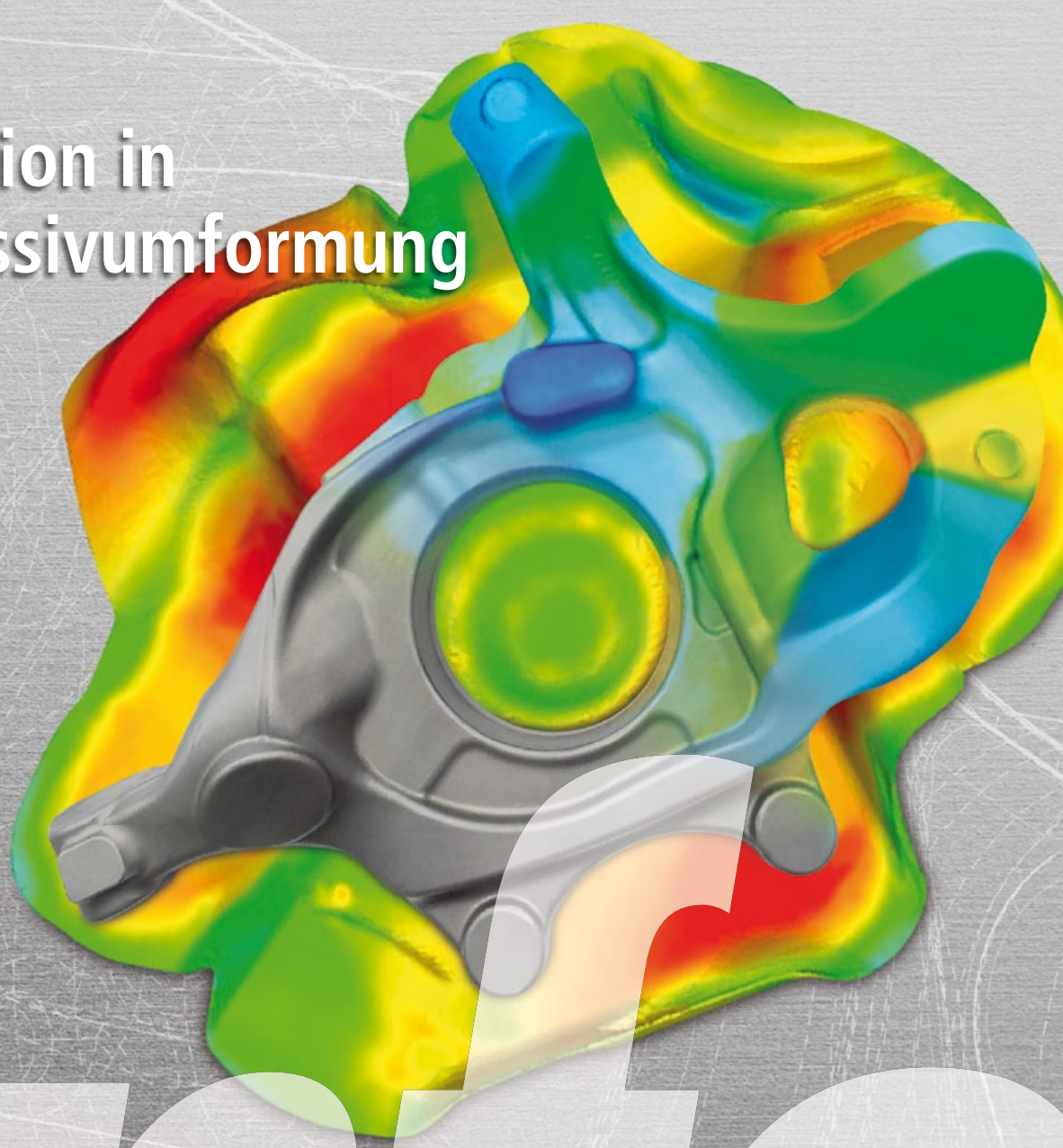
DEUTSCHE MASSIVUMFORMUNG

# Simulation in der Massivumformung



bmb

EXTRA

# Vorwort des Herausgebers

Moderne technische Systeme – im Fahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrt, im Maschinenbau sowie im Bereich der Energietechnik – beinhalten häufig massivumgeformte Hochleistungskomponenten. Deren Schlüsselrolle begründet sich einerseits in der enormen Belastbarkeit, welche bei der Übertragung hoher Kräfte und Momente erforderlich ist. Andererseits kann beobachtet werden, dass in Zeiten knapper werdender Ressourcen verstärkt effiziente industrielle Fertigungsverfahren, zu denen auch die Massivumformung zählt, zur Anwendung kommen.

Insbesondere in der Automobilindustrie erfordern steigende Anforderungen bezüglich Leichtbau und Leistungsdichte eine immer intensivere Bauteiloptimierung, was die sorgfältige Abstimmung von Werkstoff, Bauteilgeometrie und den zahlreichen Parametern entlang der gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozesskette voraussetzt. Durch die frühe Einbindung des Zulieferers in den Produktentstehungsprozess und eine partnerschaftliche Zusammenarbeit werden gute Voraussetzungen dafür geschaffen, eine für beide Parteien wirtschaftliche Lösung zu finden.

Die vorherige Auflage des EXTRA-Info „Simulation in der Massivumformung“ beschrieb die Erfahrungsberichte einzelner Unternehmen und zeigte anhand dieser Fallbeispiele allgemeingültige Lösungen auf. In dieser zweiten vollständig neu konzipierten Ausgabe hat der Redaktionsbeirat einen neuen Weg gewählt.

Die im vorliegenden EXTRA-Info vorgestellten vielfältigen Anwendungsbereiche und Weiterentwicklungen von Simulationssystemen in Verbindung mit den zu erwartenden Forschungsergebnissen zeigen auf, dass die Entwicklung von virtuellen Werkzeugen im Bereich der Massivumformung voranschreitet. Beachtenswert erscheinen dabei Entwicklungen im Bereich der Grundlagenforschung, die auf ein besseres Verständnis der Vorgänge in Werkstück und Werkzeug abzielen und dadurch neue Möglichkeiten für gezielten technischen Fortschritt eröffnen.

Die Beschreibung des Einsatzes virtueller Werkzeuge im Zuge der Entwicklung intelligenter Lösungen zur Realisierung besonderer Merkmale, Toleranzen und Bauteileigenschaften soll nicht nur die Unternehmen der Massivumformung und deren Kunden ansprechen. Genauso soll auch der Nachwuchs – vor allem technisch interessierte junge Menschen, die Zukunftstechnologien aktiv mitgestalten wollen – für die Branche begeistert werden. Ferner kann die Beschreibung der gesamten Prozesskette von der Produktentwicklung unter Ausnutzung moderner CA- und Simulationstechniken über die Werkstoffauswahl bis zur Festlegung der Gestaltung von Verfahren oder Verfahrenskombinationen auch für Lehre und Studium eine wertvolle Hilfe sein.

Wir freuen uns, allen an der Massivumformung Interessierten sowohl mit der Schriftenreihe EXTRA-Info insgesamt als auch mit dieser neuesten Ausgabe wieder wirkungsvolle Unterstützung bei Fragestellungen mit Blick auf zeitgemäße und zukunftsgerichtete, virtuelle Entwicklung von Produkten und Prozessen geben zu können. Der größte Dank an die Mitwirkenden, insbesondere an den Redaktionsbeirat, ist eine vielfache aktive Nutzung dieser Schrift.

B. A. Jochen Heizmann
Hirschvogel Automotive Group
Leiter des Arbeitskreises FEM

Dipl.-Ing. Hans Ulrich Volz
Jung, Boucke GmbH & Co. KG
Vorsitzender des Ausschusses
Öffentlichkeitsarbeit/Technische Information

58093 Hagen, April 2013

# Impressum


| | |
|---|---|
| Autor: | Dipl.-Ing. Klaus Vollrath, Aarwangen, Schweiz |
| Redaktionsbeirat: | Dipl.-Ing. Torsten Feldhaus, CDP Bharat Forge GmbH, Ennepetal<br>Dipl.-Ing. Michael Fiderer, Kistler Automotive GmbH, Schönaich<br>Dipl.-Ing. Christoph Gröbel, SONA BLW Präzisionsschmiede GmbH, Remscheid<br>Dipl.-Ing. Pablo Guel-López, Seissenschmidt AG, Plettenberg<br>Volker Mensing, simufact engineering GmbH, Hamburg<br>Dipl.-Ing. Thomas Risse, Siepmann-Werke GmbH & Co. KG, Warstein<br>Dipl.-Math. Sabine Widdermann, Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen<br>Dipl.-Ing. Michael Wohlmuth, simufact engineering GmbH, Hamburg |
| Redaktionsleitung: | B. A. Jochen Heizmann, Hirschvogel Automotive Group, Denklingen |
| Bilder: | Siehe Bilderverzeichnis Seite 63 |
| Verantwortlich für die Gesamtherstellung: | Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen, www.metalform.de<br>Dorothea Bachmann Osenberg |
| Layout und Satz: | simplon.<br>Agentur für Werbung und Design, Film, Audio und neue Medien, St. Ingbert |
| Druckschriften-Nr.: | EI-Sim-0413-20sim |
| Ausgabe: | April 2013 |
| ISBN: | 978-3-928726-30-6 |



Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung und Vervielfältigung, vorbehalten. Auszugsweise Wiedergabe des Inhalts nur nach Rückfrage beim Industrieverband Massivumformung e. V. mit Quellenangabe gestattet. Den Veröffentlichungen des Industrieverbands Massivumformung e. V. liegen die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung der im Industrieverband Massivumformung e. V. zusammengeschlossenen Unternehmen zugrunde.

# Simulation in der Massivumformung

Herausgeber:
Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon: +49 2331 958830
Telefax: +49 2331 958730

E-Mail: orders@metalform.de
www.metalform.de

# Inhaltsverzeichnis


Seite

Vorwort des Herausgebers 3

Impressum 4

1 Einleitung 8

2 Schmiedeteil-Entwicklung erfordert Prozesswissen 9

2.1 Nutzung der Prozesskompetenz des Massivumformers 9
2.2 Moderne Simulationswerkzeuge 10
2.3 Entscheidend bleibt der Fachmann 11

3 Virtuelle Werkzeuge bei der Produktentwicklung 12

3.1 Ablauf und Leistungsumfang von FEM-Simulationen 12
3.1.1 Integration von zwei Schmiedebauteilen 13
3.1.2 Substitution eines Gussteils durch eine Schmiedelösung 14
3.1.3 Substitution eines Blechteils 15
3.1.4 Optimierung von Stirnzahnrädern 16
3.1.5 Optimierung eines Aluminiumrads 17

3.2 Einsatz weiterführender Simulationstechniken 18
3.2.1 Anpassung von Differenzialverzahnungen 19
3.2.2 Simulationsgestützte Optimierung eines Gleichlaufgelenks 20
3.2.3 Designoptimierung von Pleueln 21

3.3 Kreativität – durch nichts zu ersetzen 22
3.3.1 Präzisionsschmieden von Zahnrädern vorteilhafter als Zerspanen 22
3.3.2 Lamellenträger für Kupplung 23

4 Simulation entlang der Massivumform-Prozesskette 24

4.1 Simulationseinsatz im Stahlwerk 24
4.2 Materialvorbehandlung 26
4.3 Trennen 27
4.4 Erwärmen 29
4.5 Umformen 30
4.5.1 Entwicklung der Stufenfolge 30
4.5.2 Analyse werkzeugbedingter Fehler 30
4.5.3 Abgraten/Lochen und Prägen/Kalibrieren 31

Seite


4.6 Spanabhebende Bearbeitung von Schmiedeteilen 32

4.7 Wärmebehandlung 33

4.7.1 Vergüten 33

4.7.2 Einsatzhärten 34

4.7.3 Induktivhärten 35

4.8 Oberflächennachbehandlung 36

5 Weiterentwicklung der Simulation 38

5.1 Entwicklungstrends 38

5.1.1 Höhere Genauigkeit der Berechnungsergebnisse 38

5.1.2 Modellierung der Wechselwirkung von Werkzeugen und Maschine 38

5.1.3 Simulation der gesamten Prozesskette 39

5.1.4 Vorhersage von Bauteileigenschaften 40

5.1.5 Minimierung von Rechenzeiten 41

5.1.6 Automatische Optimierung von Fertigungskonzepten 41

5.1.7 Einsatz von Expertensystemen 43

5.2 Fortschritte beim Grundlagenverständnis 44

5.2.1 Datenbasis für Legierungen am Beispiel Stahl 44

5.2.2 Einfluss der Aufheizrate auf die Umformbarkeit von Stahl- und Aluminium 45

5.2.3 Werkstoff- und Prozessentwicklung mittels Thermodynamik- und Mikrostrukturmodellierung 46

5.2.4 Robustheit der Gefügemodellierung bei der Auslegung eines Gesenkschmiedeprozesses 46

5.2.5 Modellierung der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug 48

5.2.6 Kopplung der Umformsimulation mit nichtlinearen Pressenmodellen 50

5.2.7 FEM-Simulation des Werkzeugversagens bei Warmmassivumformprozessen 51

5.2.8 Beherrschung von Materialschädigungen bei Kaltmassivumformprozessen 52

5.2.9 Entwicklung von ganzheitlichen Ansätzen 53

6 Wirtschaftliche Aspekte 55

7 Ausblick 57

8 Literaturverzeichnis 59

9 Bilderverzeichnis 63

# 1 Einleitung

Das Wohlergehen moderner Zivilisationen beruht u. a. auf konstanter Innovation, die es erlaubt, mehr und bessere Produkte kostengünstig herzustellen und zu vermarkten und damit die Lebensbedingungen der breiten Mehrheit der Bevölkerung zu steigern. Zu den wichtigen Treibern dieser Innovation gehören auch moderne Produktionskonzepte, die Ressourcen und Kompetenzen firmenübergreifend entlang der gesamten Prozesskette vom Rohteil bis zum fertigen Endprodukt optimieren. Der wirksamste Weg zur Aufwandsoptimierung führt so früh wie möglich während der Entwicklungsphase über die Beteiligung der Zulieferer, damit diese bereits hier ihre Kompetenzen einbringen können. Denn der Aufwand für die Herstellung eines Produkts wird bereits in den ersten Stadien des Entwicklungsprozesses weitestgehend festgelegt: Fachleute schätzen, dass schon im Verlauf der ersten 20 % der Planungsphase rund 80 % der späteren Aufwendungen für ein Bauteil fixiert werden. Die vorliegende Broschüre zeigt auf, welch umfassende und vielfältige Möglichkeiten dem Massivumformer hierbei heute dank des Einsatzes moderner, hochleistungsfähiger Werkzeuge zur Simulation von Prozessen und Eigenschaften zur Verfügung stehen.

# Schmiedeteil-Entwicklung erfordert Prozesswissen



Für ein optimales Produktdesign sind umfassende Kenntnisse über den Herstellprozess unerlässlich, sind sie doch Voraussetzung für die bestmögliche Ausnutzung von verfahrensbedingten Vorteilen zur Sicherstellung optimaler Produkteigenschaften: Jeder Konstrukteur ist mit der Tatsache vertraut, dass es in der Praxis nahezu unmöglich ist, beispielsweise ein Gussteil ohne umfassende Anpassung der Geometrie durch ein Schmiedeteil oder eine Schweißkonstruktion zu substituieren (Abbildung 2.1). Dahinter steht die Erkenntnis, dass der Prozess das Produkt „macht". Darunter ist zu verstehen, dass sich die Eigenschaften eines mechanischen Bauteils je nachdem, wie der zur Entstehung der Kontur eingesetzte Prozess abgelaufen ist, selbst bei gleichem Werkstoff teils erheblich unterscheiden können. Kommen dann noch typische Aspekte der (Groß)-Serienfertigung wie Kosten, Qualitätssicherung und Minimierung des Ressourcenverbrauchs hinzu, so bestimmen der Produktionsprozess und seine Besonderheiten das Geschehen endgültig.

Umso sinnvoller ist es daher für die Entwickler des Abnehmers, sich gleich zu Beginn der Entwicklungsphase mit dem Zulieferer an einen Tisch zu setzen. Im Prinzip kann sich dies sogar schon dann empfehlen, sobald die grundlegenden Performanceanforderungen wie Bauraum, Schnittstellen, Lastbedingungen sowie wesentliche Rahmenanforderungen (z. B. zur Korrosionsbeständigkeit) definiert sind. Fallweise erscheint es sogar sinnvoll, den Rat des Zulieferers auch bezüglich des zu wählenden Produktionsverfahrens sowie der Wahl des Werkstoffs einzuholen, vor allem wenn dabei auch Leichtbauaspekte eine Rolle spielen. Dem Beispiel der Automobilindustrie folgend, setzen deshalb immer mehr Branchen darauf, ihre Zulieferer schon in der Konzeptphase am Entwicklungsprozess zu beteiligen. Hier durchdringen sich auch zwei unterschiedliche virtuelle Welten: Die klassischen CAD-Programme des Konstrukteurs, welche die lokale Verteilung von Feldgrößen und Eigenschaften nicht darstellen, und die prozessorientierten Simulationswerkzeuge der Zulieferer, die den Produktionsprozess mit seinen zahlreichen Besonderheiten inklusive der Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften abbilden.

**Abbildung 2.1:** Prozessgerechte Ausführung eines bisher aus Stahl gegossenen PKW-Hinterachsträgers (rechts) im Vergleich zu einer heute aus Aluminium geschmiedeten Version (links)

## 2.1 Nutzung der Prozesskompetenz des Massivumformers

Durch Simultaneous Engineering mit dem Massivumformer kann vielfältiges Potenzial erschlossen werden. Denn in der auf die Konzeptfindung folgenden Entwurfsphase haben die Spezialisten der Massivumformung einen entscheidenden Vorteil. Bei ihnen laufen aufgrund ihrer Detailkenntnisse bezüglich Möglichkeiten und Grenzen ihres Fertigungsprozesses quasi im Hinterkopf gleich mehrere „Expertensysteme" mit. Diese prüfen die prozesstechnischen Besonderheiten und Kosten-Nutzen-Aspekte aus ihrem Bereich ab. So sieht beispielsweise der mit dem Prozess vertraute Massivumformer oft auf Anhieb, wo ein Radius daraufhin überprüft werden sollte, ob er möglicherweise die Haltbarkeit des Schmiedewerkzeugs beeinträchtigt. Meist wird auch die Bearbeitbarkeit berücksichtigt, von Aufspannflächen und Spannmitteln bis zur Frage, ob eine gegebene Fläche noch mit Standard-Werkzeug bearbeitet werden kann oder ob hierfür eventuell Sonderwerkzeuge erforderlich werden. Es ergeben sich häufig auch noch weitere Vorteile entlang der Gesamt-Prozesskette bis hin zum Endanwender, beispielsweise durch erzielbare Gewichtseinsparungen oder verbesserte Gebrauchseigenschaften (Abbildung 2.2).

**Abbildung 2.2:** Kaltumgeformtes Ritzel: Simulationsergebnis und reales Bauteil

## 2.2 Moderne Simulationswerkzeuge

Die verschiedenen Massivumformverfahren und die große Bandbreite an Werkstoffen ermöglichen eine sehr gezielte Einstellung teils unterschiedlichster Eigenschaften in verschiedenen Bereichen ein und desselben Bauteils sowie die Optimierung von Aufwendungen und Kosten entlang der nachgeschalteten Prozesskette. Um seinen anspruchsvollen Aufgaben als Entwicklungspartner gerecht werden zu können, stehen dem Massivumformer heute hoch entwickelte Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Diese bilden die zahlreichen Schritte des Entwicklungs- und Fertigungsprozesses (Abbildung 2.3) von der Übernahme, Modifikation und Generierung von CAD-Daten über komplexe Programme für Simula-

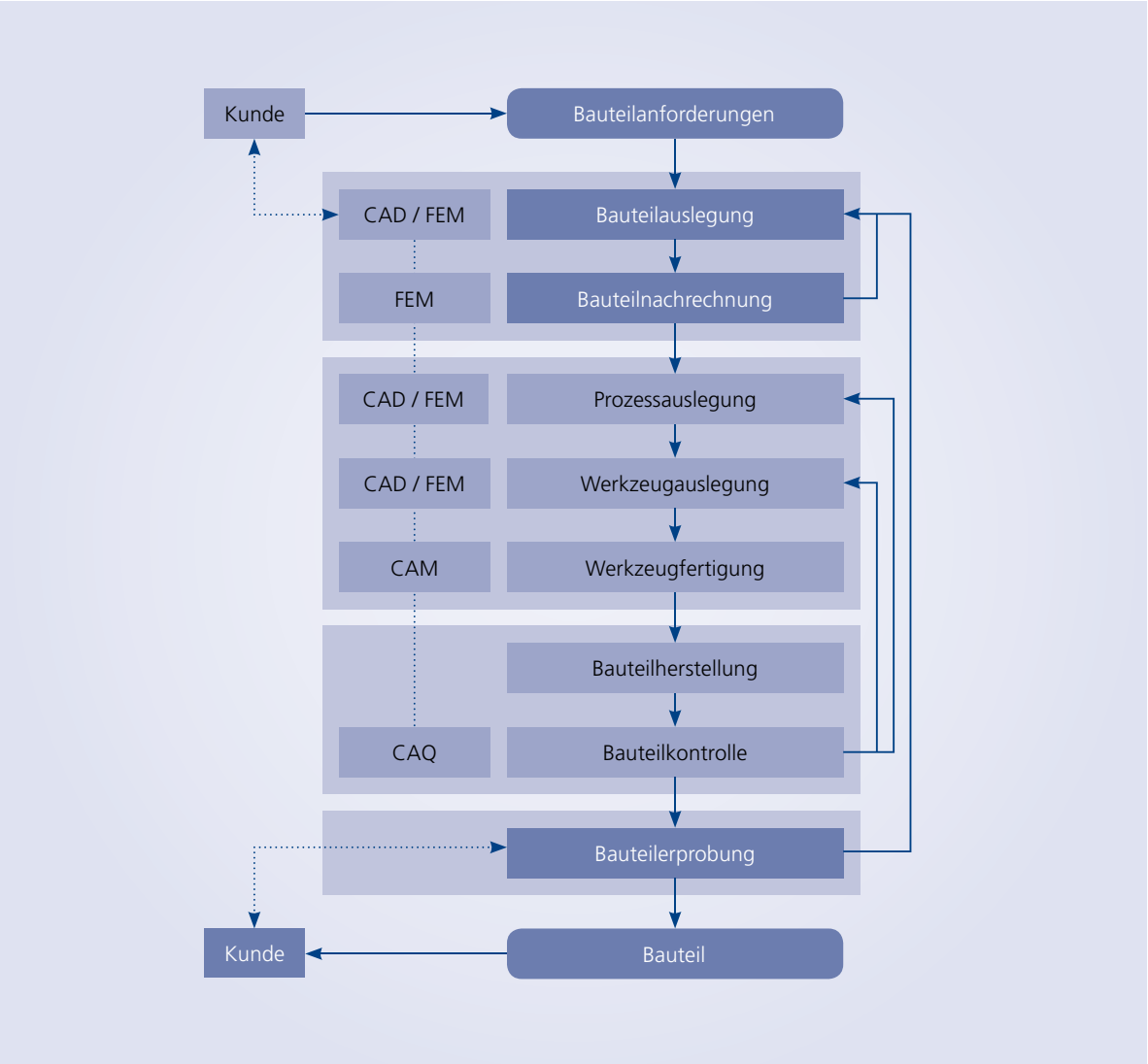



**Abbildung 2.3:** Typische Entwicklungsprozesskette mit den dabei eingesetzten virtuellen Werkzeugen

tion und Optimierung des Massivumformprozesses bis hin zur Auslegung der nachgeschalteten Prozesskette ab. Je nach Spezialisierung des betreffenden Unternehmens sind Tätigkeiten wie die rechnergestützte Optimierung der Bauteiltopologie mit nachfolgender Neukonstruktion sowie die Analyse des Bauteilverhaltens mit Hilfe geeigneter FEM-Software möglich. Teilweise werden darüber hinaus noch speziellere Simulationswerkzeuge beispielsweise zur optimalen Auslegung von Zahnrädern oder ganzen Baugruppen wie Differenzialen, zur Dimensionierung von Gleichlaufgelenken oder zum Feintuning von Pleuelgeometrien eingesetzt.

