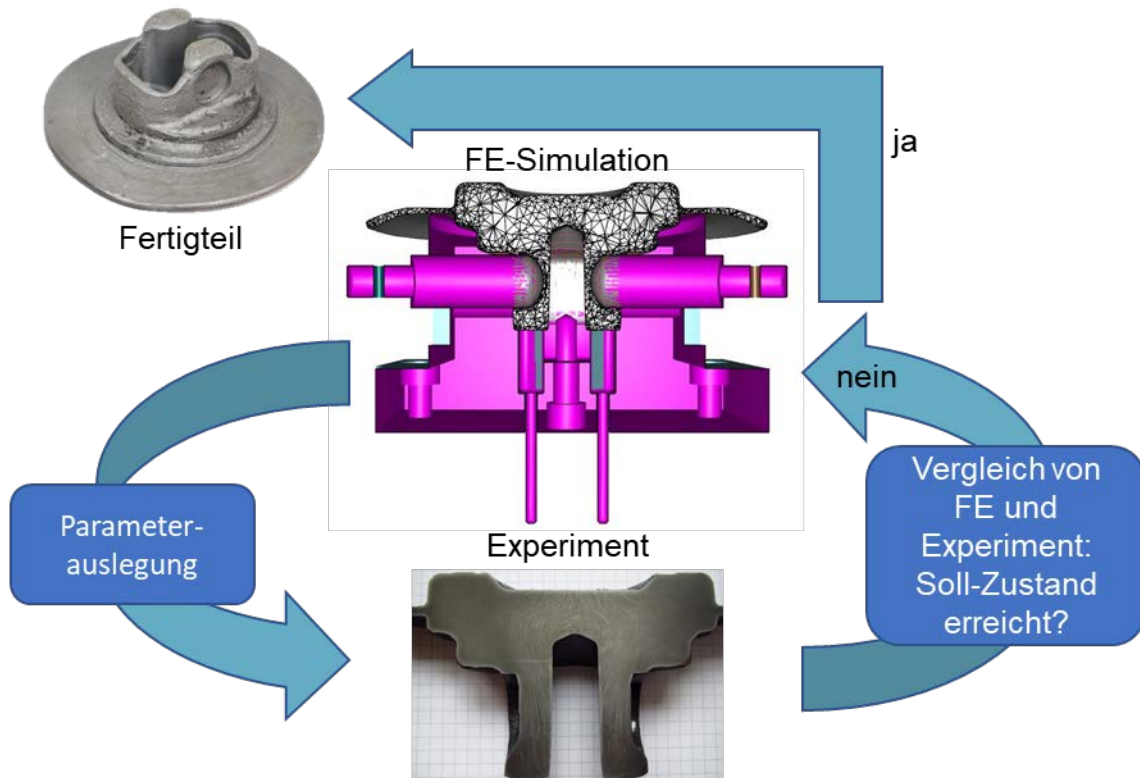


Bild 7: Schaubild des repetitiven Zyklus der finalen Detailauslegung des zu optimierenden Prozesses durch den SOLL-IST-Vergleich

Literaturverzeichnis

- [DEM18] wikiwand.com/de/Demingkreis, 21.08.2018
- [DIN03] Deutsches Institut für Normung: DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, September 2003
- [HIR11] Hirschvogel, M.: Massivumgeformte Komponenten. Hirschvogel Holding GmbH, 2011.
- [ORG18] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Orghandbuch.de, 21.08.2018.
- [DIN09] Deutsches Institut für Normung: „DIN 69901 - 5:2009-01 Projektmanagement - Projektmanagementsysteme Teil 5: Begriffe“, Januar 2009
- [SIE17] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkrichen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE), Springer Verlag, 2017
- [VDI98] VDI-Richtlinie: VDI 2225 Blatt 3 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung.

Kontaktdaten

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

☎ +49 (0)511 27976-0 | @ info@iph-hannover.de | 🌐 www.iph-hannover.de