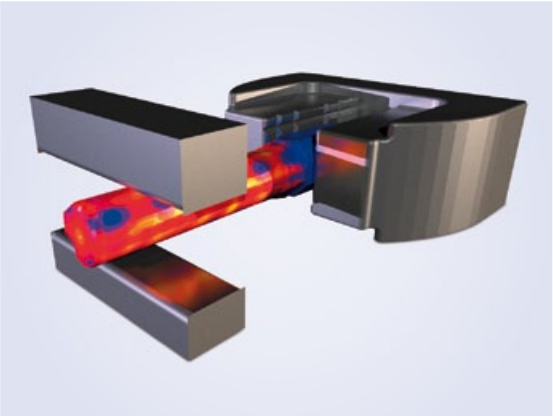


**Abbildung 2.4:** Simulation kann auch komplexe Kinematiken abbilden, hier am Beispiel Freiformschmieden

## 2.3 Entscheidend bleibt der Fachmann

Bei den in der Massivumformung zur Simulation eingesetzten mathematischen Modellen wurden dank schnellerer Software und leistungsfähigerer Hardware in den letzten Jahren sowohl hinsichtlich der Bandbreite als auch von der Genauigkeit der Prognosen enorme Fortschritte erzielt. Dennoch muss man sich vergegenwärtigen, dass Simulationswerkzeuge genau das sind, was der Name bereits aussagt, nämlich Werkzeuge mit bestimmten Eigenschaften für einen bestimmten Zweck. Die heute verfügbaren Programme sind ein sehr mächtiges Instrumentarium, mit dessen Hilfe der Massivumformer seinem Kunden erhebliche Vorteile erschließen kann. Für die Berechnungen werden Eingaben zu Anfangs- und Randbedingungen sowie Materialdaten benötigt. Diese Materialkennwerte werden häufig durch die Softwareanbieter in Form von Datenbanken bereitgestellt sowie auch in den Umformbetrieben oder durch Institute experimentell ermittelt. Zudem entfalten solche Simulationswerkzeuge ihren vollen Nutzen erst in der Hand des erfahrenen Fachmanns, der seine Prozesse umfassend kennt und zugleich die Leistungsfähigkeit der Software abschätzen kann. Dem gleichen Fachmann sollte man es deshalb auch überlassen zu entscheiden, wozu und in welchem Umfang er diese Werkzeuge für die aktuell zu bewältigende Aufgabenstellung einzusetzen gedenkt (Abbildung 2.4).

# 3 Virtuelle Werkzeuge bei der Produktentwicklung

Im Zuge der Produkt- und Prozessentwicklung kommen in der Massivumformbranche regelmäßig Simulationsprogramme zur Anwendung. Hier kann im Wesentlichen zwischen zwei grundsätzlichen Kategorien unterschieden werden: Kommerzielle Software auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) und z. T. in den Unternehmen selbst entwickelte Programme auf Basis analytischer Ansätze. Die eingesetzten FEM-Programme unterstützen nicht nur bei der Lösung mechanischer Strukturprobleme in der Produktentwicklungsphase. Sie ermöglichen auch die Simulation von Evolution und lokaler Verteilung thermo-mechanischer und elastischer Kennwerte während der Prozessentwicklungsphase.

Nachfolgend werden grundsätzliche Schritte bei der Durchführung von FE-Analysen vorgestellt. Zusätzlich wird in diesem Kapitel auf den Einsatz weiterführender Simulationswerkzeuge in den Umformbetrieben eingegangen und von der Kreativität der Massivumformer berichtet.

## 3.1 Ablauf und Leistungsumfang von FEM-Simulationen

Im Zuge der Modellbildung muss zunächst von den interagierenden Objekten meist ein dreidimensionales CAD-Abbild generiert und nachfolgend an den sogenannten Pre-Prozessor der FE-Software übergeben werden. Anschließend wird das zu untersuchende Bauteil bzw. der zu betrachtende Bauraum in zahlreiche kleine Volumenelemente mit definierten Abmessungen, die sogenannten Finiten Elemente, unterteilt. Weiterhin werden die Randbedingungen auf das FE-Modell aufgetragen und die Materialdaten hinzugelesen. Es folgt die Übergabe des Gesamtmodells an den sogenannten Solver. Dieser übernimmt die Lösungsfindung. Anschließend können die Ergebnisse mit Hilfe eines sogenannten Post-Prozessors am Bildschirm in Form von Grafiken oder Animationen ausgewertet werden – vgl. Abbildung 3.1. So lässt sich z. B. verfolgen,

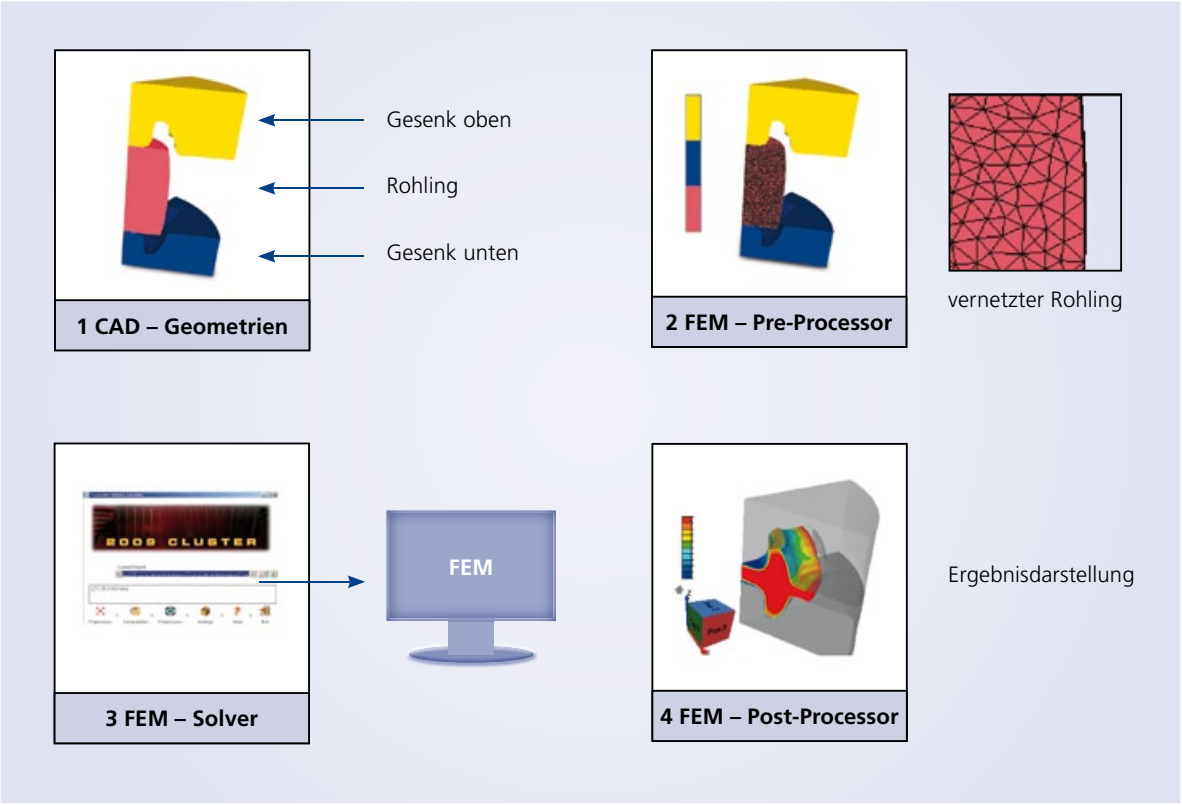



**Abbildung 3.1:** Für die Simulation wird das dreidimensionale CAD-Abbild des Rohlings in zahlreiche winzige Volumenelemente unterteilt. Während des Berechnungslaufs „schließt" der Solver in kleinen Schritten die Werkzeuge und berechnet für jeden Schritt die Veränderungen

wie der Rohling beim Schmiedevorgang umgeformt wird und das Material die Gesenkgravur füllt. Derartige Berechnungen sind zwar i. d. R. enorm rechenintensiv, lassen sich jedoch heute – Dank der hohen Leistung moderner Computersysteme und der Softwareentwicklung der letzten Jahre – in vertretbarer Zeit durchführen.

### 3.1.1 Integration von zwei Schmiedebauteilen

Eine gut gelungene Zusammenführung von zwei bisher getrennten Schmiedeteilen zu einem einzigen Integralteil beschreibt T. Feldhaus [FELD 1]. Ausgangspunkt des Entwicklungsprojekts war eine aus zwei Schmiedeteilen bestehende Baugruppe für LKW-Achsen, die aus einem Achsschenkel und dem damit verschraubten Spurhebel bestand (Abbildung 3.2). Beide Teile waren durch zwei Schrauben miteinander verbunden. Im Vergleich mit einem Integralteil, das die Funktionen beider Komponenten in einer monolithischen Komponente zusammenfasst, wies diese Lösung mehrere gravierende Nachteile auf. Die hohen dynamischen Belastungen dieser Verbindung verlaufen ausschließlich durch die Schrauben. Da deren Gewinde bei dynamischer Belastung (aufgrund von Kerbwirkungen) einen kritischen Faktor darstellen, mussten sie zum Ausgleich entsprechend groß dimensioniert werden. Dies zwang wiederum dazu, die Bauteile in diesem Bereich derart massiv auszulegen, dass die großen Bohrungen bzw. Gewindesacklöcher ausreichend abgestützt wurden. Darüber hinaus mussten beide Bauteile separat geschmiedet, bearbeitet, geprüft und schließlich in einem qualitätsgesicherten Montageprozess vorschriftsgemäß miteinander verschraubt werden.

Grund für dieses aufwendige Prozedere war die Tatsache, dass sich die Konstrukteure bisher – mangels ausreichend leistungsfähiger Werkzeuge zur Simulation des Schmiedeprozesses – nur mit hohem Aufwand in der Lage sahen, den äußerst anspruchsvollen Schmiedeprozess zur Herstellung dieses integrierten Schmiedeteils mit ausreichend hoher Treffsicherheit der Ergebnisse rechnerisch darzustellen. Zu groß war das Risiko, das Bauteil nicht mit dem für solche Sicherheitsteile erforderlichen Grad der Prozessbeherrschung abbilden zu können. Viele Schleifen in der Produktion waren erforderlich und trieben so die Kosten des Prozesses in die Höhe.

Dies änderte sich in den 2010er Jahren dank der zunehmenden Beherrschbarkeit solcher Entwicklungsaufgaben aufgrund der raschen Fortschritte bei den Programmen zur Simulation von Schmiedeprozessen. Damit wurde es möglich, die aufwendigen Voroperationen zur Formgebung des Schmiederohlings im direkten Zusammenhang mit der endgültigen Schmiedung am Bildschirm zu entwerfen und zu optimieren. Nachdem ein gangbarer Prozesspfad gefunden war, ging es im nächsten

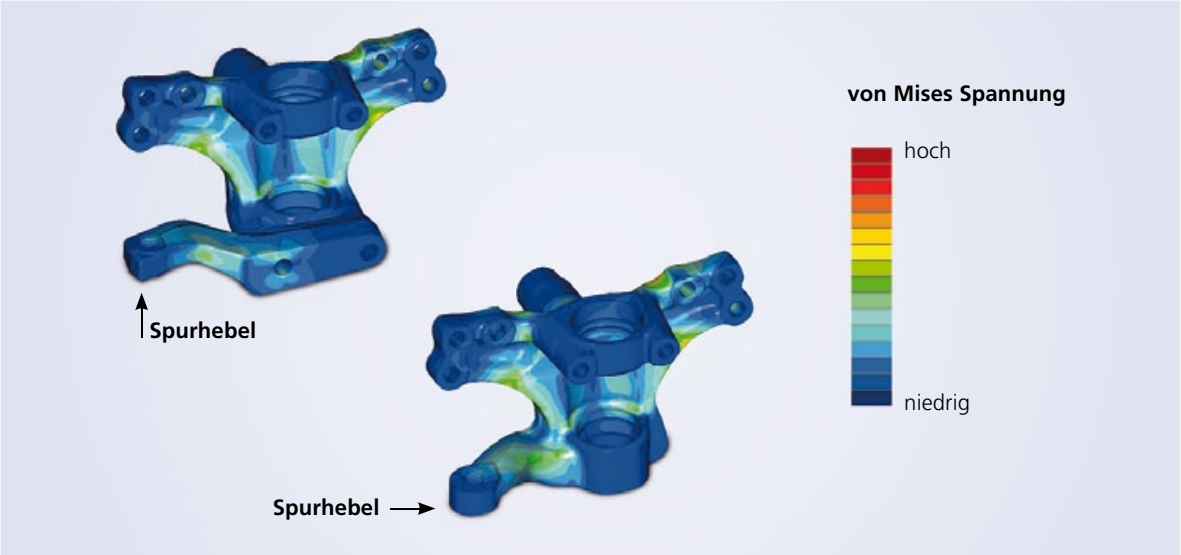



**Abbildung 3.2:** Die FEM-Analyse eines Brems-Lastfalls zeigt im Umfeld des integrierten Spurhebels eine deutliche Verringerung der blauen Bereiche mit niedrigen Spannungen, die Überdimensionierungen anzeigen

Schritt um die Ermittlung der optimalen Geometrie. Im vorliegenden Fall erfolgte die Topologieoptimierung allerdings noch nicht vollautomatisch mit Hilfe eines entsprechenden Programms, sondern direkt durch den Konstrukteur im Rahmen von mehreren manuellen Durchläufen. Hierzu wurde zunächst eine geeignet erscheinende Konstruktion erstellt. Diese wurde im Rahmen einer FEM-Simulation mit den vorgesehenen Belastungen beaufschlagt, so dass Bereiche mit besonders hoher oder geringer Spannung erkennbar wurden. Nach entsprechender Korrektur durch den Konstrukteur wurde die gleiche Analyse an der geänderten Geometrie erneut durchgeführt. Dieses iterative Vorgehen wurde so oft wiederholt, bis das Ergebnis den Vorstellungen der Entwickler entsprach. Einen weiteren wichtigen Anteil zur Realisierung dieser Art der Integralteile lieferten Variantenbereinigungen bezogen auf die Formen der verwendeten Hebel seitens des Lkw-Herstellers. Mit der verfeinerten Geometrie wurden die endgültige Simulation des Schmiedeprozesses und die Auslegung der Werkzeuge angegangen. Erfolg der Aktion war letztendlich ein schlankes Integralteil, das 25 % leichter war als die Vorgängerversion – ein bei schweren Lkw mit ihren hohen Kilometerleistungen äußerst erfreulicher Beitrag zur Treibstoffersparnis und $CO_2$-Reduktion. Weiterer Bonus waren erhebliche Einsparungen bei Bearbeitungs- und Montageaufwendungen entlang der Prozesskette bis hin zum einbaufertigen Achsschenkel.

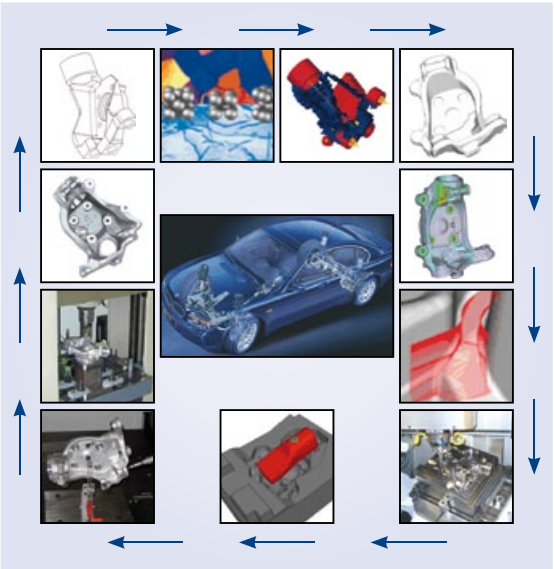


**Abbildung 3.3:** Beispiel für einen umfassenden gemeinsamen Entwicklungsprozess von der ursprünglichen Schweißkonstruktion (oben links) über Werkstoffsubstitution, Topo-logieoptimierung, CAD-Modell, Strukturanalyse, Prototypen-Fertigung, Werkzeugherstellung, Umformsimulation, Bauteilvermessung, Bauteilprüfung bis zum einbaufertigen Aluminium-Schmiedeteil für einen Premium-Hersteller

### 3.1.2 Substitution eines Gussteils durch eine Schmiedelösung

Über eine sehr weitgehende Kooperation von Massivumformer und Kfz-Hersteller unter umfassendem Einsatz von Simulationswerkzeugen berichten M. Dahme et al. [HIVO 1]. Ausgangspunkt war die Anfrage eines Kunden bezüglich möglicher Alternativen für ein Schwenklager, dessen Vorgängermodell bisher als Stahlgussteil ausgeführt war. Dazu wurden – ausgehend von einem Grobkonzept für eine Schweißkonstruktion – Lastenheft, Bauraum, Betriebslasten sowie sonstige Funktionen und Anforderungen zur Verfügung gestellt. Besonderheit der Anfrage war, dass dieser Kunde bereit war, dem Rat seines Zulieferers von Beginn an sehr viel Raum zu geben und nicht nur eine Verfahrens-, sondern sogar eine Werkstoffsubstitution (Aluminiumknetlegierung statt Stahlguss) zu akzeptieren (Abbildung 3.3).

Erster Schritt der Entwicklung war eine Neukonzeption mit Hilfe einer rechnergestützten, automatischen Topologieoptimierung. Dazu wurde ein FE-Modell des Bauraums erstellt, das zunächst das gesamte Volumen beinhaltete. Für die nachfolgenden Optimierungsschleifen wurde dieses Konstrukt mit den vorgesehenen Belastungen beaufschlagt und die daraus resultierende Spannungsverteilung im Material berechnet. In Bereichen mit geringen Spannungen wurde anschließend für die folgenden Berechnungsschleifen sukzessive „virtuelles Material weggenommen". Diese Vorgehensweise wurde solange wiederholt, bis eine relativ gleichmäßige Spannungsverteilung über das Werkstückvolumen erreicht war. Anders ausgedrückt wird somit der im Bauteil noch vorhandene Werkstoff an allen Stellen optimal ausgenutzt. Bei heutigen Programmen können dabei bereits fertigungstechnische Randbedingungen wie Entformungsschrägen oder die Vermeidung von schmiedetechnisch nicht darstellbaren Hinterschneidungen berücksichtigt werden.

Für den nächsten Schritt musste das aus der FE-Analyse resultierende Modell in ein CAD-Modell überführt werden, wobei der Konstrukteur weitere fertigungstechnische Details wie Stegbreiten oder Radien

berücksichtigte. Aufgrund seiner Erfahrung entwickelte der erfahrene Schmiedekonstrukteur dabei aus dem noch sehr unfertig wirkenden FE-Ergebnis ein umformtechnisch herstellbares Aluminium-Schwenklager. Doch auch diese Konstruktion weist noch Verbesserungsmöglichkeiten auf. So ist zwar der Werkstoff weitgehend optimal im Bauteil verteilt, doch sollten beispielsweise bestimmte Geometrieelemente noch unter Berücksichtigung der lokal entstehenden Spannungsverläufe ausgestaltet werden, was zu einer wesentlichen Verringerung von Spannungsspitzen beitragen kann. Die Mindestforderung an die Gestaltoptimierung ist dabei, dass werkstofflich vorgegebene Maximalspannungen nicht überschritten werden und dass elastische Bauteilverformungen innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegen. Das Bauteilmodell wird deshalb erneut in Finite Elemente aufgeteilt und für die Berechnung werden die vorgegebenen Lasten als Randbedingungen aufgegeben. Erst mit dem so erhaltenen Konstruktionsmodell geht der Massivumformer im nächsten Schritt in die eigentliche Auslegung der Stufenfolge für einen Schmiedeprozess, d. h. die virtuelle Nachbildung des Umformprozesses am Computer. Dieser Schritt wird ebenfalls simulationstechnisch unterstützt. Hieraus gewonnene Erkenntnisse können im Rahmen ergänzender Iterationsschleifen zu weiteren Optimierungen der Bauteilkonstruktion führen.

Erst dann werden – ausgehend von dem so gewonnenen CAD-Modell – erste Prototypen gefertigt und getestet. Weiterhin dient dieses Modell als Vorlage für zahlreiche weitere Simulationsberechnungen entlang der Prozesskette von der Werkzeugkonstruktion über die Auswahl von Anlagen und Peripherie bis zu CNC-Bearbeitungsprozessen. Viele dieser Berechnungen sowie die Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit werden in enger Kooperation mit dem Abnehmer – zusammen mit dessen Personal und Ressourcen – durchgeführt. Das Ergebnis eines solchen partnerschaftlichen Entwicklungsprozesses sind ausgereifte Bauteile sowie Produktionsprozesse, die schnell hochgefahren und auf hohem Niveau beherrscht werden können.

### 3.1.3 Substitution eines Blechteils

Die erfolgreiche Substitution eines ursprünglich als Blechkonstruktion ausgelegten Querlenkers durch ein Schmiedeteil beschreibt M. Bachmann [BACH 1]. Ausgangspunkt des Entwicklungsprojekts war eine dringliche Kundenanfrage, weil sich der vom Kunden ursprünglich vorgesehene Lösungsansatz erst relativ spät im Verlauf des Entwicklungsprozesses als nicht praktikabel herausgestellt hatte. Den als Retter in der Not einspringenden Massivumformern standen deswegen für die Entwicklung (von der Anfrage bis zum Serienanlauf) lediglich sechs Monate statt der üblichen drei Jahre zur Verfügung. Ohne den umfassenden Einsatz von Simulationssoftware hätten die Konstrukteure des Massivumformers diesen Zeitverzug gar nicht mehr aufholen können. Dennoch reichte die Zeit nicht mehr für eine umfassende, das Fertigungsverfahren berücksichtigende Topologieanpassung, weshalb das letztlich realisierte Schmiedeteil noch stark der ursprünglichen Blechkonstruktion ähnelt. Die großflächige und zugleich dünnwandige Geometrie ist leider nicht besonders schmiedefreundlich. So behindert beispielsweise die geringe Wanddicke das Fließen des Materials bei der Umformung. Um dennoch eine zufriedenstellende Formfüllung sicherzustellen, muss der Rohling vor dem eigentlichen Schmiedevorgang aufwendig in mehreren Stufen umgeformt werden, Abbildung 3.4. Dank des Einsatzes der Simulation konnten hierbei zusätzlich erforderliche Anpassungen rechtzeitig erkannt und noch vor Serienanlauf im Werkzeugkonzept umgesetzt werden.

Wesentlicher Aspekt waren auch strenge Vorschriften bezüglich des Bauteilverhaltens im Missbrauchs-

**Abbildung 3.4:** Um eine zufriedenstellende Formfüllung sicherzustellen, muss der Rohling vor dem Schmiedevorgang aufwendig in mehreren Stufen umgeformt werden. Die gesamte Stadienfolge der Herstellung besteht aus 4 Walzstichen, Biegen, Flachdrücken, Vorschmieden, Fertigschmieden, Abgraten, Kalibrieren sowie einer Oberflächenbehandlung

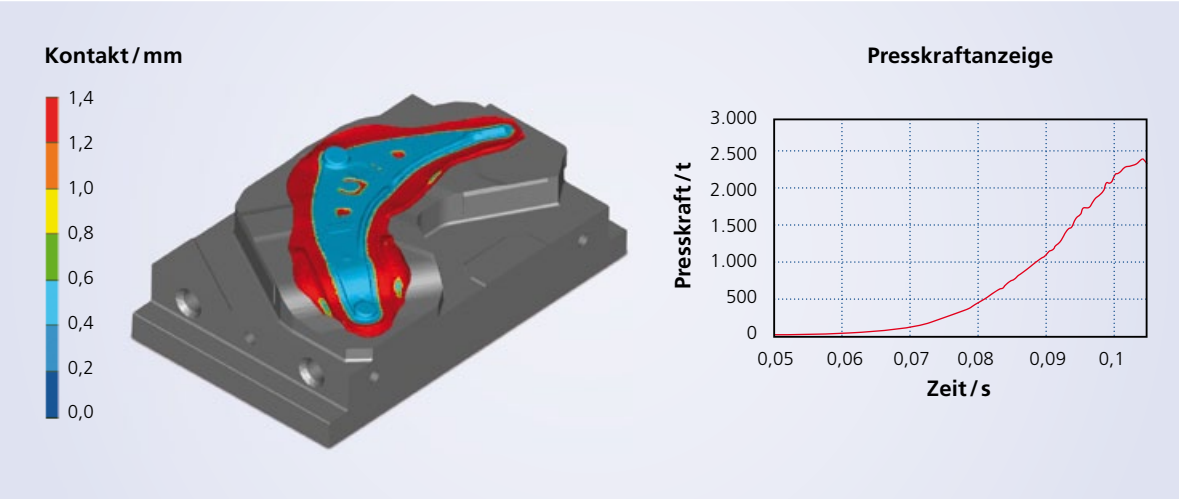



**Abbildung 3.5:** Die Umformsimulation erlaubt die präzise Vorausberechnung der Presskräfte und damit die Entscheidung für ein kleineres und entsprechend wirtschaftlicheres Aggregat

fall. Diesbezüglich galten besonders restriktive Vorgaben, die bei Überlastung ein Einknicken an einer vordefinierten Stelle verlangten, um unzulässige Deformationen beispielsweise im Lagerbereich zu vermeiden. Ihre Umsetzung erforderte entsprechende Anpassungen des Umformprozesses, beispielsweise durch Einengung der üblichen Schmiedetoleranzen.

Weiterer Problempunkt waren die ebenfalls durch die Dünnwandigkeit bedingten extrem hohen Presskräfte bei der abschließenden Umformoperation. Dies hätte den Einsatz einer viel zu großen Presse erfordert und damit den zulässigen Kostenrahmen gesprengt. Auch hier spielte die Umformsimulation eine wichtige Rolle, weil sie es ermöglichte, die auftretenden Pressenkräfte mit hoher Zuverlässigkeit vorauszuberechnen (Abbildung 3.5). Dabei zeigte sich, dass man bezüglich der Maximalbelastung gerade noch innerhalb des Toleranzbereichs eines kleineren und damit wirtschaftlicheren Aggregats bleiben würde.

### 3.1.4 Optimierung von Stirnzahnrädern

Über den erfolgreichen Einsatz von Simulationsverfahren bei der Optimierung von Stirnzahnrädern im Automobilbereich berichten S. Huber et al. [HUBE 1]. Ausgangspunkt sind Stirnradsätze, die in modernen Motoren anstelle von Zahnriemen für den Nockenwellenantrieb eingesetzt werden. Im Vordergrund stand eine Reduzierung des Gewichts durch Realisierung einer sogenannten Wellenprofil-Anbindung zwischen Nabe und Zahnkranz statt der

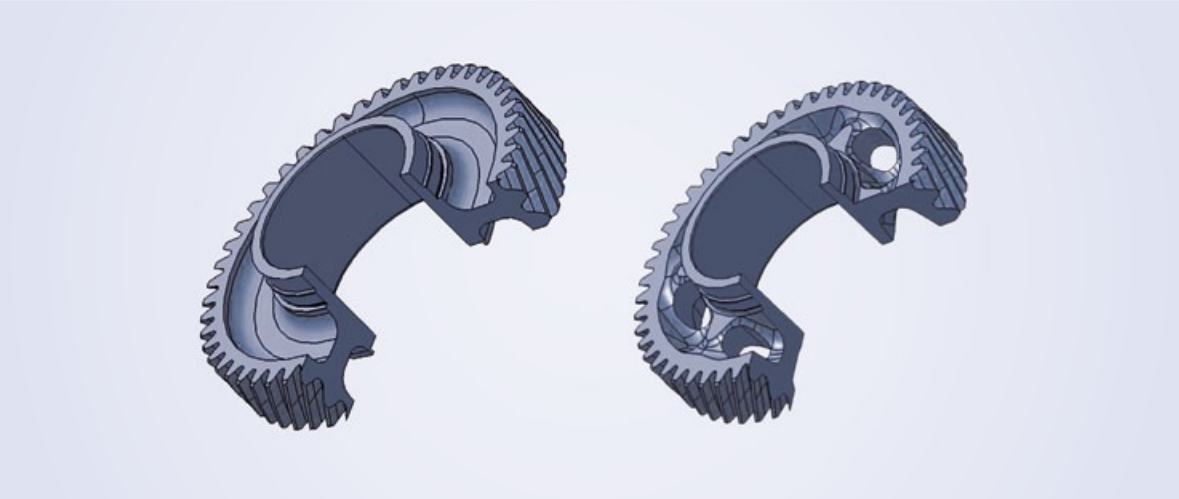


**Abbildung 3.6:** Schrägverzahnte Zahnräder mit verschiedenen Verbindungsprofilen:
T-Profil-Anbindung (links), gelochte Wellenprofil-Anbindung (rechts)

bisher üblichen T-Profil-Anbindung (Abbildung 3.6). Herausforderung war hierbei die anspruchsvolle Umformtechnik zur Herstellung solcher wellenprofilierter Zahnräder. Dabei ging es insbesondere um eine genaue Massevorverteilung in den Vorstufen, um die Werkzeuge – insbesondere den Pressstempel der Fertigstufe mit der Wellen- bzw. Kronenkontur – zu schonen. Ein ungleichmäßiger Angriff des Umformmaterials an den Flanken der Erhebungen des Stempels und in der Matrize würde diese bezüglich abrasivem Verschleiß und Bruch sehr gefährden. Die entsprechenden Umformstadien wurden daher mit Hilfe von Simulationsprogrammen umfassend untersucht und optimiert.

Weiterer Aspekt dieser Entwicklung war die Minimierung des Aufmaßes bei der spanenden Herstellung der Verzahnung im „grünen", d. h. im nicht gehärteten Zustand. Dieses Aufmaß ist erforderlich wegen des Verzugs, den das Bauteil beim Härten vor der abschließenden Finishbearbeitung durch Schleifen erleiden kann. Da das Schleifen im gehärteten Zustand ein sehr teurer Bearbeitungsvorgang ist, wirkt sich jede Minderung des Aufmaßes positiv auf die Kosten aus. Versuche ergaben, dass eine Reduzierung von 0,05 bzw. 0,1 mm in Bezug auf das Schleifaufmaß pro Zahn möglich war, wodurch eine erhebliche Kosten- und Zeiteinsparung erreicht wird.

Weitere Vorteile zeigten sich bei der Untersuchung wichtiger Kenngrößen wie der von-Mises-Vergleichsspannung im Stegbereich zwischen Nabe und Zahnkranz sowie der Gesamtverformung im Bereich des Zahnkranzes mit Hilfe der FEM-Analyse (Abbildung 3.7). Zusätzliche Untersuchungen ergaben, dass bei einer welligen Anbindung der Unterstützungsbereich unterhalb des Zahns schmaler ausfallen kann. Am Beispiel eines Zahnrads mit einem Durchmesser von 110 mm und einer Zahnhöhe von 8 mm ergaben sich durch die Umstellung Gewichtsreduzierungen zwischen 60 und 100 g und somit auch eine Verkleinerung des Trägheitsmoments. Je nach Ausführung ergeben sich dabei Gewichtsersparnisse bis zu 10 %.

### 3.1.5 Optimierung eines Aluminiumrads

Über Fortschritte bei der Neuentwicklung von massivumgeformten Aluminiumrädern berichtet P. Olle [OLLE 1] am Beispiel eines „historischen" Klassikers. Da für dieses Rad ein Retro-Look in den heute aktuellen Raddimensionen vorgesehen war, sollte sich das markante Design des Originals aus den späten 60er Jahren in der Neuentwicklung wiederfinden. Dennoch sollte das Rad gewichtsoptimal ausgelegt werden, ohne dass es zu nachteiligen Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit kommen durfte. Dieser Aspekt hatte bei der Entwicklung hohe Priorität, nicht zuletzt im Hinblick auf Minimierung der ungefederten Masse eines Fahrzeugs zur Steigerung des Fahrkomforts. Räder sind Sicherheitsbauteile, die aufgrund ihres direkten Kontakts mit der Fahrbahn besonders hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Ihre Dauer-

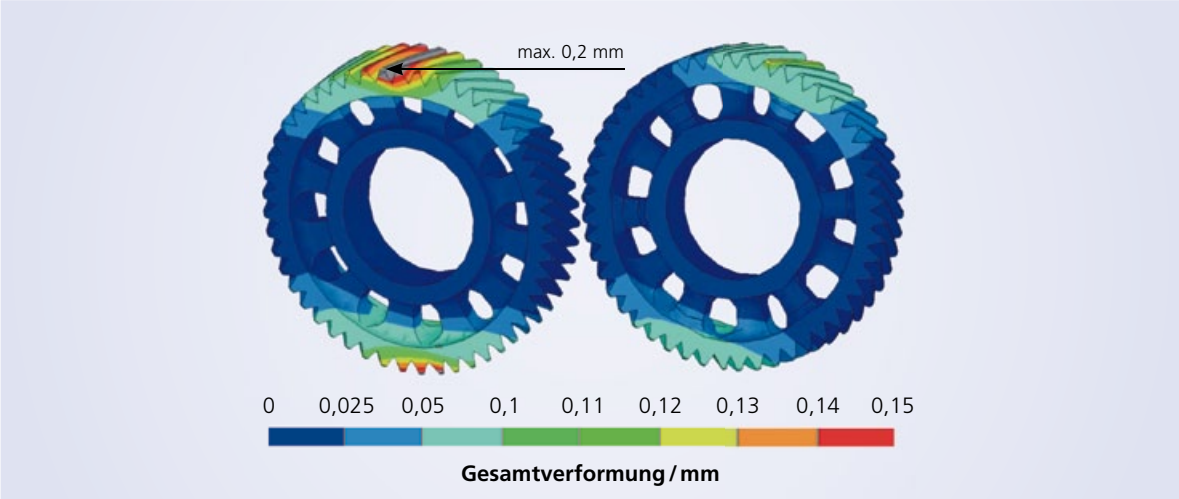



**Abbildung 3.7:** Gesamtverformung in mm: gelochtes T-Profil (links), gelochtes Wellenprofil (rechts)

festigkeit muss daher durch gleich zwei dynamische Prüfverfahren nachgewiesen werden: durch eine klassische Umlaufbiegeprüfung (UBP) sowie der mit Hilfe vom Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF entwickelte zweiaxialen Radprüfung (ZWARP), jeweils mit praxisüblichen Lastkollektiven. Beide Prüfungen lassen sich mittels spezieller FEM-Software simulieren. Die UBP-Simulation wird teilautomatisiert modelliert, berechnet und ausgewertet, während das Preprocessing einer ZWARP-Simulation mit Hilfe eines speziell für Räder entwickelten Simulationswerkzeugs erfolgt.

Bei der Entwicklung des neuen Raddesigns waren daher ständige Optimierungsschleifen zwischen CAD-Programm, Schmiedesimulation und den Programmen zur Lebensdauerberechnung erforderlich. Wegen der Forderung nach unverkennbarer Optik durften Veränderungen nur auf der Bremsenseite der Räder vorgenommen werden (Abbildung 3.8). Die designunabhängige Gewichtsminderung erfolgte deshalb mittels in die Speichen eingeschmiedeter, topologieoptimierter Taschen sowie durch zusätzliche Sackloch-Bohrungen zwischen den Befestigungslöchern. Nach jeder Optimierungsschleife mussten sowohl die Auswirkungen auf die Schmiedbarkeit der Kontur als auch die Einhaltung der geforderten Lebensdauer erneut rechnerisch überprüft werden (Abbildung 3.9). Interessant war aus Sicht der Entwickler, dass sie nicht nur eine merkliche Gewichtsreduktion erreichen konnten, sondern dank verbesserter Simulationswerkzeuge der Zeitaufwand für die Entwicklung von Aluminium-Schmiederädern im Laufe der Jahre gesenkt werden konnte. Besonderen Anteil hatten hieran die Lebensdauerberechnungen. Die Baumusterprüfung konnte daher an bereits optimal ausgelegten Rädern durchgeführt werden. Dies erlaubte es, den für die Lebensdauertests zu treibenden Prüfaufwand im Labor signifikant zu verringern. Ebenso entfallen zeitraubende und kostenintensive Nachbesserungen der Räder, die weitere Entwicklungsschleifen nach sich ziehen würden. Die Räder werden von Anfang an mit einer konsequent hohen Bauteilausnutzung entwickelt. Somit entsteht ein äußerst leichtes Produkt, das jedoch allen sicherheitsrelevanten Anforderungen gerecht wird.

## 3.2 Einsatz weiterführender Simulationstechniken

Je intensiver der Massivumformer an der gemeinschaftlichen Entwicklung neuer Produkte beteiligt wird, desto umfassender ist oft die Reichweite weitergehender Berechnungen, mit deren Hilfe er die Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts computergestützt simuliert, um zu einer optimalen Lösung zu kommen. Dabei bringt er umfassendes Wissen über die Zusammenhänge zwischen den Gebrauchseigenschaften eines Bauteils und den Besonderheiten des Herstellprozesses ein. Nachfolgend werden einige diesbezügliche Beispiele vorgestellt.

**Abbildung 3.8:** Die bremsenseitige CAD-Darstellung zeigt die in die Speichen eingeschmiedeten Gewichtserleichterungstaschen sowie die zusätzlich gewichtsmindernden Bohrungen zwischen den Befestigungslöchern für die Radbefestigungsschrauben

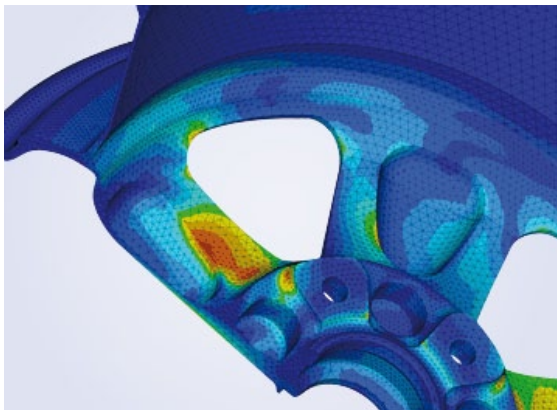


**Abbildung 3.9:** Die Untersuchung der dynamischen Festigkeit mit Hilfe einer FEM-Analyse zeigt, dass die Ränder der Gewichtserleichterungstaschen mit besonderer Sorgfalt ausgelegt werden mussten

### 3.2.1 Anpassung von Differenzialverzahnungen

Bei der Entwicklung neuer Differenziale geht es darum, auf der Grundlage von Kundenvorgaben passende Lösungen zu finden [RUE 1]. Üblicherweise erhält der Massivumformer hierzu vom Kunden ein Lastenheft mit detaillierten Vorgaben bezüglich Bauraum, Schnittstellen, vorzusehenden Lastfällen und maximalem Gesamtgewicht. Beispiel hierfür ist ein komplett neu auszulegendes Differenzial, bei dem insbesondere eine extrem hohe Toleranz gegenüber Verlagerungen durch von außen einwirkende Kräfte gefordert wurde.

Übliche Vorgehensweise ist in solchen Fällen zunächst eine Grobauslegung der Geometrie mit Hilfe eines CAD-Programms, wobei man danach strebt, die für den Bauraum maximal mögliche Zahnflankenlänge und Tragfähigkeit zu finden. Zu den Variablen gehört in diesem Stadium der Entwicklung u. a. die Zähnezahl, wobei auch die Erfahrung des Konstrukteurs eine große Rolle spielt. Er muss beispielsweise berücksichtigen, dass nicht jede mit CAD konstruierbare Geometrie später auch wirtschaftlich geschmiedet werden kann.

Im nächsten Entwicklungsschritt geht es dann um die Ausarbeitung der Details der Verzahnung, um eine optimale Tragfähigkeit zu erzielen. Für die Berechnung kommt ein DIN-Berechnungsprogramm der Forschungsvereinigung Antriebstechnik zum Einsatz. Um dieses Standardprogramm herum wurden beim Massivumformer im Laufe der Jahre zahlreiche zusätzliche Routinen hinzugefügt, die das spezielle Know-how und die Erfahrung der Entwickler widerspiegeln. Beim vorgestellten Projekt wurden rund 10.000 Varianten entworfen, mit den unterschiedlichen Einsatzszenarien durchgerechnet und die Ergebnisse bewertet. Das besondere Know-how der Massivumformer liegt hierbei auch darin, wie die Vorgaben und Randbedingungen parametrisiert und wie die besten Lösungen identifiziert werden.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird anschließend die Geometrie des Zahnrads mit Hilfe eines CAD-Programms aufgebaut. Zur Basisgeometrie werden dann diverse Feinheiten wie Balligkeit, Fußausrundung der Zahnzwischenräume oder Kompensation verfahrensbedingter Abweichungen wie der sogenannten Zahnflankenverschränkung hinzukonstruiert, um das Tragbild unter Last zu optimieren. Von Bedeutung sind auch Faktoren wie das Steifigkeitsverhältnis von Ritzel und Rad. Mit all diesen Vorgaben geht es dann in die Festigkeitsanalyse, die mit Hilfe eines FE-Programms durchgeführt wird (Abbildung 3.10). Hiermit wird die Einhaltung aller Vorgaben überprüft.

Anschließend folgt die Herstellung eines Prototypen durch Fräsen aus dem Vollen, um das Abrollverhalten zu beurteilen (Abbildung 3.11). Schließlich werden Prototypen geschmiedet, welche auf dem hauseigenen Prüfstand getestet werden. Im hier vorgestellten Beispiel gelang es den Fachleuten des

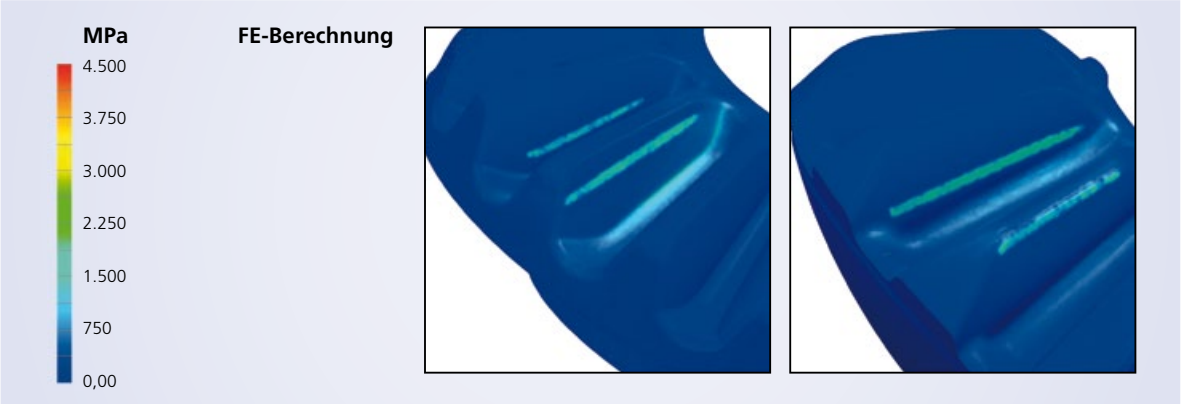
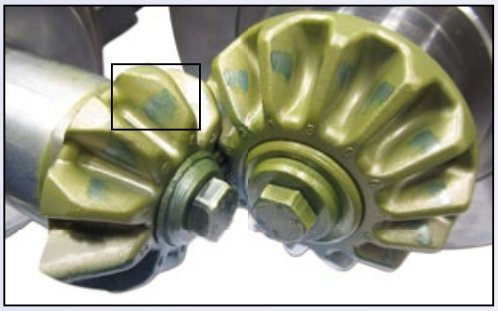



**Abbildung 3.10:** Belastbarkeitsanalyse von Differenzialkegelrädern mit Hilfe eines FE-Programms



Theoretische Auslegung

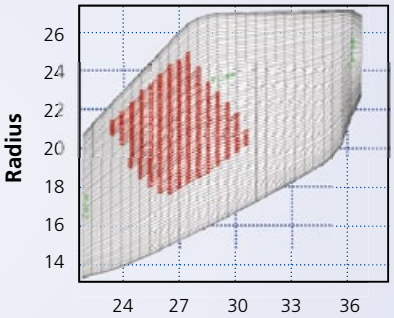



**Abbildung 3.11:** Stunde der Wahrheit: Auf dem Teststand zeigt sich, ob reales und theoretisch errechnetes Tragbild ausreichend übereinstimmen

Massivumformers, trotz der Berücksichtigung der Verlagerungsproblematik eine Verdopplung der zu erwartenden Laufzeiten zu erzielen.

### 3.2.2 Simulationsgestützte Optimierung eines Gleichlaufgelenks

Ein schönes Beispiel dafür, wie ein Massivumformer Entwicklungen seiner Kunden unterstützen kann, ist das nachfolgend vorgestellte optimierte Gleichlaufgelenk [LEH 1]. Gleichlaufgelenke sind u. a. in Kardanwellen eingesetzte Übertragungselemente, die dafür sorgen, dass die Winkelgeschwindigkeit der gesamten Wellenanordnung – im Gegensatz zur Verwendung von Kreuzgelenken – auch bei Beugung konstant bleibt (Abbildung 3.12). Es besteht im Wesentlichen aus zwei Schmiedeteilen (Nabe und Ring), den dazwischen angeordneten Kugeln sowie einem Blechgehäuse. Besonderheit dieser seit 2006 in Serie gefertigten Gelenkteile ist die Tatsache, dass die Laufbahnen der beiden Hauptkomponenten direkt einbaufertig umgeformt werden und nach der Wärmebehandlung nicht mehr bearbeitet werden müssen.

Seitens eines Automobilherstellers wurde nun die Aufgabe gestellt, die Belastbarkeit dieses Gelenks entsprechend der höheren Leistung neuer Dieselmotoren um mehr als 30 % zu steigern, ohne seine Größe zu verändern.

Eine Analyse des Drehmomentpfads zeigte, dass der Durchmesser der Kugeln die entscheidende Einflussgröße darstellt. Die genauere Untersuchung der beiden Schmiedeteile ergab, dass die Nabe so „verschlankt“ werden kann, dass größere Kugeln ins Gelenk passen. Die Konstruktion der Geometrie erfolg-

**Abbildung 3.12:** Das Gleichlaufgelenk sorgt dafür, dass die Winkelgeschwindigkeit in Kardanwellen konstant bleibt. Es besteht im Wesentlichen aus den zwei Schmiedeteilen Nabe und Ring, den Kugeln sowie einem Blechgehäuse

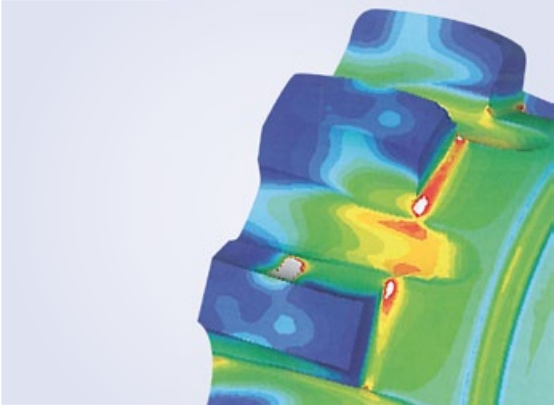


**Abbildung 3.13:** Die verbesserte Konstruktion wurde mit Hilfe einer FEM-gestützen Analyse bezüglich Spannungsverteilungen und möglicher Schwachstellen überprüft

te mit Hilfe einer CAD-Software, für die Berechnung der statischen und dynamischen Belastungen kamen FEM-Programme zum Einsatz (Abbildung 3.13). Grundlage der Berechnungen waren vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte Lastkollektive für die diversen Beugebedingungen. Eine weitere Rolle spielte die Simulation der prozesstechnischen Darstellbarkeit einer speziellen Nut, die in der Nabe vorgesehen werden muss, um die Kugeln überhaupt montieren zu können. Mit weiteren Simulationen wurde schließlich auch noch abgeklärt, dass die Nabe mit dieser Nut noch ausgeführt werden kann, ohne das Risiko von Ermüdungsrissen zu erhöhen.

### 3.2.3 Designoptimierung von Pleueln

Auch bei der Entwicklung neuer Pleuel erhält der Massivumformer im Idealfall ein Lastenheft mit den Einbauverhältnissen sowie Belastungsangaben und erstellt das Design dann selbst [MAH 1]. Typische Vorgaben beziehen sich einerseits auf den Bauraum – maximale Breite, Hub, Abstand des Kolbenbolzens zur Kurbelwelle – und andererseits auf Belastungsangaben wie den Zünddruck. Aufgabe der Schmiedefachleute ist dann insbesondere, eine möglichst leichte Ausführung zu finden.

Bei ihrer Arbeit kommen für die Geometriedefinition zunächst branchenübliche CAD-Programme zum Einsatz. Weitere Arbeiten erfolgen mit Hilfe eines speziellen Designprogramms für Pleuel, das auf die spezifischen Belastungen des Bauteils hin optimiert wurde. Dabei werden die Querschnitte des Pleuels mit Computerhilfe optimiert und die erforderliche statische Festigkeit wird über einen Vergleich mit den in einer FE-Analyse berechneten Spannungen bestimmt. Aufgrund ihrer Erfahrung berücksichtigen die Mitarbeiter hierbei von vornherein Machbarkeitsaspekte wie Radien, Auszugsschrägen oder die Klärung solcher Fragen wie die, ob das Auge für den Kolbenbolzen noch gestanzt werden kann oder ob gebohrt werden muss.

Die dynamische Analyse des so gefundenen Designs (Abbildung 3.14) erfolgt meist wieder beim Kfz-Hersteller, da dieser die Entwicklungshoheit hat. Hierbei findet ein intensiver Parameteraustausch mit dem Zulieferer statt. Dieser verfügt erforderlichenfalls jedoch auch über die nötigen Kompetenzen, um den Kunden bei solchen Arbeiten auf Wunsch zu entlasten. Nach Klärung aller theoretischen Fragen folgen dann erste Praxistests, zunächst mit aus dem Vollen gefrästen, später mit geschmiedeten Prototypen.

Generelle Aufgabe der Schmiedefachleute ist darüber hinaus, dem Wunsch der Kunden nach immer mehr Motorleistung bei immer geringerem Verbrauch zu entsprechen. Dies bedeutet, dass die Pleuel immer schlanker und leichter ausgeführt werden müssen. Um dies zu gewährleisten, müssen die Grenzen des Verfahrens zunehmend erweitert werden. Dies setzt wiederum voraus, dass die betreffenden Grenzen zuverlässig abgeschätzt, in der Fertigung erreicht und nachhaltig eingehalten werden können.

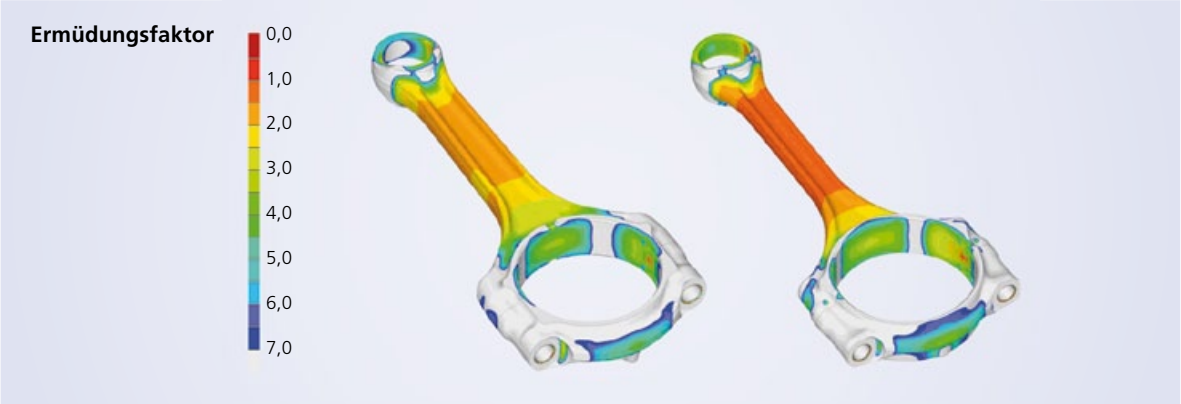



**Abbildung 3.14:** Verteilung der Ermüdungsfaktoren in einem Pleuel mit konventioneller Geometrie (links) im Vergleich zu einem optimierten Pleuel mit deutlich schlankerem Schaft (rechts) bei Auslegungsbelastung

## 3.3 Kreativität – durch nichts zu ersetzen

Wie bereits ausgeführt, sind Simulationswerkzeuge Hilfsmittel, die in die Hand des Fachmanns gehören. Sie können das Denken nicht ersetzen. Entscheidender Faktor des Fortschritts bleibt die Kreativität des Menschen, bleiben pfiffige Ideen und der Mut, neue Wege zu gehen. Die Aufgabe der Simulation ist es dann, die Machbarkeit und die Vorteile dieser Ideen herauszuarbeiten. Nachfolgend werden einige Beispiele vorgestellt.

### 3.3.1 Präzisionsschmieden von Zahnrädern vorteilhafter als Zerspanen

Mit Hilfe der FEM-Simulation lassen sich heute beim Präzisionsschmieden Geometrien (Abbildung 3.15) erzeugen, die konventionell nicht wirtschaftlich hergestellt werden könnten [GUT 1]. Wesentlicher Aspekt ist hierbei die Tatsache, dass die durch Präzisionsumformung hergestellten Verzahnungen nicht mehr mechanisch bearbeitet werden müssen. Möglich wird dies durch Fortschritte bei CAM-gestützten Technologien zur Erzeugung hochpräziser Umformwerkzeuge einerseits sowie die Einengung der Prozessparameter bei den Umformprozessen andererseits. Das Schmieden erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird die Geometrie durch Warm- oder Halbwarmschmieden erzeugt. Nach kontrollierter Abkühlung und Reinigung werden die Teile dann kalt kalibriert. Die damit erzielbare Maßgenauigkeit liegt im Bereich von wenigen Hundertstel Millimetern, sodass für bestimmte Elemente wie z. B. Kuppelverzahnungen keine weitere Bearbeitung mehr erforderlich ist. Dies hat gleich drei entscheidende Vorteile: Zunächst einmal brauchen keine Auslaufbereiche für zerspanende Werkzeuge vorgesehen zu werden, außerdem können diese Kuppelverzahnungen vertieft angeordnet werden (Abbildung 3.16). Die dadurch flacher bauenden Zahnräder geben dem Kfz-Konstrukteur zusätzliche Freiheitsgrade für die Entwicklung kompakter, leichter Getriebe mit hohen Gangzahlen. Weiterer Vorteil ist die Anbindung der Kuppelverzahnung im unteren Bereich. Dies steigert die Belastbarkeit des Zahns.

Ähnlich vorteilhaft wirkt sich auch die von B. Laackmann [LAAC 1] beschriebene Anbindung des Zahnfußes von präzisionsgeschmiedeten Kegelrädern am kleinen wie auch am großen Modul sowie der optimal zu gestaltende Übergang vom Zahnfuß auf die Flanke aus (Abbildung 3.17). FEM-Berechnungen

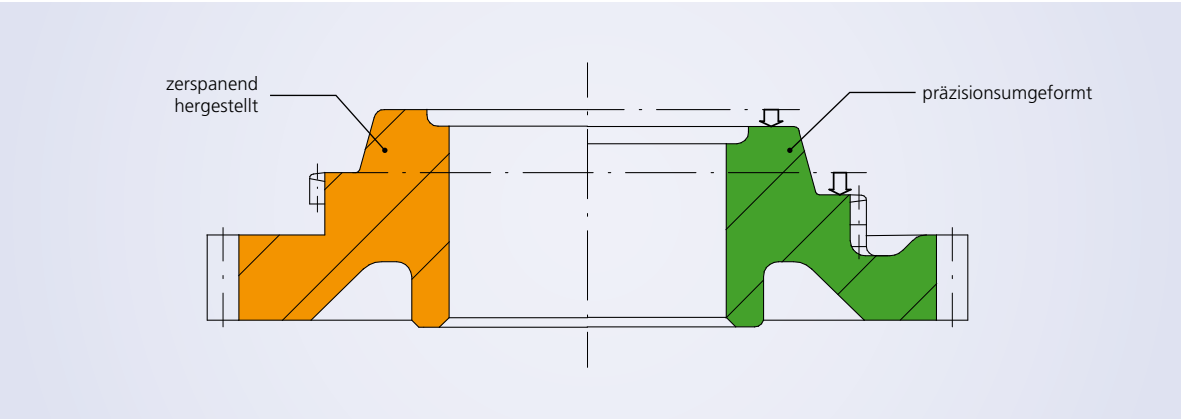



**Abbildung 3.15:** Mit einer einbaufertig geschmiedeten integrierten Kuppelverzahnung lässt sich das Getriebegangrad wesentlich flacher und damit platzsparender herstellen

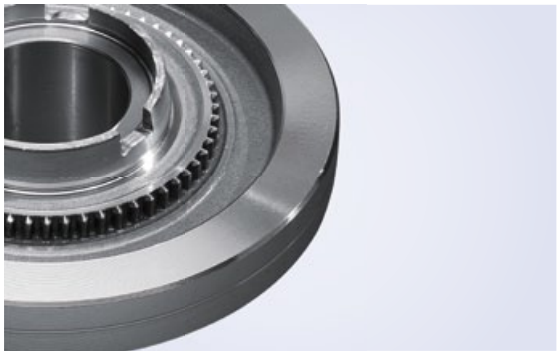


**Abbildung 3.16:** Getriebegangrad mit fertig geschmiedeter Kuppelverzahnung. Die direkte Anbindung der Zahnunterseite steigert die Belastbarkeit und ermöglicht kleinere Dimensionen

zeigen, dass mit solchen umformtechnisch erzeugten Verzahnungen im Vergleich zu zerspanend herstellbaren Geometrien ein größeres Moment übertragen werden kann. Dies ermöglicht wiederum Einsparungen bezüglich Baugröße und Gewicht von Differenzialen.

### 3.3.2 Lamellenträger für Kupplung

Durch intelligente Kombination unterschiedlicher Umformverfahren können heute vielfach auch Verzahnungen rein umformtechnisch mit derart hoher Präzision hergestellt werden, dass nachfolgende Zerspanungsvorgänge entweder völlig entfallen oder auf ein Minimum reduziert werden. Die Vorteile der Verfahrenskombination spiegeln sich entsprechend in Form von erheblichen Kosteneinsparungen wider [LAND 1].

Eine derartige Entwicklung wurde beispielsweise anhand eines Lamellenträgers realisiert (Abbildung 3.18). Es handelt sich hierbei um ein zentrales Bauteil der Verteilerkupplung für allradgetriebene Fahrzeuge. Um bei diesen die Antriebsleistung bedarfsgerecht auf Vorder- und/oder Hinterachse zu verteilen, kommen spezielle Lamellenkupplungen zum Einsatz. Der Lamellenträger übernimmt die Aufgabe, die Lamellen mit der Außenverzahnung aufzunehmen und deren Drehzahl zu übertragen. Verzahnte Lamellen greifen entsprechend wechselweise in eine außen bzw. innen liegende Verzahnung ein. Presst man das Lamellenpaket zusammen, so wird aufgrund der zwischen den Lamellen entstehenden Reibung Drehzahl und Drehmoment übertragen. Die zu übertragende Leistung kann durch Veränderung des Anpressdrucks variiert werden.

Das Basisbauteil wird zunächst durch eine Halbwarmumformung hergestellt. Die Verzahnungen entstehen in einem anschließenden Kaltumformprozess. Danach werden Lager- und Dichtflächen überdreht sowie einige Durchbrüche zerspanend hergestellt. Bei der Innenverzahnung im Topf reicht die Festigkeit der Zahnflanken nach der Kaltumformung aus, um selbst der hohen spezifischen Druckbelastung durch die schmalen Kupplungslamellen ohne Nachbehandlung standzuhalten.

FEM-Simulation kommt in derartigen Fällen einerseits bei der Feinabstimmung von Konturen umformtechnisch hergestellter Vor- und Zwischenformen zur Anwendung. Andererseits leistet sie einen Beitrag zur Findung der idealen Stempelkontur für die Fertigstellung der Innenverzahnung.

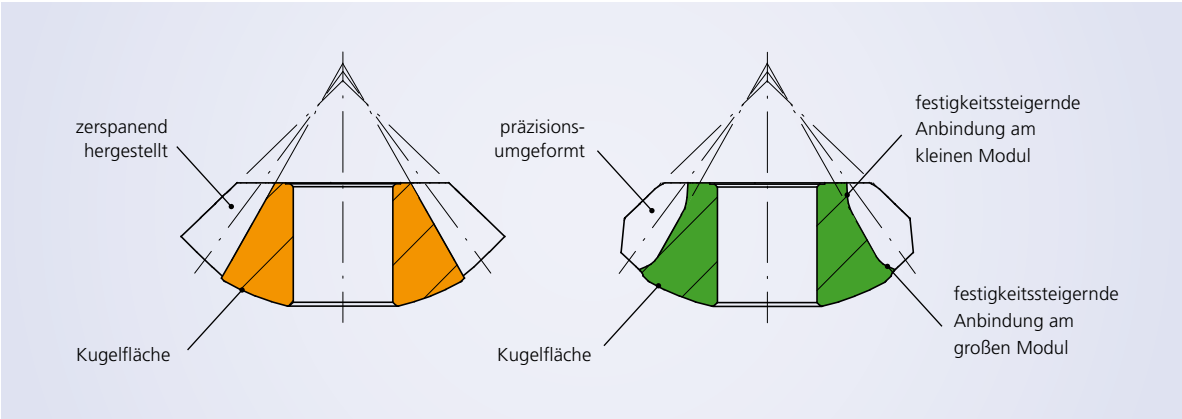



**Abbildung 3.17:** Im Vergleich zu zerspanend herstellbaren Geometrien ermöglicht das Präzisionsschmieden die belastbarkeitssteigernde Anbindung des Zahnfußes von Kegelrädern am kleinen wie auch am großen Modul

**Abbildung 3.18:** Außenlamellenträger für die Verteilerkupplung eines allradgetriebenen Fahrzeugs

# 4 Simulation entlang der Massivumform-Prozesskette

Unter den Schmiedewerkstoffen dominiert der Stahl. Die für die Abläufe bei der Massivumformung von Stahl übliche Prozessfolge umfasst bis zu 14 einzelne Stufen. „Geburtsort" des Schmiedeteils ist das Stahlwerk, in dem die Legierung erschmolzen und zu Rohblöcken oder Stranggussbrammen verarbeitet wird. Diese werden anschließend durch Pressen, Hämmern, Walzen oder Ziehen zu Halbzeug in Form von Knüppeln, Stangen oder Draht umgeformt. Vor der Auslieferung an den Massivumformer wird das Vormaterial teilweise noch geschält, um Oberflächenfehler zu entfernen. Im Verlauf dieser Prozessfolge werden wesentliche Eigenschaften des Schmiederohlings wie Legierungszusammensetzung, Reinheitsgrad und Seigerungsstruktur definiert. Diese haben erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften des späteren Schmiedeteils.

Beim Massivumformer selbst beginnt die Prozesskette dann mit den Stadien Materialvorbehandlung, Trennen und Erwärmen, bevor es zum eigentlichen Umformen kommt. Weitere Stationen sind Zerspanung und Wärmebehandlung sowie Oberflächennachbehandlung. Je nach Anwendungsfall kann ein Umformteil all diese Stadien oder – insbesondere im Fall der Kaltmassivumformung – lediglich einen Teil davon durchlaufen.

Zu vielen Prozessstufen gibt es mittlerweile Simulationsprogramme, die es ermöglichen, den jeweiligen Prozess virtuell abzubilden und in seinen Auswirkungen zu berechnen. Der heutige Stand der Technik wird nachfolgend exemplarisch an konkreten Fallbeispielen verdeutlicht.

## 4.1. Simulationseinsatz im Stahlwerk

Den erfolgreichen Einsatz unterschiedlichster Programme zur Simulation der Abläufe im Stahlwerk – vom Legierungsdesign über das Gießen bis zum Walzen – beschreiben C. Ernst, J.-S. Klung et al. [DUH 1, ERNS 1, ERNS 2, KLUN 1, KLUN 2]. Schon im Vorfeld der Herstellung kommen bei der Konzipierung neuer bzw. modifizierter Legierungen Programme zur computergestützten Simulation der thermodynamischen Gleichgewichtszustände im Gefüge zum Einsatz. In Kombination mit geeigneten Datenbanken ermöglichen sie beispielsweise die Berechnung von Menge und Zusammensetzung bestimmter Phasen im Gleichgewicht. Die Software hilft auch durch systematische Betrachtung der Wirkung von Legierungselementen, beispielsweise durch Modellierung des Einflusses von Molybdän auf die Carbidtypen in einem Kaltarbeitsstahl (Abbildung 4.1). Ein wichtiger Pluspunkt ist darüber hinaus die Berechnung von Phasendiagrammen, aus denen sich geeignete Temperaturbereiche für die

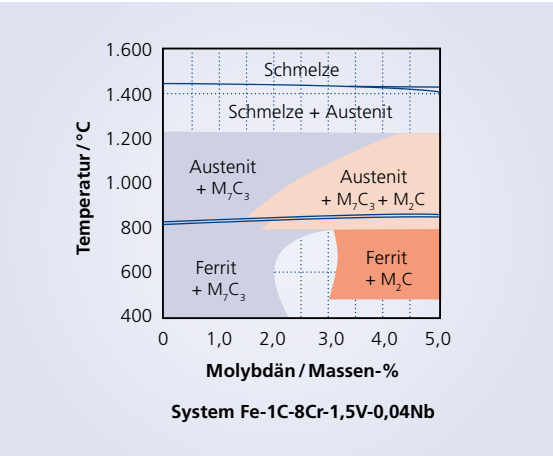



**Abbildung 4.1:** Berechnung des Einflusses von Molybdän auf das Phasendiagramm

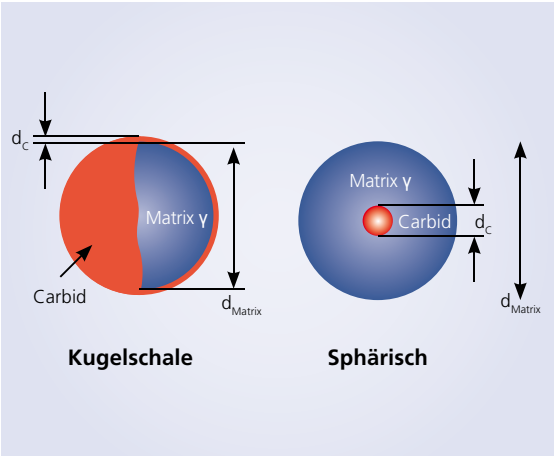



**Abbildung 4.2:** Unterschiedliche geometrische Modelle für die Berechnung diffusionsgesteuerter Umwandlungen in Stählen

Warmumformung und für Wärmebehandlungsvorgänge entnehmen lassen.

Weiterer Anwendungsbereich von Simulationsprogrammen ist die Modellierung diffusionsgesteuerter Umwandlungen in Stählen (Abbildung 4.2). Von besonderer Bedeutung ist dabei die Darstellung von Auflösungs- und Ausscheidungsvorgängen in Edelstählen, die zur Ermittlung von Haltezeiten, -temperaturen und Teilchengrößen berechnet werden. Hierfür stehen unterschiedliche geometrische Modelle zur Verfügung. In der Praxis hat sich das dafür eingesetzte Programm als sehr hilfreich bei der Analyse der Carbidauflösung in Warmarbeitsstählen erwiesen, für die mit Hilfe solcher Berechnungen die betrieblich notwendigen Temperaturen und Haltezeiten beim Diffusionsglühen optimiert wurden.

Für die Simulation der Vorgänge beim Gießen und Erstarren im Stahlwerk sowie bei der Warmumformung neu entwickelter Stahlwerkstoffe kommt Simulationssoftware auf FEM-Basis zum Einsatz. Von Bedeutung ist dies insbesondere bei hochlegierten und daher seigerungsempfindlichen Edelstählen, da hier Makroseigerungen, Porositäten sowie Lunker erhebliche Auswirkungen auf nachfolgende Produktionsschritte haben. Die auftretenden Seigerungsvorgänge werden mit Hilfe der Software abgebildet. Dies ermöglicht es beispielsweise, das örtliche Seigerungsverhalten für einzelne Legierungselemente zu analysieren (Abbildung 4.3) und durch geeignete Maßnahmen gezielt zu optimieren.

Ein nächster Schritt ist die Simulation der Umformung mit Hilfe eines weiteren Programms (Abbildung 4.4). Im Verlauf dieser virtuellen Formgebung werden Werkstoff- und Werkstückanalysen durchgeführt, um Temperatur-, Spannungs- und Faserverlauf sowie den Umformgrad darzustellen. Das Programm ermöglicht Vorhersagen des Werkstoffflusses sowie Geschwindigkeits- und Verschiebungsanalysen, um so bei der Identifizierung von Defekten und Fehlerquellen zu assistieren. Bei neu entwickelten Legierungen hilft diese Simulation bei der Erstellung von Stichplänen mitsamt den notwendigen Zwischen-, Vor- und Nachbehandlungen, die auf den neuen Werkstoff abgestimmt sind.

Ziel des Einsatzes dieser Programme ist es, die traditionell experimentell ausgerichtete Vorgehensweise bei Entwicklungsprojekten durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Berechnung von Gieß-, Umform- und Wärmebehandlungsvorgängen sowie passende, auf den Werkstoff Stahl ausgerichtete Datenbanken zu ergänzen. Dadurch soll auch die Effizienz des Entwicklungsprozesses gesteigert werden. Die optimierte Nutzung personeller Ressourcen und Prüfkapazitäten soll dazu beitragen, die Reaktionszeit auf Kundenbedürfnisse sowie die Projektdurchlaufzeiten zu verkürzen und Kosten zu senken.

Ein Großteil der für die Umsetzung dieses Konzepts erforderlichen Software, Datenbanken und personellen Ausstattung ist entweder bereits vorhanden oder zurzeit im Aufbau. Über externe Forschungs-

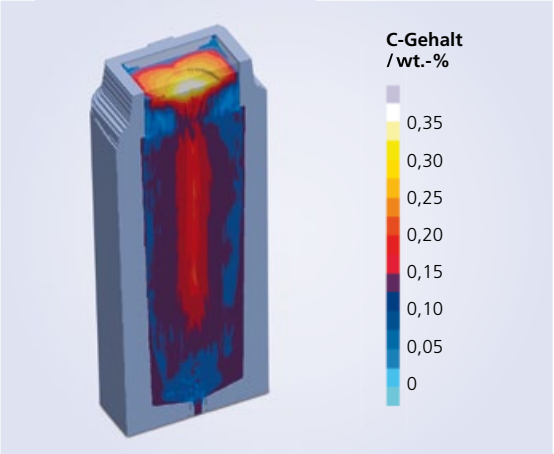



**Abbildung 4.3:** Simulation der Kohlenstoffseigerung im Blockguss

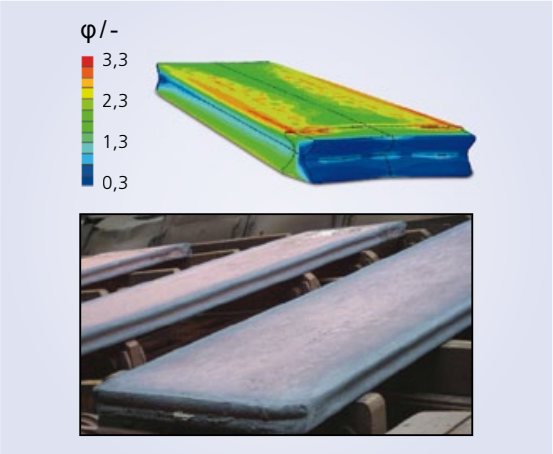



**Abbildung 4.4:** Vergleich von durch Simulation berechneter und tatsächlicher Geometrie eines Walzbarrens

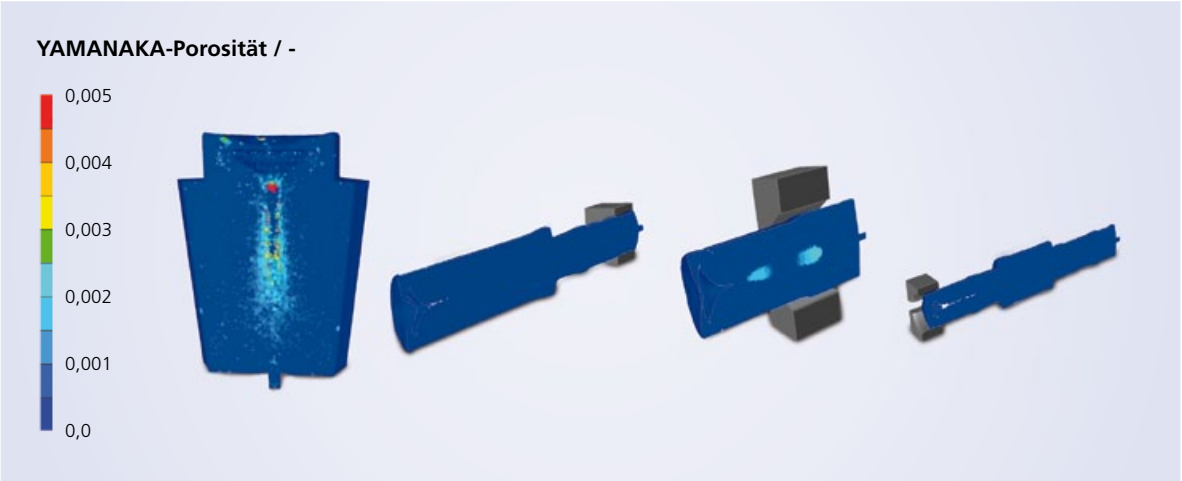



**Abbildung 4.5:** Die Verknüpfung eines Gieß- und eines Schmiedeprogramms gestattet die Verfolgung der beim Gießen in einem 1,6-t-Block entstandenen Porositäten im Verlauf der folgenden Reckoperationen

kooperationen mit Universitäten, Forschungsinstituten und Industriepartnern besteht zudem der Zugang zu weiteren speziellen Programmen und (Groß-) Rechnerkapazität. Auf diesem Weg wurde es auch möglich, selbst sehr spezielle, nicht alltägliche Werkstoffprobleme mit der Hilfe externer Fachleute und deren Know-how in der Simulationstechnik zu lösen. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch der Wissenstransfer an die eigenen Werkstoffingenieure im Sinne einer kontinuierlichen Weiterqualifizierung.

Über die gelungene Verkettung der Simulation des Gießvorgangs bei der Herstellung des Schmiederohblocks mit der Darstellung der anschließenden Massivumformung berichtet C. Fourment [FOUR 1]. Damit gelang ein wichtiger Brückenschlag zwischen zwei bisher getrennten Softwarewelten, der Simulation der Vorgänge im flüssigen Zustand sowie der Abbildung des Materialverhaltens bei der Umformung im festen Zustand. Dies ermöglicht es künftig, die beim Gießen im Block (Abbildung 4.5) oder im Strang entstehenden Fehler wie Lunker oder Seigerungen als Eingangsparameter für die Simulation der nachfolgenden Massivumformung zu verwenden. Damit lässt sich jetzt die gesamte Fertigungsprozesskette bis zum fertigen Schmiedeteil in ihrer Gesamtheit rechnerisch darstellen. Derzeit wird daran gearbeitet, diese Verknüpfung weiter zu verfeinern und um die Vorhersage weiterer physikalischer Kennwerte zu ergänzen.

## 4.2 Materialvorbehandlung

In der Massivumformung treten Wärme- und Oberflächenbehandlung häufig in unmittelbarer Folge auf und machen die Durchführung zahlreicher Umformverfahren erst möglich. Durch Wärmebehandlung vor bzw. zwischen Umformvorgängen lässt sich sowohl ein für die nachfolgende Umformung günstiges Gefüge einstellen als auch die Fließspannung des Werkstücks reduzieren. Des Weiteren trägt sie zu einer Steigerung des Umformvermögens und der Verringerung von Eigenspannungen bei. Bei hohen Normalspannungen und großen Oberflächenvergrößerungen (wie sie z. B. beim Kaltfließpressen von Stahl auftreten) wird im Allgemeinen die Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke durch zusätzlich aufgebrachte anorganische oder metallische Überzüge verbessert und anschließend darauf Schmierstoff aufgetragen. Bei einigen Umformverfahren kann auf eine Oberflächenbehandlung des Werkstücks verzichtet werden – in diesen Fällen werden in der Regel Schmierstoffe (z. B. auf Graphitbasis) auf die Arbeitsfläche der Werkzeuge aufgebracht [LANG 1]. Für die Umformung metallischer Werkstoffe haben Oberflächenbehandlung und Schmierung insbesondere drei Aufgaben: Einerseits soll der metallische Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug (und die damit verbundene Kaltverschweißung) vermieden werden. Andererseits sollen Reibungsverluste – und somit auch der Kraft- und Arbeitsbedarf – minimiert werden, was wiederum zur besseren Umformbarkeit des Werkstücks beiträgt [LANG 2]. Ein wichtiger dritter

Aspekt ist die Kühlung der Werkzeuge zur Abführung der eingetragenen Wärme.

Weitere im Bereich der Massivumformung etablierte Verfahren zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit sind Ziehen und Schälen. Ziehen kommt typischerweise dann zum Einsatz, wenn vom Draht gearbeitet wird und insbesondere die geometrische Homogenität (z. B. Rundheit) des Halbzeugs verbessert werden soll – zumal sich diese wiederum erheblich auf die Volumenkonstanz im Prozess auswirkt. Schälen wird eingesetzt, um Randverunreinigungen, Oberflächenfehler oder Inhomogenitäten in der Randschicht zu beseitigen und dadurch ebenso ein qualitativ hochwertigeres Halbzeug zu generieren.

Simulationstechniken im Bereich von Verfahren zur Materialvorbehandlung sind in der Massivumformung zwar etabliert, kommen aber eher vor akademischem Hintergrund (wie z. B. beim Strahlen) oder immer dann zum Einsatz, wenn ein unmittelbarer Einfluss von interessierenden Zustandsgrößen auf nachfolgende Prozessschritte zu erwarten ist (wie z. B. beim Ziehen) – so G. Adam et al. [ADAM 1]. Um den sich beim Ziehen von Halbzeugen einstellenden Sekundäreffekt der Oberflächenverfestigung abzubilden, wird in den Umformbetrieben in selteneren Fällen explizit der Prozessschritt simuliert. Häufig liegen bereits FEM-Modelle von gezogenen Drahtabschnitten in Bibliotheken vor, auf deren Basis der Einfluss dieses Effekts auf Folgeoperationen bewertet wird (Abbildung 4.6). Die jeweils im Prozess eingestellten Randbedingungen (z. B. tribologisches Verhalten) und Werkstoffeigenschaften (z. B. Verfestigungsverhalten) werden im Rahmen des Preprocessing von Simulationsmodellen berücksichtigt.

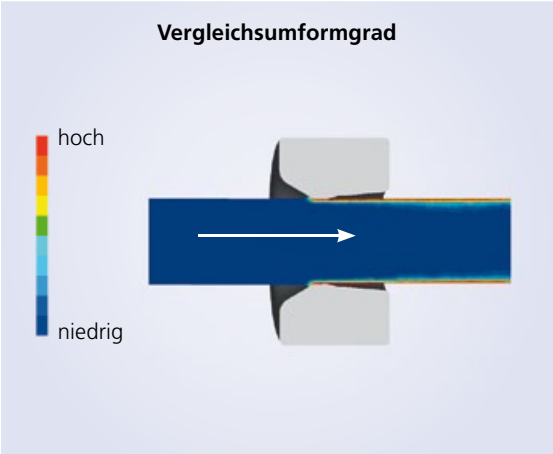



**Abbildung 4.6:** Verteilung des Vergleichsumformgrads im Draht nach dem präzisionssteigernden Ziehen

## 4.3 Trennen

Als Ausgangsmaterial kommen in der Massivumformung häufig Stangenabschnitte oder Draht zur Anwendung. Die Materialtrennung erfolgt dabei i. d. R. durch Scheren oder Sägen. Bei nicht ausgereifter Prozessauslegung kann das Abscheren der Rohlinge (mit Hilfe flacher oder runder Messer) Scherfehler verursachen, welche die Massenverteilung des Rohlings beeinträchtigen (Abbildung 4.7). Diese wiederum kann beim anschließenden Umformvorgang zu ungleichmäßiger Füllung der Gesenkgravur, d. h. zu übermäßiger Gratbildung einerseits und lokaler

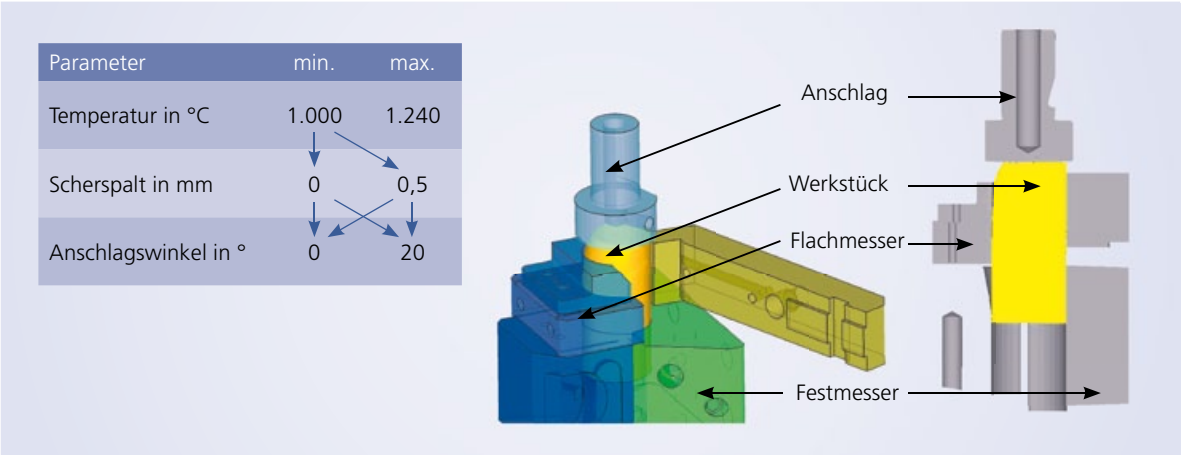



**Abbildung 4.7:** Die mit Hilfe der FEM-Simulation zur Minimierung des Versuchsaufwands untersuchten Parameter

Unterfüllung andererseits führen. Zudem können Scherfehler erhöhten Verschleiß an den Umformwerkzeugen zur Folge haben. Bei den Fehlern wird zwischen Scher-, Geometrie- und Volumenfehlern unterschieden. Zu den Geometrie-fehlern gehören die durch den Druck der Scherkanten entstehenden Einzüge, die als Winkligkeit bezeichnete axiale Deformation des gesamten Rohlings sowie die seitlichen Zipfel. Scherfehler sind der Schergrat sowie die auf der Trennfläche entstehenden Ausbrüche und Zwickel, die eine raue, ungleichmäßige Topologie haben. Besonders kritisch sind letztere Fehler dann, wenn sie nach der Umformung in solchen Bereichen des Schmiedeteils zu liegen kommen, die keine Bearbeitungsaufmaße aufweisen und hohe Ansprüche an die Oberflächenqualität erfüllen müssen. Dies kann vor allem bei Präzisionsschmiedeteilen zu Problemen führen. Volumenfehler entstehen durch falsche Einstellung des Anschlags. Sie verursachen eine Über- oder Unterfüllung des Gesenks. Die Einstellung des Trennprozesses erfordert umfangreiches betriebliches Know-how und ist in der Regel an die speziellen Produktanforderungen angepasst.

Über Erfahrungen beim Einsatz der Simulation zur Untersuchung von Einflüssen durch den Scherprozess berichten P. Guel-López [GUEL 1] und T. Feldhaus [FELD 2]. Bei der FEM-Simulation des Schervorgangs werden neben den Geometrien der Schermesser und des Stangenmaterials wesentliche Parameter wie Scherspalt, Werkstoff, Werkstücktemperatur, Einzugskraft und Anschlagwinkel einbezogen. Zur Beurteilung des Ergebnisses wird üblicherweise die berechnete Topologie mit gescannten Modellen eines realen Scherlings verglichen. Positiv ist zu vermerken, dass der Abdruck der Schermesser und der Materialeinzug auf der Gegenseite des Blocks mit der Realität gut übereinstimmen. Dadurch, dass die simulierte Scherfläche nicht glatt, sondern – bedingt durch die gewählte Netzstruktur – sehr rau ausfällt, entstehen aber generelle Abweichungen zwischen Simulationsergebnis und Realität (Abbildung 4.8). Ferner kann eine Reduzierung des Werkstückvolumens beobachtet werden. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass die Trennung der beiden ursprünglich zu einer Einheit verknüpften FEM-Netze i. d. R. durch Löschen von Elementen in der Scherzone erfolgt, sobald diese einen voreingestellten Schadenswert erreichen.

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge erfordern Schersimulationen sehr viel Rechenzeit, sodass sie nicht bei jedem neuen Bauteil durchgeführt werden. Darüber hinaus steht die schlechte Qualität der abgescherten Flächen derzeit noch dem tagesgeschäftlichen Einsatz der Schersimulation für den Entwicklungsprozess von Schmiedeteilen entgegen. Stattdessen werden häufig die Ergebnisse von bisher durchgeführten Simulationen systematisiert und zu einer Bibliothek verdichtet. Aus dieser können für jeden Werkstoff und Stangendurchmesser die optimalen Einstellwerte (für z. B. Anschlagswinkel und Scherspalt) ermittelt werden.

Da die Geometrie der Scherkante und ihr Einfluss auf die Umformung des Schmiedeteils große Bedeutung für die Vorhersage des Umformergebnisses

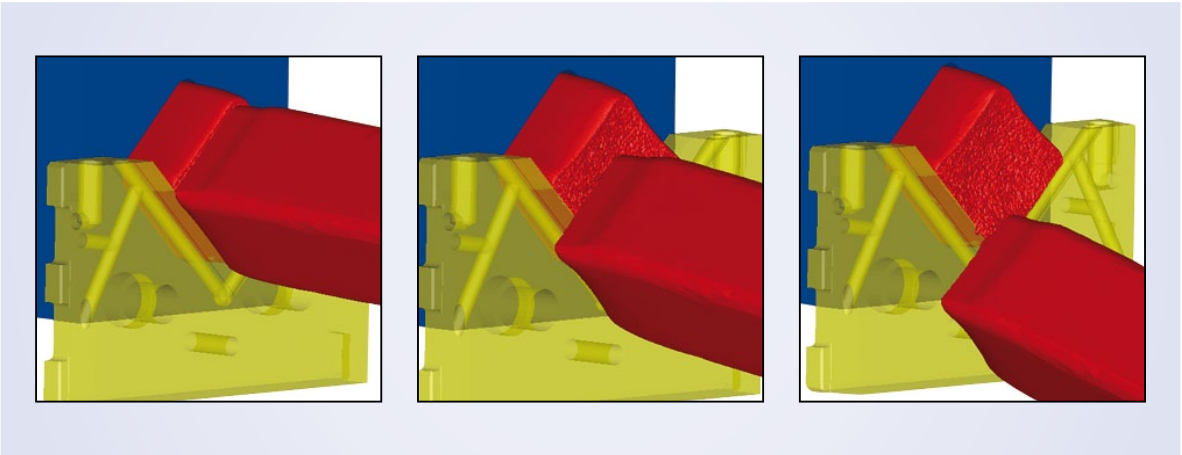


**Abbildung 4.8:** Bildfolge von der Simulation eines Abscherprozesses mit ausgeblendetem oberem Messer. Auffällig ist die Rauigkeit der simulierten Scherfläche

haben, sind weitere Verbesserungen bei den Simulationsansätzen wünschenswert.

## 4.4 Erwärmen

Das Erwärmen metallischer Werkstücke erfolgt in der Massivumformung vorrangig mit dem Ziel, deren Umformbarkeit zu steigern. Gleichzeitig werden dadurch die erforderliche Umformkraft sowie die Umformarbeit verringert und meist auch das Umformvermögen gesteigert. Für das Erwärmen vor dem Schmieden kommen i. d. R. die Verfahren „Wärmen in Öfen (Strahlung und Konvektion)", „Wärmen durch Wirbelströme (Induktion)" oder „Wärmen durch unmittelbaren Stromdurchgang (Konduktion)" zum Einsatz [LANG 2].

Bei der Schmiedesimulation wird den – durch den Erwärmungsprozess veränderten – Fließeigenschaften durch Zuweisung der werkstoffspezifischen, temperaturabhängigen Fließkurven Rechnung getragen. Für eine realitätsnahe Einstellung der Temperaturverteilung im Halbzeug nach induktiver Erwärmung werden in den Umformbetrieben – mit Rücksicht auf die angestrebte Genauigkeit der Simulationsergebnisse – vorzugsweise nachfolgende Ansätze verfolgt: a) Start ab erster Umformstufe mit homogener, leicht abgesenkter Temperatur; b) Start ab Induktionsanlage mit inhomogener Temperaturverteilung und Berücksichtigung der Transportzeit (thermische Verweilzeitsimulation) bis zur ersten Umformstufe – vgl. Abbildung 4.9. Als Datenbasis für letzteren Ansatz werden häufig Ergebnisse analytischer Berechnungsmethoden von Anlagenherstellern oder messtechnisch ermittelte Werte (z. B. unter Verwendung von Thermoelementen und/oder Pyrometern) herangezogen. Für die weiterführende Bewertung unterschiedlicher Erwärmungsstrategien haben zuletzt einzelne Softwarehersteller (in Kooperation mit Herstellern von Erwärmungsanlagen) geeignete Schnittstellen in ihre Programme implementiert, die eine Übernahme o. g. Zeit-/ Temperaturverläufe ermöglichen. Dadurch besteht zukünftig die Möglichkeit, auch das Umwandlungs- bzw. Auflösungsverhalten (z. B. Carbide bei 100Cr6) während des Erwärmungsprozesses zu analysieren und ggf. für eine nachfolgende Umformsimulation zu berücksichtigen. Des Weiteren erscheint erwähnenswert, dass nicht immer die zwingende Notwendigkeit besteht, eine durchgängige Erwärmung der Halbzeuge anzustreben. In einigen Fällen kann sich eine gezielte lokale Erwärmung – nicht nur für die Prozessführung, sondern auch für die Einstellung lokal unterschiedlicher Bauteileigenschaften – durchaus als vorteilhaft erweisen – so Wohlmuth et al. [WOHL 1].

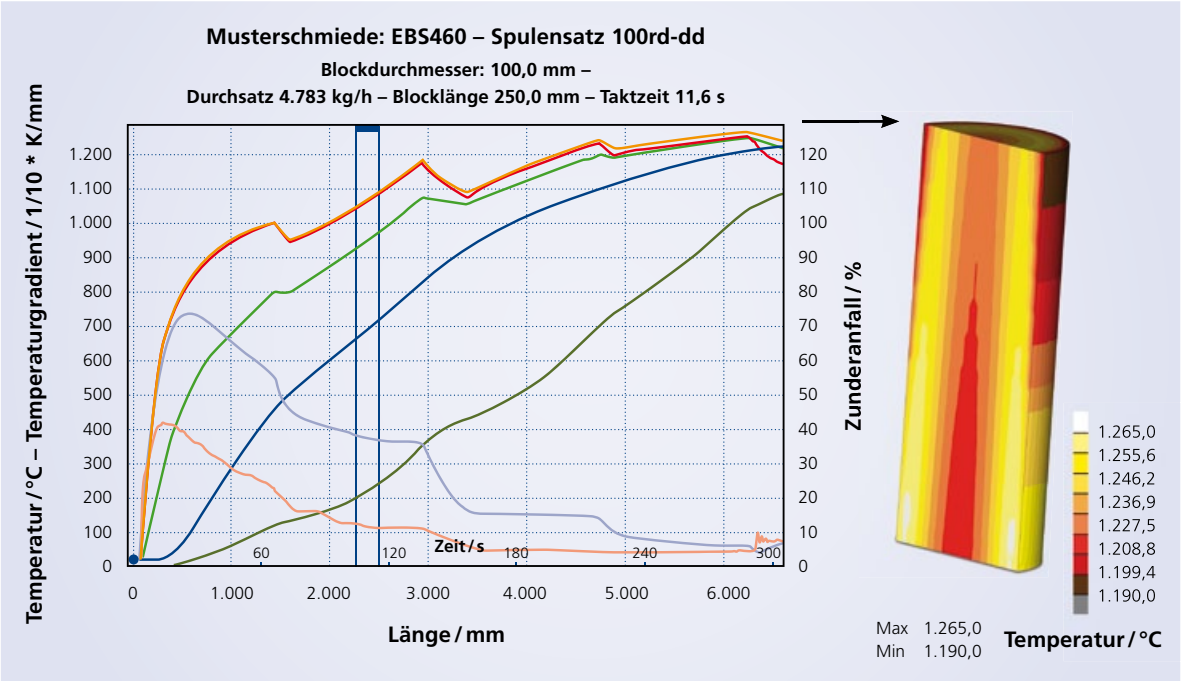



**Abbildung 4.9:** Inhomogene Temperaturverteilung nach der induktiven Erwärmung als Ausgangssituation für die Umformsimulation

# 4.5 Umformen

### 4.5.1 Entwicklung der Stufenfolge

Vor dem Hintergrund des zunehmend global ausgeprägten Wettbewerbs kommt der intelligenten Ausarbeitung einer fertigungstechnisch und kostenseitig optimalen Prozesskette zunehmende Bedeutung zu. Es werden immer häufiger anspruchsvolle, fertig bearbeitete Bauteile mit zugesicherten Eigenschaften seitens der Kunden angefragt. Um diesen stetig ansteigenden Anforderungen gerecht zu werden, setzen viele Betriebe der Massivumformung immer häufiger auf Werkzeuge zur virtuellen Auslegung und Abstimmung der Stufenfolgen. Nachfolgend berichten J. Heizmann und H.-W. Raedt [Heiz 1] von den Möglichkeiten des Einsatzes der FEM-Simulation bei diesem Prozessschritt.

Nachdem Werkstoff, Umformverfahren und Erwärmungstemperatur festgelegt wurden, bestand der Ausgangspunkt weiterer Überlegungen darin, einen am Bauteil – mit Rücksicht auf die spätere Belastung – optimalen Faserverlauf einzustellen. In diesem Zusammenhang soll auf das als „Faserstruktur" von Schmiedeteilen bezeichnete Phänomen verwiesen werden. Mit diesem Begriff wird die Tatsache beschrieben, dass die im Stahl vorhandenen Seigerungen bei den Umformprozessen, mit deren Hilfe aus einer Strangguss-Bramme einsatzbereites Schmiedevormaterial entsteht, faserförmig gestreckt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Faserstruktur erheblichen Einfluss auf die Haltbarkeit des Schmiedeteils hat. Bauteile, deren Faserstruktur in Richtung der Hauptbeanspruchungsrichtung verläuft, weisen beispielsweise eine deutlich höhere dynamische Festigkeit auf als solche, deren Faserverlauf quer zur Beanspruchung liegt. Moderne Simulationssysteme sind imstande, diesen Aspekt bei der Modellierung des Umformprozesses zu berücksichtigen. Somit kann sich der Massivumformer schon bei der Simulation einen Eindruck davon verschaffen, wie die Faserstruktur – bei einer bestimmten Orientierung des Rohlings vor dem Schmiedeprozess – dann im späteren Bauteil verlaufen wird (Abbildung 4.10). Diese Erkenntnis fließt wiederum im Rahmen der beanspruchungsangepassten Prozessauslegung in weitere Überlegungen zu den Einflüssen nachfolgender Bearbeitungsschritte (z. B. von spanabhebend zu bearbeitenden Flächen) ein.

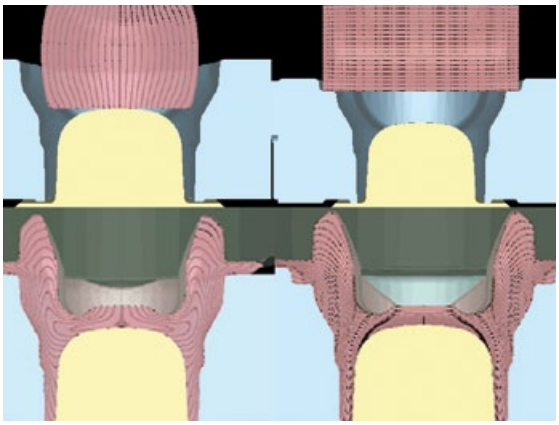


**Abbildung 4.10:** Faserverlauf bei stehender (links) bzw. bei liegender Schmiedung (rechts)

Auch die prozesssichere Füllung der Gesenkgravur in Kombination mit der zuverlässigen Vermeidung von Schmiedefehlern steht im Fokus und auch hier leistet die Simulation einen Beitrag dazu, schon frühzeitig ein unvorteilhaftes Füllverhalten bzw. eine unzureichende Ausfüllung der Gravur zu identifizieren und (z. B. durch Anpassungen von vorgelagerten Stufen) zu kompensieren. Ebenso lassen sich mit Hilfe der heute am Markt verfügbaren FEM-Programme Schmiedefehler (wie z. B. Faltenbildung) vorhersagen und die Eignung von Abstellmaßnahmen bewerten. An dieser Stelle haben Steigerungen in der Leistungsfähigkeit von Hard- und Software in den letzten Jahren enorm dazu beigetragen, dass mögliche Problembereiche rechtzeitig erkannt werden.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der Anwendung der Simulation im Zuge von Anstrengungen zur Reduzierung des Materialeinsatzes. Zumal insbesondere die Preise für Rohstoffe in den letzten Jahren einen enormen Anstieg verzeichneten, kommt dem Einsatzgewicht, d. h. den Maßnahmen zu dessen Einsparung im Zuge von Prozessoptimierungen, eine entscheidende Bedeutung zu.

### 4.5.2 Analyse werkzeugbedingter Fehler

Den erfolgreichen Einsatz eines Programms zur Umformsimulation bei der Ermittlung der Ursache von Maßabweichungen an einem Flansch beschreibt S. Binder [BIND 1]. Bei diesem Warmschmiedeteil stellte man nach der ersten Prototypenfertigung vor

allem im mittleren Bereich teils erhebliche Dickenabweichungen fest. An manchen Stellen wurde das Sollmaß um bis zu einem Millimeter überschritten. Bei der Suche nach der Ursache entschied man sich zunächst dafür, die gesamte Gesenkgeometrie im Messraum zu überprüfen. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass die Abweichungen der beiden Gesenkhälften von der Sollgeometrie bei lediglich wenigen Hundertstel Millimetern lagen. Auch eine Überprüfung der thermischen Einflüsse auf das Schrumpfverhalten ergab keine gravierenden Abweichungen.

Im nächsten Schritt wurde eine Simulation durchgeführt, die nicht nur die Stoffflussanalyse umfasste, sondern darüber hinaus auch die Werkzeugbeanspruchung einbezog (Abbildung 4.11), da ein mögliches „Ausweichen" der Werkzeuge vermutet wurde. Mit Hilfe dieser erweiterten Simulation konnte dann schnell festgestellt werden, dass es beim Umformprozess zu Werkzeugdeformationen durch klassische Einfederungsmechanismen kam. Im konkreten Fall kam es nicht nur zur Durchbiegung einer Gesenkhälfte: Hauptursache war der Kern des Obergesenks (Abbildung 4.12), der beim Schmiedevorgang um bis zu einen Millimeter gestaucht wurde. Dabei handelte es sich nicht etwa um bleibende plastische Deformationen, sondern um eine elastische Reaktion, in deren Verlauf die Werkzeuge nach jedem Hub wieder in die Ausgangsform zurückkehrten. Nachdem dies erkannt worden war, konnten mit Hilfe der Simulation entsprechende Korrekturen der Werkzeuggeometrie vorgenommen werden. Nachdem Versuche mit den korrigierten Werkzeugen positive Ergebnisse erbrachten, konnte das Projekt für die Serienfertigung freigegeben werden.

### 4.5.3 Abgraten / Lochen und Prägen / Kalibrieren

Von der Motivation für die Durchführung von Berechnungen zu den Prozessschritten Abgraten/Lochen und Prägen/Kalibrieren berichten H.-J. Britzger et al. [BRIT 1]. Diese Arbeitsgänge schließen bei Warmumformprozessen häufig unmittelbar an den letzten Hauptumformschritt an. Abgraten unterscheidet sich vom Lochen dadurch, dass Materialüberschuss (d. h. der Grat) außerhalb der Aktivgeometrie entfernt wird. Hierbei wird das Bauteil mittels eines Stempels durch eine Schneidplatte gedrückt. Beim Lochen erfolgt demgegenüber ein Heraustrennen des Materialüberschusses aus dem Inneren des Bauteils mit Hilfe eines Schneidstempels.

Die Simulation des Abgraten/Lochen hat mittlerweile in das Standard-Repertoire der Umformsimulation Einzug gefunden. Grundsätzlich gelten aus Simulationssicht für Abgraten/Lochen die gleichen Randbedingungen wie für den in Unterkapitel 4.3 beschriebenen Prozessschritt „Trennen". Des Weiteren ist für die Simulation dieser Operationen mit vergleichbarer Komplexität zu rechnen. Dennoch kommt dem Abgraten/Lochen eine andere Bedeutung als dem Trennen zu, da diese finalen Umformoperationen eine unerwünschte Deformation der Bauteile hervorrufen können. Dies kann wiederum zu Abweichungen von vorgegebenen Toleranzen

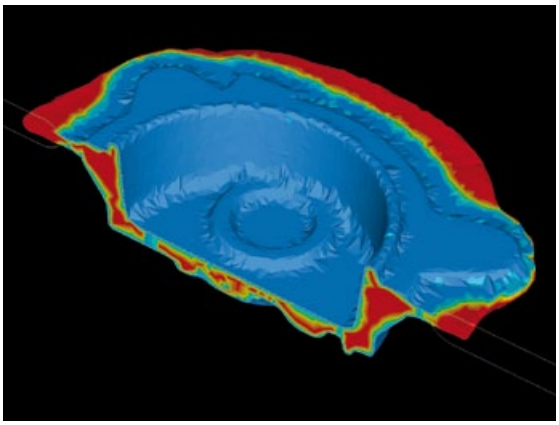


**Abbildung 4.11:** Erst mit Hilfe der erweiterten Simulation konnte festgestellt werden, dass es beim Umformprozess zu Werkzeugdeformationen durch klassische Rückfederungsmechanismen kam

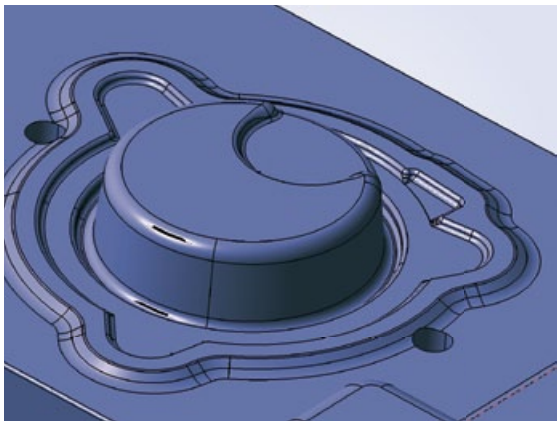


**Abbildung 4.12:** Hauptursache des Problems war der Kern des Obergesenks, der beim Schmiedevorgang um bis zu einen Millimeter elastisch gestaucht wurde

nebst unerwünschter mechanischer Nachbearbeitung bis hin zu nicht korrigierbaren geometrischen Fehlern führen. An dieser Stelle eröffnet die Simulation die Möglichkeit, dass der Konstrukteur durch geeignete Maßnahmen bereits in der Konstruktionsphase Probleme reduzieren kann, wie sie für diese Prozessschritte typisch sind. Darüber hinaus leistet die Simulation einen Beitrag dazu, das Eingreifen und die Wirkweise der Werkzeuge besser zu verstehen. Ferner rechtfertigt sich der zusätzliche Aufwand durch die genauere Abbildung der Prozesskette bzw. mehrerer aufeinanderfolgender Teilglieder. Die Genauigkeitssteigerung lässt sich dabei auf die Generierung korrekter Geometrien und/oder realistischer Temperaturprofile für die Berechnung von Folgeoperationen zurückführen. Ein derartiger Anwendungsfall entsteht beispielsweise, wenn an die Untersuchung des Umformprozesses noch eine Analyse der Wärmebehandlung anschließt – vgl. Abbildung 4.13.

Beim Prägen/Kalibrieren wird grundsätzlich zwischen Umformung des Werkstücks bei Schmiede- (Warmkalibrieren) und bei Raumtemperatur (Kaltkalibrieren) unterschieden. Warmkalibrieren wird häufig zum Einengen von Maßen bzw. zur Verbesserung der Form- und Lagegenauigkeit durchgeführt und lässt keine dauerhafte Veränderung der Spannungsverteilung im Bauteil erwarten. Kaltkalibrieren wird vorzugsweise an ausgewählten Flächen vorgenommen. Dabei wird eine Steigerung der Maßhaltigkeit, Oberflächengüte und/oder Form- und Lagegenauigkeit angestrebt. Mit dem Kalibrieren sind aufgrund lokal wirkender Umformkräfte häufig hohe Spannungen und merkliche Dehnungen der Werkzeuge verbunden. Ferner lassen sich durch gezielte Kaltverfestigung (welche mit dem Kaltkalibrieren einhergeht) lokale Festigkeitssteigerungen im Bereich der Bauteiloberfläche realisieren.

Die Simulation von Präge-/Kalibrieroperationen erfolgt vor dem Hintergrund, wichtige Erkenntnisse über Wechselwirkungen zwischen Bauteil und Werkzeugkonzept zu erlangen. Hier trägt die Kalibriersimulation einerseits dazu bei, die Präzision der finalen Werkstückgeometrie bzw. die Realisierung filigraner geometrischer Details vorab am Rechner abzusichern. Andererseits ermöglicht die Simulation dem Massivumformer, die Standmenge der Kalibrierwerkzeuge zu erhöhen. Darüber hinaus leistet die Simulation einen wichtigen Beitrag bei der Abschätzung der erforderlichen Kaltverfestigung, wenn an der Bauteiloberfläche lokal höhere Festigkeiten eingestellt werden müssen.

## 4.6 Spanabhebende Bearbeitung von Schmiedeteilen

Die Einflüsse auf die Zerspanbarkeit von Schmiedewerkstoffen sind vielfältig. Sie erstrecken sich ausgehend von der Schmelzenführung über die chemische Zusammensetzung und den Umformprozess bis hin zur Wärmebehandlung. Die Beurteilung der Zerspanbarkeit eines Werkstoffs erfolgt häufig

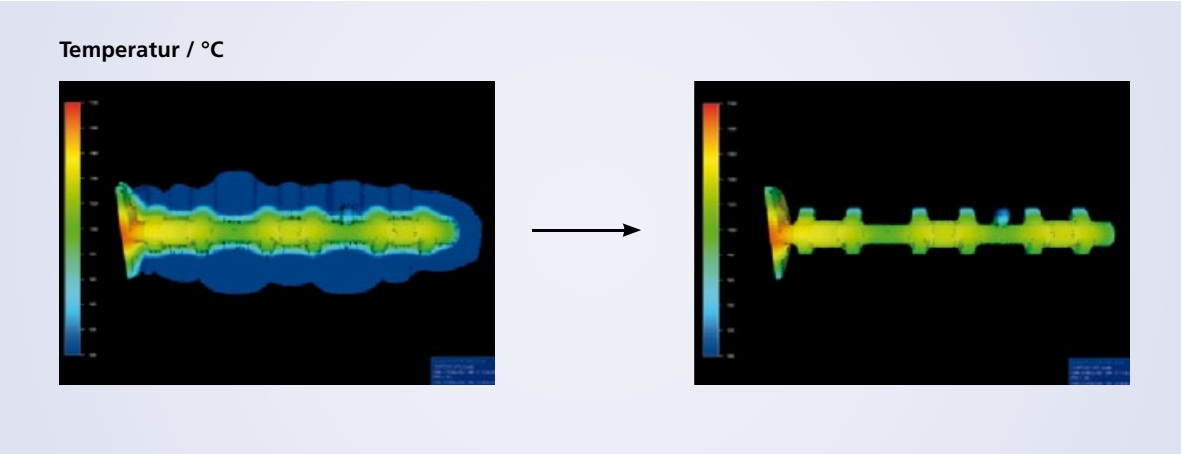



**Abbildung 4.13:** Simulation des Abgratens als Ausgangsbasis für die nachfolgende thermische Berechnung

anhand der Kriterien „Werkzeugverschleiß“, „Zerspankräfte“, „Spanform“ und „Oberflächengüte“.

In den Unternehmen der Massivumformung werden i. d. R. keine simulationsbasierten Untersuchungen zur Beeinflussung der nur schwer zu beeinflussenden Problematik der Spanform durchgeführt. Diesbezügliche Auswertungen erfolgen eher auf praktischer Basis (z. B. Beurteilung unterschiedlicher sogenannter „Spanbrecher“). Demgegenüber ist die Bewertung unterschiedlicher Spann- und Anschlagkonzepte durchaus Gegenstand von simulationsgestützten Analysen – so G. Triesch et al. [TRI 1]. Hierbei erfolgt typischerweise eine Bewertung der Verformung von Bauteilen unter Verwendung unterschiedlicher Spannsysteme und/oder -kräfte (Abbildung 4.14).

Des Weiteren zeichnen sich Schmiedeteile u. a. durch ihre überragenden dynamischen Bauteileigenschaften aus. An dieser Stelle kommt neben der Bauteilfestigkeit und der Einstellung des Faserverlaufs auch den Eigenspannungen im Bauteil bzw. an der Bauteiloberfläche nach der Zerspanung besondere Bedeutung zu. Der Erfolg unterschiedlicher Maßnahmen kann wiederum unter Anwendung von Simulationsmethoden bewertet werden. So lässt sich beispielsweise der Einfluss unterschiedlicher Temperaturprofile im Bauteil bei der Umformung und ggf. der Zerspanoperationen auf das Warmbehandlungsergebnis qualitativ auswerten.

## 4.7 Wärmebehandlung

Von dem zunehmendem Kenntnisstand über die potenziellen Einflüsse und deren Auswirkungen auf den Werkstoffzustand wärmebehandelter Bauteile profitierten in den letzten Jahren auch die kommerziellen Programme für die Simulation von Wärmebehandlungen – so K. Heeß et al. [HEES 1]. Diese Fortschritte eröffnen für Verfahrensentwicklungen im Bereich der Wärmebehandlung die Möglichkeit, zukünftig bereits am Simulationsrechner erste Abschätzungen zur Prozessführung zu treffen. Zusätzlich lässt sich auf Basis realitätsnaher Eingabeparameter großes Potenzial im Bereich der Prozessoptimierung heben. Simulation eignet sich grundsätzlich zum Aufzeigen von Tendenzen, für Parameterstudien und Einflussanalysen sowie zur deutlichen Verbesserung des Prozessverständnisses der bei der Wärmebehandlung ablaufenden stark gekoppelten Prozesse. Dafür müssen zur numerischen Simulation die zeitlichen und örtlichen Entwicklungen der Temperaturen, der Gefügeumwandlungen, der Deformationen und Spannungen sowie die dabei auftretenden Wechselwirkungen rechnerisch erfasst werden – wie in Abbildung 4.15 schematisch am Beispiel des Härtens von Stahlbauteilen dargestellt.

### 4.7.1 Vergüten

Von Simulationsanwendung im Rahmen der Identifikation von Schwächen bei der Auslegung eines Vergütungsprozesses berichtet O. Oehler [OEHL 1].

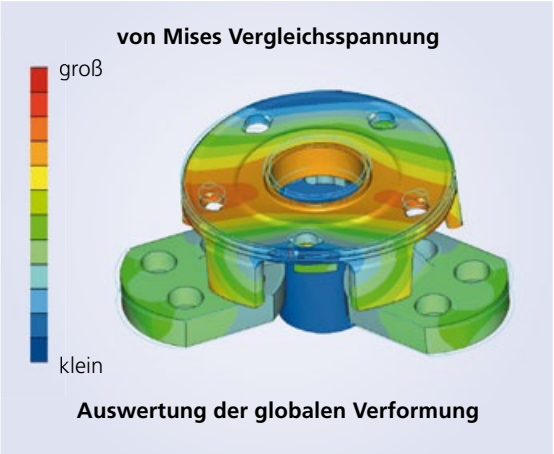



**Abbildung 4.14:** Einfluss des Spannkonzepts auf die Verformung filigraner Bauteile bei spanabhebender Bearbeitung

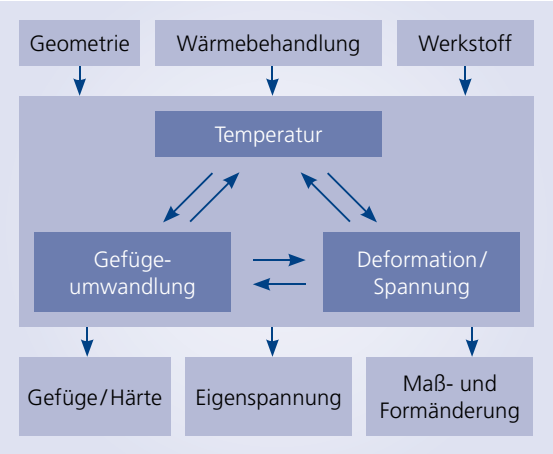



**Abbildung 4.15:** Ein- und Ausgabedaten sowie Teilprozesse mit Wechselwirkungen bei der Simulation von Wärmebehandlungsprozessen

Die Aufmerksamkeit galt dabei insbesondere dem Prozessschritt „Härten“. Dazu wurde das Verhalten eines kaltfließgepressten Bauteils während des Abschreckens im Medium Öl untersucht, da einzelne Teile aufgrund von Härtespannungsrissen ausfielen. Die Auswertung der Simulation bestätigte, dass das Bauteil am dünnsten Querschnitt am schnellsten abkühlte, sodass dabei lokal die Martensit-Starttemperatur unterschritten wurde. Dies führte dazu, dass die Mikrostruktur in diesem Bereich schon weitgehend martensitisch umgewandelt war während der übrige Bauteilbereich noch austenitisch geprägt war. Gleichzeitig konnten aufgrund des Volumensprungs im Zuge der Umwandlung von Austenit nach Martensit, Zugspannungen (>260 MPa) am Übergang dieses Bereichs zu einem deutlich größeren Querschnittsbereich beobachtet werden – vgl. Abbildung 4.16. Diese Zugspannungen wurden als kritisch betrachtet, zumal sie bei Temperaturen von ca. 340 °C auftraten (Martensit-Starttemperatur „Ms“). Die in diesem kritischen Bereich auftretenden Spannungsgradienten konnten durch geometrische Anpassung der Querschnittsübergänge entschärft werden, was zu einer deutlichen Absenkung des Ausschussanteils führte. Für Variantenteile konnten diese Erkenntnisse direkt in die Bauteilauslegung einfließen.

### 4.7.2 Einsatzhärten

Von einem konkreten Anwendungsfall der Simulation auf das Einsatzhärten – im Zuge der Herstellung von Eingangsnaben für Doppelkupplungsgetriebe – berichten O. Oehler [OEHL 2], M. Herrmann und M. Fiderer [HERR 1]. Die Aufmerksamkeit galt dabei dem

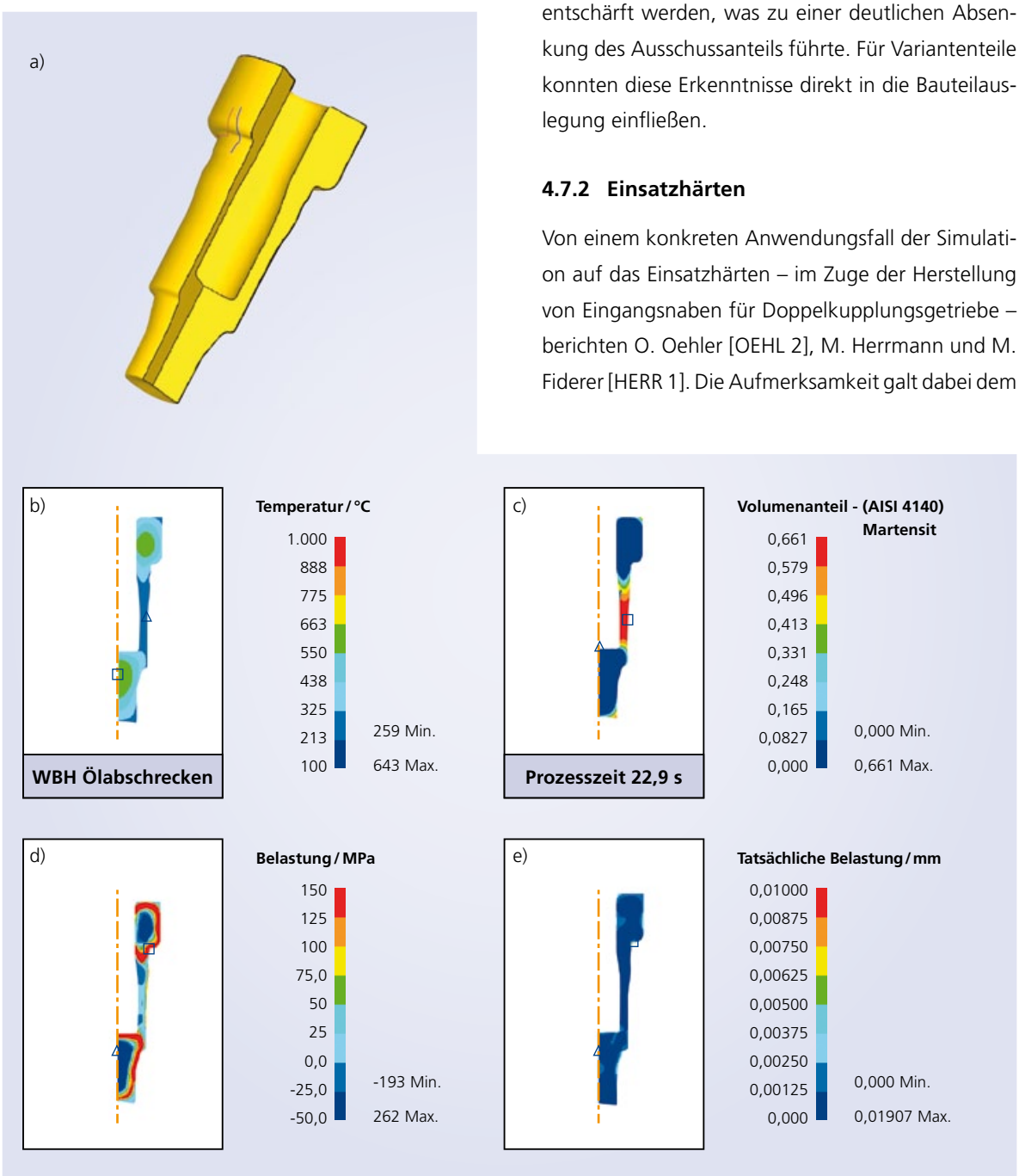



**Abbildung 4.16:** Versagensort (a), Temperaturverteilung (b), Martensitanteil (c), 1. Hauptnormalspannung (d) und Vergleichsumformgrad (e) während des Abschreckvorgangs

zentralen Element des Bauteils, einer präzisionsumgeformten Verzahnung. Diese durchläuft im Rahmen des Einsatzhärtens einen Abschreckvorgang. Die Problematik bestand darin, dass die Teile im Anschluss an diesen Prozessschritt eine Abweichung zur Sollgeometrie von ca. 25 µm (Hohlballigkeit im Zweikugelmaß) über die gesamte Verzahnungslänge aufwiesen. Trotz mehrerer Praxisversuche in Form von Variationen der Wärmebehandlung konnte zunächst kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. In Verbindung mit nachfolgenden Untersuchungen per Simulation konzentrierte man sich auf den Aufbau eines verbesserten Prozessverständnisses. Auf dieser Basis wurden wiederum neue Lösungsansätze generiert. Zur virtuellen Abbildung der Vorgänge im Bauteil war eine Verkettung von Umform- und Wärmebehandlungssimulation erforderlich. Deren wesentliche Merkmale lagen in der Übernahme von Eigenspannungen aus dem Prozessschritt „Verzahnungspressen" sowie in der Initialisierung des Umformgrades nach Erreichen der Austenitisierungstemperatur. Abschließend erscheint erwähnenswert, dass zur Bewertung der Qualität von Simulationsergebnissen im Bereich der Wärmebehandlung häufig die Bauteilhärte herangezogen wird: Im untersuchten Fall konnte zwischen dem real gemessenen und dem in der Simulation visualisierten Härteverlauf eine gute Übereinstimmung identifiziert werden – vgl. Abbildung 4.17.

### 4.7.3 Induktivhärten

Das Induktivhärten einer Kurbelwelle ist Thema einer Untersuchung durch D. Cardinaux et al. [CARD 1]. In der Praxis geht es hierbei um die gezielte Einstellung von Gradienten der mechanischen Eigenschaften im Bauteil durch lokale induktive Erwärmung mit nachfolgender Abschreckung in Wasser. Hierdurch wird die Oberfläche in den gewünschten Bereichen bis zu einer definierten Tiefe aufgehärtet. Die Folge sind verbesserte Gebrauchseigenschaften mit Blick auf Dauerfestigkeit und Verschleiß.

Die Modellierung des Vorgangs erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe umfasst die induktive Erwärmung des Bauteils bis zur vollständigen Austenitisierung der gewünschten Bereiche. Die zweite Stufe der Modellierung betrifft den Abschreckvorgang.

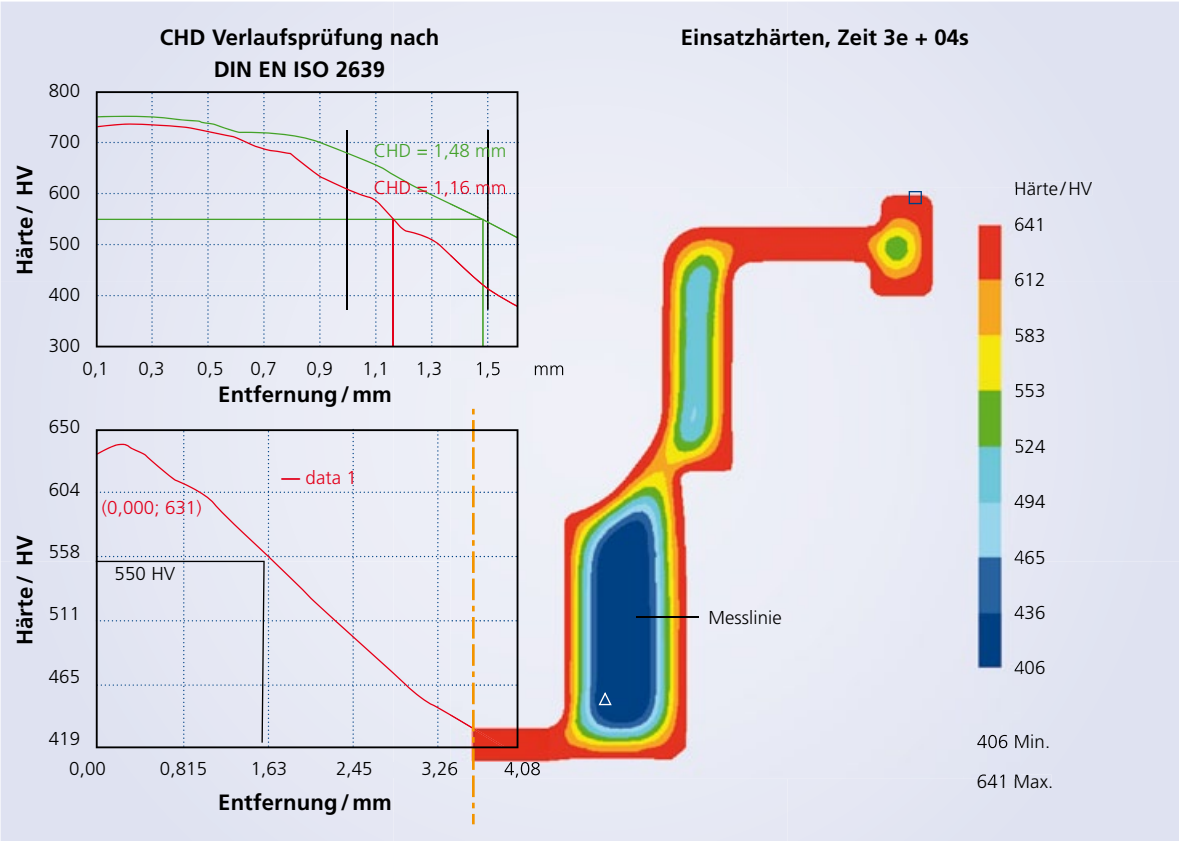



**Abbildung 4.17:** Vergleich des Verlaufs der Einhärtungstiefe CHD zwischen Realbauteil (Diagramm oben) und Simulation (Diagramm unten)

Bei der Entwicklung eines geeigneten Finite-Elemente-Modells zur Beschreibung der lokalen Abschreckung müssen zahlreiche gekoppelte physikalische Abläufe aus den Bereichen Elektromagnetismus, Wärmeleitung, mechanische Eigenschaften sowie metallurgischer Vorgänge berücksichtigt werden.

Nach Erstellung geeigneter mathematischer Modelle mussten noch die räumliche Diskretisierung sowie die zeitliche Integration festgelegt werden. Für die Bereiche Wärmeaustausch, Mechanik und Metallurgie kamen lineare Tetraeder zum Einsatz, während die Beschreibung der elektromagnetischen Vorgänge mit Hilfe von Nedelec-FEM-Elementen erfolgte. Die für eine Automobil-Kurbelwelle errechneten Ergebnisse zeigt Abbildung 4.18.

## 4.8 Oberflächennachbehandlung

Die Oberflächen von Schmiedeteilen werden meist zur Reinigung nachbehandelt. Häufig werden aber auch Nachbehandlungen zur Steigerung der Dauerschwingfestigkeit oder zum Schutz der Oberflächen durchgeführt. Im Rahmen der Oberflächenreinigung wird dabei die im Zuge der Warmumformung oder Wärmebehandlung an der Bauteiloberfläche entstehende Oxidschicht entfernt. Dies erfolgt i. d. R. durch Strahlen, Rommeln oder Beizen. Nicht nur Konstruktion, Werkstoff und Wärmebehandlung beeinflussen die Dauerschwingfestigkeit von dynamisch beanspruchten Bauteilen, sondern insbesondere auch der Zustand der Oberfläche hat einen entscheidenden Einfluss – zumal die höchsten Beanspruchungen häufig in der Bauteiloberfläche auftreten. Für eine wesentliche Steigerung der dynamischen Kennwerte eignen sich sowohl Wärmebehandlungsverfahren (z. B. Nitrieren) als auch Oberflächenverfestigungsverfahren (z. B. Festrollen oder Festigkeitsstrahlen). Ein Schutz metallisch reiner Oberflächen gegen chemische Veränderungen (z. B. Rosten) bzw. eingeschränkt auch gegen mechanische Beschädigungen lässt sich durch Beschichten oder durch elektrolytische und chemische Abscheidungen erreichen – so W. Adlof et al. [ADL 1].

Die Wirkung des festigkeitssteigernden Rollens beruht auf der Verfestigung der Oberflächenrandzone und der Bildung von Druckeigenspannungen. Durch

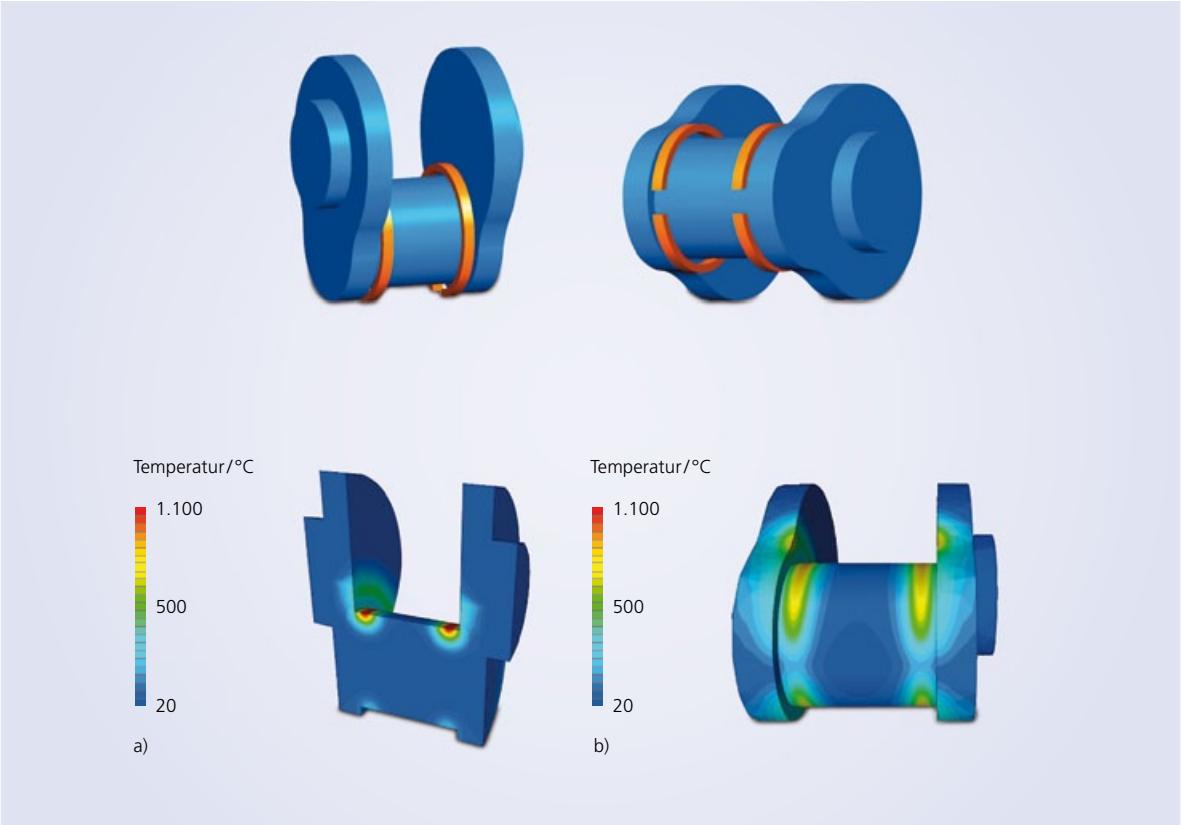



**Abbildung 4.18:** Induktive Erwärmung einer Kurbelwelle mit Hilfe von zwei Spulen (orange) und die Simulation der sich nach 15 s ergebenden Temperaturverteilung im Inneren (a) sowie an der Oberfläche (b)

Rollen von spannungskritischen Übergangsradien lässt sich beispielsweise die Lebensdauer von Fahrwerksbauteilen oftmals deutlich stärker anheben, als dies durch eine Erhöhung der Streckgrenze möglich wäre. Im Zuge des Festigkeitsstrahlens werden dünne Oberflächenzonen kaltverfestigt und zugleich Druckeigenspannungen erzeugt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Parametereinstellungen bei der Anwendung dieser festigkeitssteigernden Mechanismen werden häufig mit Hilfe der Simulation untersucht (Abbildung 4.19). Beim Festwalzen wird beispielsweise der Anpressdruck des Walzwerkzeugs oder die Abstände zwischen den überwalzten Zeilen variiert – so J. Heizmann [HEIZ 2].

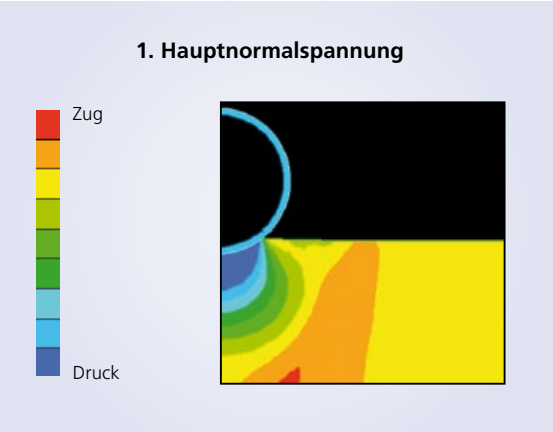



**Abbildung 4.19:** Einfluss von Durchmesser und Aufprallgeschwindigkeit von Strahlkugeln auf die Spannungsverteilung in der Bauteiloberfläche

# 5 Weiterentwicklung der Simulation

## 5.1 Entwicklungstrends

Mit den aktuell laufenden Entwicklungen im Bereich der Simulation in der Massivumformung beschäftigen sich insbesondere Autoren aus dem Kreis der Anbieter entsprechender Softwarelösungen [WOHL 2], [PERE 1], [DUCL1], [WALT 1], [DOKT 1], [TWIC 1], [VLAS 1]. Die folgenden Abschnitte sollen einen zusammenfassenden Überblick über die wichtigsten Trends auf diesem Gebiet geben. Die wichtigsten Forderungen des Markts an die Anbieter von Simulationssoftware sind vor allem:

- Höhere Genauigkeit der Ergebnisse,
- Modellierung der Werkzeug- und Maschineninteraktion,
- Simulation der gesamten Prozesskette,
- Vorhersage von Bauteileigenschaften auf Basis von Modellen der mikroskopischen Gefügeentwicklung,
- Minimierung von Rechenzeiten,
- Automatische Optimierung von Fertigungskonzepten,
- Einsatz von Expertensystemen.

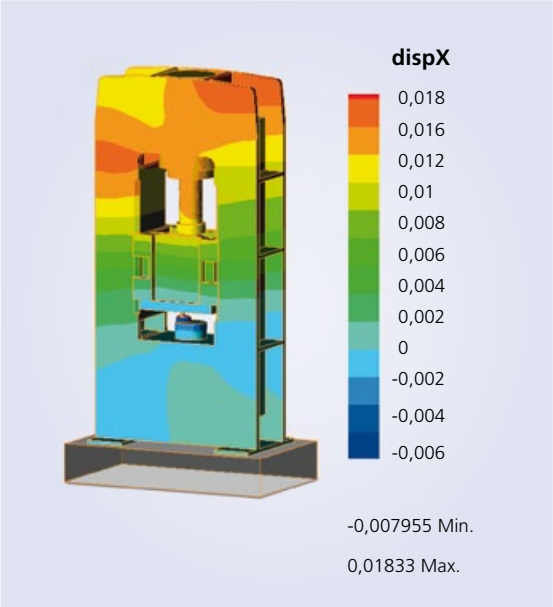



**Abbildung 5.1:** Horizontale Verformung des Rahmens einer Schmiedepresse aufgrund einer außermittigen Anordnung des Gesenks

### 5.1.1 Höhere Genauigkeit der Berechnungsergebnisse

Mit der Steigerung der Qualität der Ergebnisse von FEM-Berechnungen beschäftigen sich alle Entwickler mit hoher Priorität. Dabei geht es u. a. um verbesserte Elementformulierungen, aber auch um die Überarbeitung physikalischer Modelle zur Beschreibung der Prozessparameter. Darüber hinaus stehen auch neue Ansätze für die Weiterentwicklung von Versagensmechanismen – sowohl für Werkzeuge als auch für Werkstücke – auf dem Programm. Des Weiteren beschäftigt man sich intensiv mit den Prozessen in der „Wirkfuge“ zwischen Werkstück und Werkzeug mit dem Ziel, das entsprechende tribologische System zu modellieren und durch Simulation zu optimieren.

### 5.1.2 Modellierung der Wechselwirkung von Werkzeugen und Maschinen

Von großer Bedeutung sind Arbeiten zur Erweiterung der Umformsimulation um Modelle für die Berücksichtigung der Interaktion zwischen Umformmaschine und Werkzeug. Ein sehr wichtiger Aspekt ist hierbei die konsequente Berücksichtigung elastischer Effekte im Prozess, da diese einen signifikanten Einfluss ausüben. Zur Gesamtelastizität gehören die Elastizitäten des Werkstücks, der Werkzeuge sowie der Maschine. Während die Berücksichtigung der ersteren mittlerweile als Standard angesehen werden kann, gestaltet sich die Modellierung elastischer Werkzeuge bisher – zumindest in 3D – in der Praxis deutlich anspruchsvoller. Hauptgründe sind die komplexen Simulationsmodelle mit ihrem „multi-body-contact“ sowohl zwischen Werkstück und Werkzeugen als auch – vor allem bei anspruchsvollen Armierungsverbänden beispielsweise in der Kaltumformung – zwischen den einzelnen Werkzeugkomponenten.

Haupthindernisse für eine breitere Anwendung sind enorm hohe Rechenzeiten sowie große Herausforderungen an die numerische Stabilität der Modelle. Verschärft wird die Situation noch dadurch, dass es für ein hochpräzises Simulationsergebnis häufig erforderlich ist, Federn, die ggf. in einem Werkzeug-

aufbau vorgesehen sind, realitätsnah auch im Simulationsmodell abzubilden. Wichtig ist hierbei, dass die Modellierung sämtlicher Varianten unterschiedlicher Federtypen und Federn-Konzepte möglichst anwenderfreundlich realisiert wird.

Kritischer Faktor ist zudem nach wie vor die Berücksichtigung der Elastizität der gesamten Maschine (Abbildung 5.1), insbesondere bei Mehrstufenpressen, deren Kippungsverhalten ebenfalls abgebildet werden muss. Hierfür gibt es unterschiedliche Modelle, die im Allgemeinen in Form von Ersatz-Federsteifigkeiten abgebildet werden. Probleme bereitet hierbei insbesondere die Ermittlung der zur Abbildung des jeweiligen Maschinenverhaltens notwendigen Parameter (z. B. Kippsteifigkeit) bzw. deren Bereitstellung durch die Maschinenhersteller. Die Softwarehersteller arbeiten auch an der Berücksichtigung von Führungsspielen z. B. zwischen Stößel und Stößelführung.

Ein wichtiger Schritt in Richtung der Abbildung eines realistischen Maschinenverhaltens ist auch die korrekte Abbildung der Kinematik, die erfahrungsgemäß einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisgüte einer Prozesssimulation hat. Wurden in den vergangenen Jahren bei der Beschreibung der Kinematik z. T. Teil noch extreme Vereinfachungen vorgenommen, so können heute bereits zahlreiche Kinematiken mit guter Genauigkeit abgebildet werden. Leistungsstarke Simulationssysteme berücksichtigen mittlerweile selbst die prozessabhängige Steuerung der Fertigung, z. B. beim Ringwalzen oder Freiform- und Radialschmieden.

### 5.1.3 Simulation der gesamten Prozesskette

Die Integration der einzelnen Simulationen der verschiedenen Fertigungsverfahren entlang der Prozesskette gehört zu den vorrangigen Forderungen des Markts. Dabei werden die prozessbedingten Eigenschaften einer Fertigungsoperation jeweils dem nachfolgenden Prozessschritt mit übergeben. Dadurch könnten beispielsweise die Daten eines kaltverfestigten Bauteils in eine abschließende Strukturanalyse zurückgeführt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Simulation eines Freiformschmiedeprozesses, die auf den Ergebnissen einer Gießsimulation bei der Herstellung des Schmiederohlings aufbaut und deren Daten wiederum der nachgeschalteten Zerspanung sowie der abschließenden Wärmebehandlung zufließen. Von Interesse sind solche Simulationen auch, wenn es um die Auswirkungen von umwandlungsbedingten Eigenspannungen nach Massivumformung und Wärmebehandlung auf die Verformung des Bauteils nach spanabhebender Bearbeitung geht (Abbildung 5.2).

Bei der Simulation kompletter Prozessketten sind mehrere Herausforderungen zu bewältigen. So müssen Daten und Parameter von einem Simulationsmodell zum nächsten übergeben werden, wofür leistungsstarke Mapping-Algorithmen gefragt sind. Dabei ist zu beachten, dass die Daten auf teilweise völlig unterschiedliche Netztopologien übertragen werden müssen, weil die verschiedenen Systeme

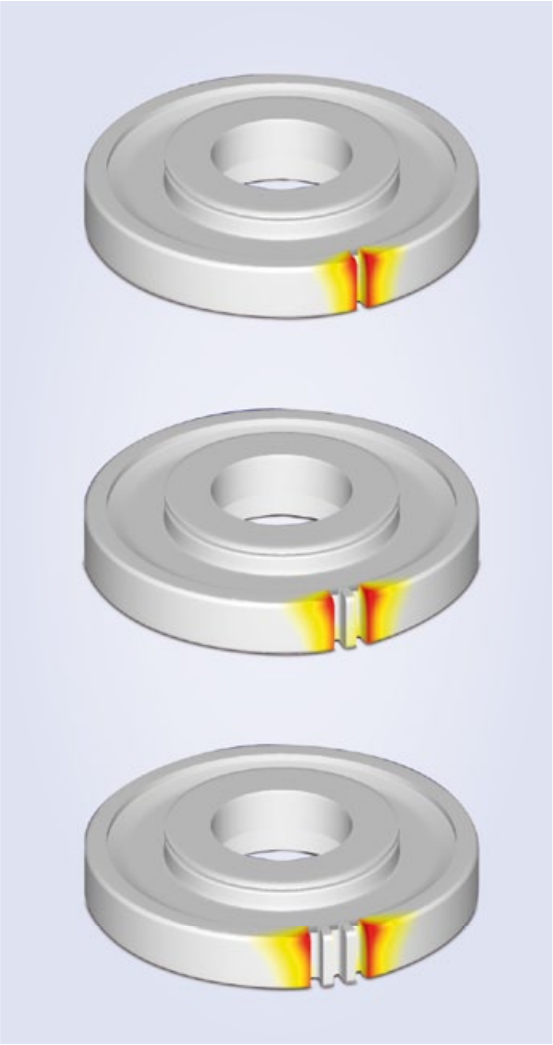


**Abbildung 5.2:** Verformung einer massivumgeformten Scheibe beim Räumen von Nuten im Scheibenkranz. Nach jedem Bearbeitungsgang verändern sich die Spannungsfelder und damit die Verformungsmuster

zur Prozesssimulation – wie Umformen, Schweißen, Crashtest oder Strukturanalyse – oft vollständig unterschiedliche Netze und Elementtypen verwenden. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Frage, welche Daten überhaupt übertragen werden müssen, d. h. welche Relevanz sie für den nachfolgenden Prozessschritt haben. Hier stehen die Softwareentwickler noch vor zahlreichen Herausforderungen.

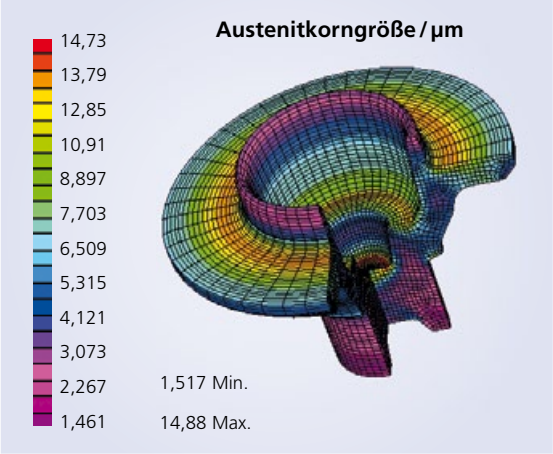



**Abbildung 5.3:** Aus der Simulation der Versetzungsdichte abgeleitete Analyse der im Schmiedeteil resultierenden Korngrößenverteilung

### 5.1.4 Vorhersage von Bauteileigenschaften

Neben den klassischen Ergebnisgrößen der Umformsimulation wie Stofffluss, Kraftbedarf, Verteilung der Spannungen sowie des Umformgrads und der Werkzeugbelastung rückt bei den Anwendern auch die konkrete Vorhersage der Bauteileigenschaften zunehmend ins Blickfeld. Hier besteht vor allem Interesse an mechanischen Eigenschaften wie Härte- und Festigkeitsverteilung bis hin zu Kerbschlagzähigkeit oder auch Dauerfestigkeit. Letztendlich lassen sich diese Eigenschaften auf die im Bauteil vorliegende Gefügezusammensetzung und die Verteilung der einzelnen metallurgischen Phasen zurückführen, sodass diese Größen sowohl im Verlauf der Simulation des Umformprozesses als auch der nachgelagerten Wärmebehandlungen mit be-

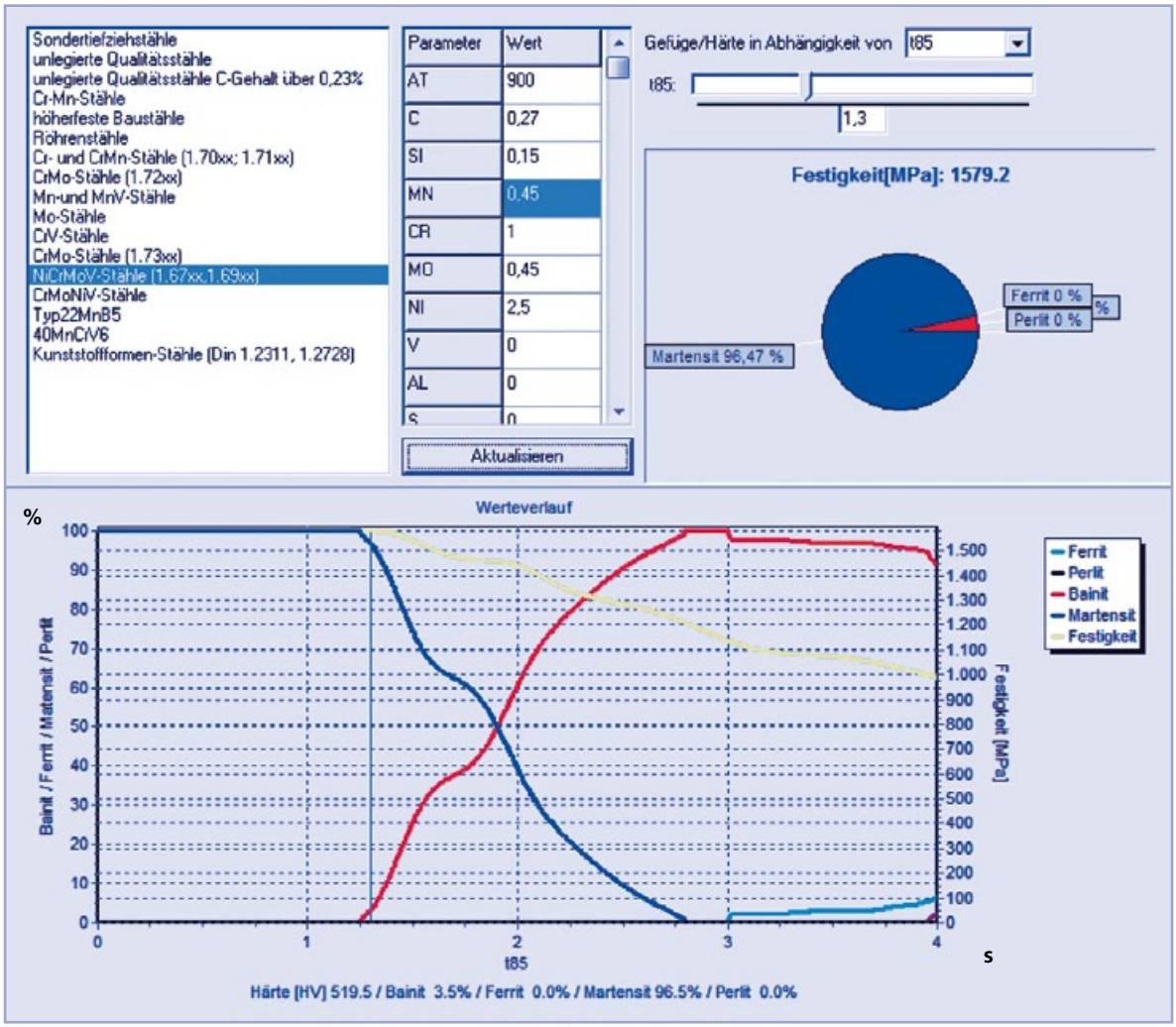



**Abbildung 5.4:** Gefügemengenschaubild für einen NiCrMo-Stahl mit 0,27 % C, 1 % Cr und 2,5 % Ni

rechnet werden müssen. Hierfür werden Modellierungen auf mikroskopischer Ebene benötigt, welche Mechanismen wie Versetzungsreaktionen, Rekristallisation, Ausscheidungsbildung und Gefügeumwandlung berücksichtigen. Für die Simulation der dynamischen und statischen Rekristallisation existieren bereits entsprechende Gefügemodelle, die intensiv weiterentwickelt werden (Abbildung 5.3). Beim Warmumformen hat diese Ermittlung der Gefügeausbildung und der entsprechenden Eigenschaften durch Simulation bereits eine längere Tradition, beispielsweise beim Freiformschmieden großer Generatorwellen, wo die Simulation der Phasenumwandlung auf der Basis von ZTU-Schaubildern bereits etabliert ist.

Andere Ansätze beruhen auf der Modellierung mit Hilfe neuronaler Netze, die nach ihrer Konfiguration zunächst trainiert werden müssen. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Phase besteht die Möglichkeit, die zu erwartende Gefügeausbildung verschiedener Stahlzusammensetzungen in kürzester Zeit abzuschätzen (Abbildung 5.4). Auch Inhomogenitäten, wie sie in Schmiedeblöcken vorkommen, könnten lokal mit berücksichtigt werden.

### 5.1.5 Minimierung von Rechenzeiten

Die Rechenzeiten bleiben weiterhin ein kritischer Faktor. Zwar nimmt die Leistung moderner Computersysteme nach wie vor rapide zu, doch steigt auf der anderen Seite der Rechenbedarf moderner Simulationswerkzeuge aufgrund der zunehmenden Ansprüche an Leistungsbandbreite und Ergebnisqualität ebenfalls rasant an, sodass sich beide Faktoren gegenseitig tendenziell ausgleichen. Als wichtigster Schritt aus diesem Patt erweist sich die Steigerung der Rechengeschwindigkeit durch eine Parallelisierung der Berechnungsmodelle, damit mehrere Rechner parallel am gleichen Modell arbeiten können (Abbildung 5.5). Diese im Bereich der Strukturanalyse längst etablierte Vorgehensweise konnte für die Umformsimulation erst später gangbar gemacht werden, weil die hierfür erforderliche vollautomatische Neuvernetzung (Remeshing) die Parallelisierung ungleich schwieriger macht. Im Bereich der eigentlichen Umformsimulation ist diese Strategie inzwischen faktisch Stand der Technik. Dennoch bemühen sich die Softwareanbieter weiterhin darum, die entsprechenden Strategien und Rechenmodelle schneller und flexibler zu machen und die Zahl der parallel einsetzbaren Prozessoren weiter zu steigern. Großes Potenzial besteht beim „Parallel Computing“ von komplexen Modellen unter Einbeziehung der Werkzeuge (Abbildung 5.6) Hierbei werden z. B. die einzelnen Werkzeugkomponenten in unterschiedliche Domains gelegt und entsprechend auf verschiedenen CPUs bzw. Cores gerechnet oder selbst nochmals parallelisiert.

### 5.1.6 Automatische Optimierung mit Fertigungskonzepten

Prozesssimulation in der Fertigungstechnik läuft häufig auf eine virtuelle Erprobung mit mehreren Versuchszyklen hinaus. Die Optimierung von Ent-

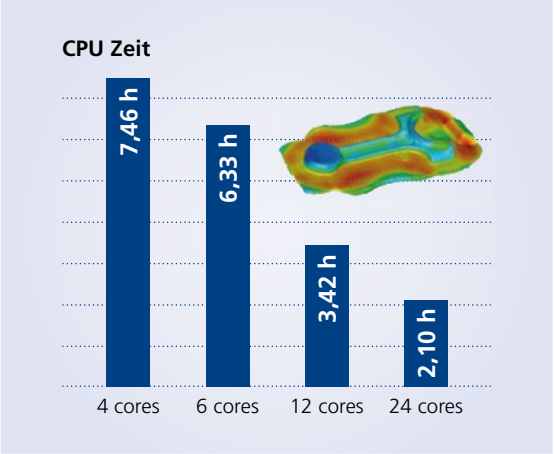



**Abbildung 5.5:** Je mehr Prozessoren, desto schneller die Berechnung. Grafische Darstellung der Geschwindigkeitssteigerung für die Simulation eines dreistufigen Schmiedeprozesses für einen Pleuel

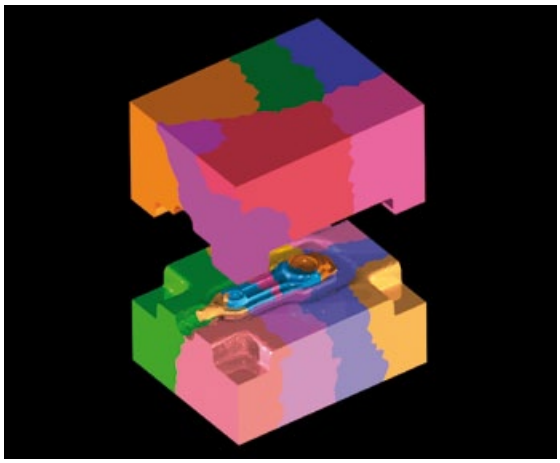


**Abbildung 5.6:** Unterteilung eines Simulationsmodells in mehrere CPU-Partitionen unter Berücksichtigung des linear-elastischen Verhaltens des Gesenkblöcke

wicklungsprozessen, die eine derartige Vorgehensweise beinhalten, ist das Ziel intensiver Bemühungen bei der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Simulation von Massivumformprozessen. Der automatischen Optimierung dieser Arbeitsschritte mit Hilfe des Computers stand bisher der erforderliche Rechenaufwand entgegen. Dank moderner Hochleistungsrechner und der gestiegenen Performance der Simulationsprogramme rücken die Rechenzeiten für solche Ansätze inzwischen jedoch näher an den Bereich des Vertretbaren heran.

Durch automatisierte Optimierung soll zudem die Qualität und Verlässlichkeit von Simulationsergebnissen gesteigert werden. Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine Zielfunktion mit Hilfe mehrerer automatischer Simulationsrechnungen minimiert wird, um somit ein Optimum für einen oder mehrere Parameter zu finden.

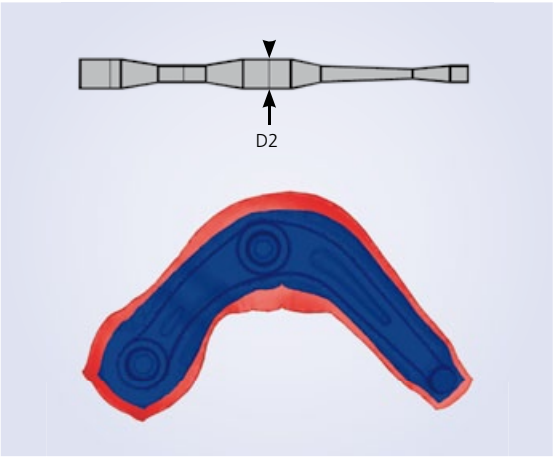



**Abbildung 5.7:** Die integrierte, vollautomatisch zwischen Simulationssoftware und CAD-System ablaufende Optimierung ermöglicht die Reduzierung des Rohlinggewichts um 10 %. Der rote Bereich zeigt die Kontur des Schmiedegrats vor der Optimierung, das Resultat nach Optimierung ist blau dargestellt

Wichtiges Ziel ist hierbei auch, die Objektivierung von Entscheidungen über Designänderungen an einem Prozess bzw. an Werkzeugen auch bei komplexen Umformprozessen zu erreichen, um riskante „Bauchentscheidungen" zu vermeiden. Dies erleichtert es zudem, solche Aufgaben auch jüngeren Mitarbeitern mit weniger ausgeprägtem Erfahrungsschatz zu übertragen und trägt ebenso der Tatsache Rechnung, dass die Prozessfenster sowohl technologisch als auch von der Entwicklungszeit her immer enger begrenzt werden.

Bei der automatischen Optimierung können einerseits Prozessparameter wie z. B. Reibwerte an die realen Prozessverhältnisse angepasst werden. Andererseits geht es darum, den Stoffffluss fehlerfrei nachzuvollziehen und dabei die Werkzeugbelastung durch Modifikation von Werkzeugradien und – schrägen zu reduzieren und dabei die Umformkräfte zu verringern bzw. günstiger auf die Umformstufen zu verteilen. Des Weiteren ermöglicht die automatische Optimierung, das Gewicht des Schmiederohlings maßgeblich zu senken und damit Material und Kosten zu sparen (Abbildung 5.7).

Bei der automatischen Modifikation von Werkzeuggeometrien ist eine enge Kopplung an die vorhandene CAD-Umgebung unerlässlich. Zudem muss die formgebende Geometriebeschreibung auch

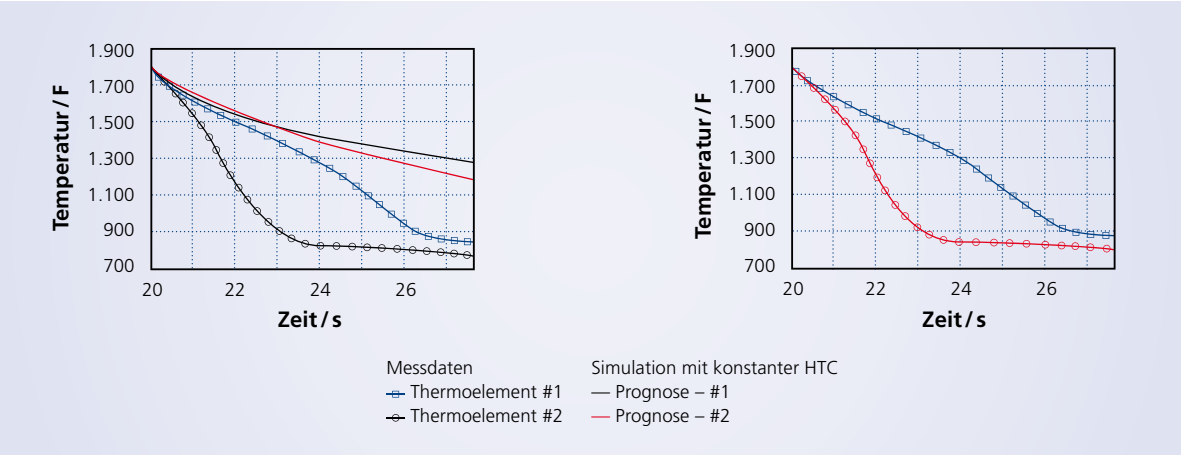



**Abbildung 5.8:** Die mit Hilfe der Simulation vorhergesagten Abkühlkurven sind an zwei Stellen dargestellt (links). Sie unterscheiden sich erheblich von den durch Symbole dargestellten experimentell ermittelten Daten. Nach der iterativen Entwicklung präziser HTCs stimmen Simulation und Thermoelementdaten sehr gut überein (rechts)

vollständig parametrisierbar sein, was bei den typischerweise vorhandenen Freiformflächen eines Schmiedegesenks nicht unbedingt gegeben ist. Hier ist sicherlich noch einiges an Entwicklungsarbeit – auch seitens der CAD-Anbieter – zu leisten.

Ein weiterer Entwicklungszweig der Optimierung betrifft die Ermittlung der für die Simulation des Umformprozesses erforderlichen thermophysikalischen Kennwerte einer Legierung. Diese war bisher zumeist teuer und zeitaufwendig. Mittlerweile gibt es beispielsweise Simulationswerkzeuge zur schrittweisen Berechnung des Wärmeübertragungskoeffizienten (Heat Transfer Coefficient, HTC) mit Hilfe einer inversen Methode. Ausgangspunkt hierfür sind die experimentell mit Hilfe von Thermoelementen ermittelten Temperatur- und Zeitdaten für einen realen Prozess. Die Software führt anschließend unter Verwendung einer Optimierungsroutine mehrere Simulationsschleifen durch, um den HTC (als Funktion der Temperatur) zu ermitteln. Diese Optimierung wird iterativ solange wiederholt, bis die berechnete Kurve mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmt (Abbildung 5.8).

### 5.1.7 Einsatz von Expertensystemen

Zu den künftigen Funktionalitäten von Simulationssoftware gehören über die möglichst präzise Vorhersage der Gebrauchseigenschaften des Bauteils hinaus zunehmend auch Expertensysteme. Diese sollen den Mitarbeitern den zielgerichteten Einsatz der Umformsimulation erleichtern. Wichtiger Treiber dieser Entwicklung ist die zunehmende Fluktuation des Personals. Als Folge dieser Mobilität können Faktoren wie Berufserfahrung und Erfahrungsschatz der einzelnen Mitarbeiter beispielsweise bezüglich Feinabstimmung der Werkstoffe und der daraus abgeleiteten Konzipierung der Werkzeuge tendenziell zurückgehen. Diesen Rückgang soll das Expertensystem ausgleichen.

Mindestanforderung an ein derartiges System ist die Verwaltung der Historie aller im Unternehmen durchgeführten Simulationen sowie eine einfach zu bedienende Zugriffsmöglichkeit auf der Grundlage vordefinierter Kriterien (Abbildung 5.9). Das System sollte entsprechend den vorkommenden Bauteiltypen strukturiert sein und über die Fähigkeit verfügen, den Bauteiltyp zu erkennen und geeignete Vorschläge bezüglich der Parameter des Schmiedeprozesses, der Regeln für das Werkzeugkonzept sowie der Vorgaben und Randbedingungen einer Optimierung zu liefern.

Ein derartiges Expertensystem ist in der Regel lernfähig, d. h. es erweitert seinen Erfahrungsschatz stän-

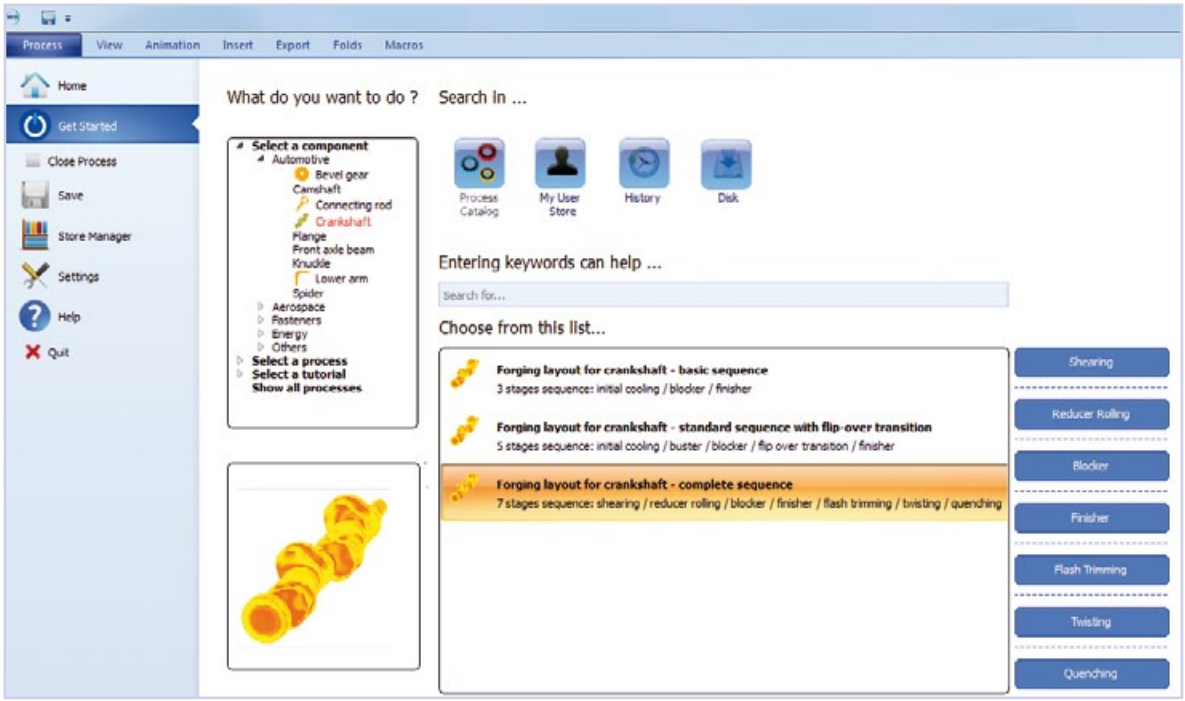



**Abbildung 5.9:** Eingangsmenü einer auf der Grundlage von Hersteller-Know-how aufgebauten Prozessdatenbank

dig durch Einbeziehung aller im Unternehmen neu durchgeführten Simulationen. Hierfür benötigt es Zugänge zu den heute verfügbaren neuen Kommunikationseinrichtungen, um auch Ergebnisanalysen oder Gruppensitzungen von Simulationsfachleuten z. B. Beispiel mit Hilfe von Tabletcomputern durchzuführen.

## 5.2 Fortschritte beim Grundlagenverständnis

Auch technisch-wissenschaftliche Institute, wie z. B. Hochschulen, beschäftigen sich gemeinsam mit Softwareanbietern und Unternehmen der Massivumformung u. a. im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte mit der Entwicklung neuer und/oder der Verbesserung bestehender Simulationstechniken. Im Fokus stehen derzeit insbesondere die Untersuchung von Grundlagen, die Entwicklung von verbesserten Modellen und die Einbindung weiterer Simulationswerkzeuge in die Simulationssysteme. Im Ursache-Wirkungs-Diagramm (Abbildung 5.10), sind die Schwerpunkte der derzeitigen Entwicklungsrichtungen der Forschungsprojekte im Hinblick auf den Nutzen der Simulation dargestellt. Ausgewählte Vorhaben werden nachfolgend vorgestellt.

### 5.2.1 Datenbasis für Legierungen am Beispiel Stahl

Voraussetzung für die erfolgreiche Simulation von Umformprozessen ist die Verfügbarkeit zuverlässiger Daten über die thermophysikalischen Eigenschaften sowie das Umwandlungsverhalten der verwendeten Werkstoffe. Hierfür stehen verschiedene Quellen zur Verfügung, welche genutzt werden können. U. Diekmann [DIEK 1, DIEK 2] stellt nachfolgend beispielhaft die vom Stahlinstitut VDEh verantwortete offizielle Datenbank der Europäischen Stahlregistratur vor. Aufgeführt sind neben Verweisen auf Normen, Lieferbedingungen, Produktformen und Hersteller vor allem auch technische Datensätze aus der Werkstoffprüfung. Die Datenbank bietet Such-, Visualisierungs- und Analysefunktionen. Zusätzlich

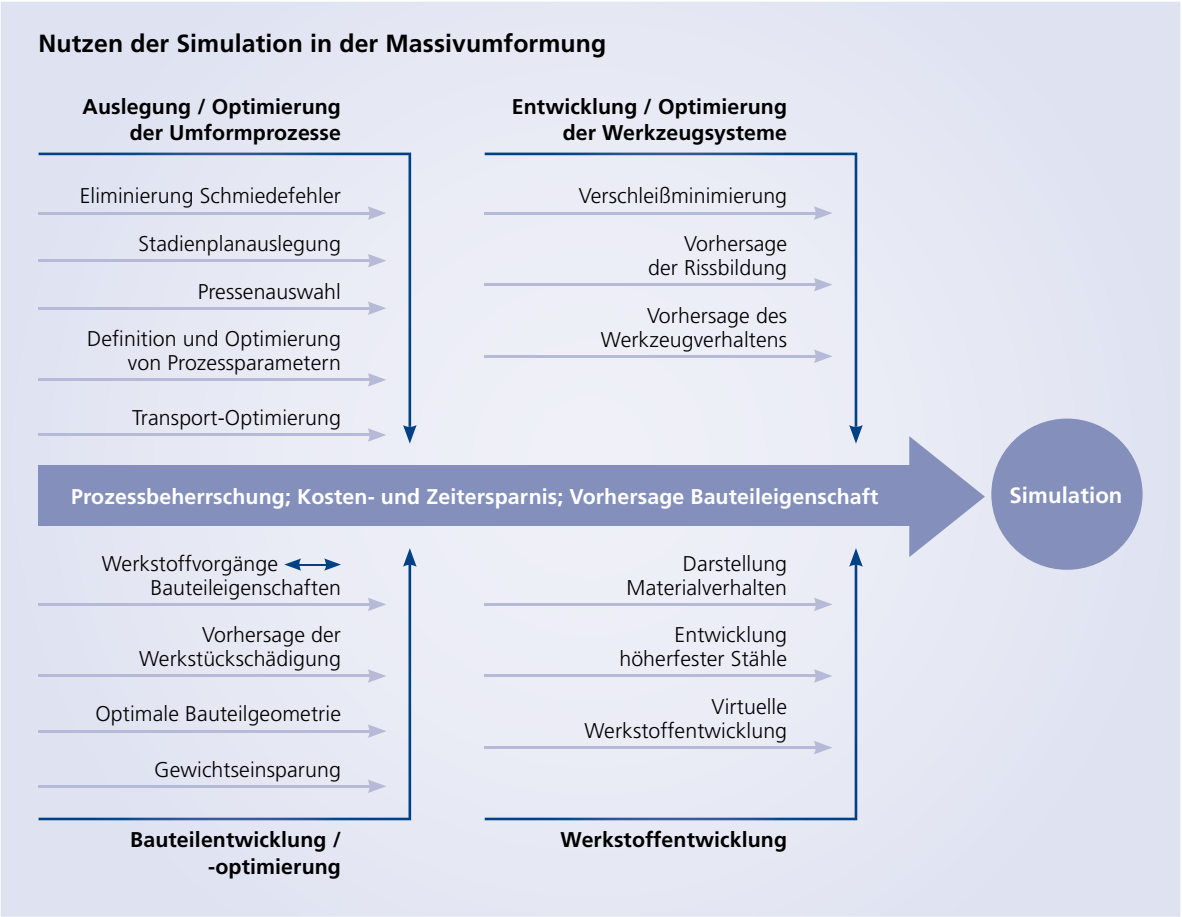



**Abbildung 5.10:** Wichtige Entwicklungsrichtungen bei Forschungsvorhaben im Bereich wissenschaftlich-technischer Institute

zu den üblichen Angaben wie Werkstoffnummer, chemischer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften enthält das System auch temperaturabhängige Eigenschaften entsprechend SEW 310 für ca. 450 Werkstoffe sowie Verknüpfungen zu anderen Datensätzen wie ZTU/ZTA-Diagrammen, Feinblech-Kennwerten und die für die Umformsimulation wichtigen Fließkurven, Abbildung 5.11.

Als Ergänzung hierzu ermöglicht ein Softwarepaket (auch hier gibt es verschiedene Systeme) die Berechnung von Werkstoffeigenschaften als Funktion von chemischer Zusammensetzung und Prozessführung. Aufbauend auf einer ausgereiften thermodynamischen Grundlage (CalPhaD) verfügt die Software über verschiedene Modelle zur Berechnung von Werkstoffeigenschaften, wie z. B. thermophysikalischen Daten. Für die Generierung der Datensätze, wie z. B. des hier gezeigten ZTU-Schaubilds (Abbildung 5.12), werden Modelle auf physikalischer Basis genutzt. Die berechneten Materialeigenschaften kommen insbesondere bei der FE-Simulation von Gieß-, Umform- und Wärmebehandlungsprozessen zur Anwendung.

### 5.2.2 Einfluss der Aufheizrate auf die Umformbarkeit von Stahl und Aluminium

Schnelles Aufheizen bzw. Wiedererwärmen kann bei metallischen Legierungen zu Inhomogenitäten im Gefüge und somit zu Abweichungen des Gefügezustands vom thermodynamischen Gleichgewicht führen. Einem Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild (Abbildung 5.13) können Gefügezustand und Korngröße für unterschiedliche Aufheizraten beim Austenitisieren von Stahl entnommen werden. Schnelle Erwärmung (z. B. 20 K/s bzw. 41 K/s) kann oberhalb der Umwandlungstemperatur $Ac_3$ ein Gefüge zur Folge haben, bei dem die Austenitkörner mit Kohlenstoff inhomogen angereichert sind. Im Gegensatz dazu besteht das Gefüge nach langsamem Aufheizen (z. B. 1 K/s) i. d. R. aus weitgehend homogenisiertem Austenit. Ferner ist bei zunehmender Haltezeit mit steigendem Kornwachstum zu rechnen.

Untersuchungen von R. Kawalla und G. Korpala [KAWA 1] galten zuletzt dem Einfluss unterschiedlicher Aufheizarten und Aufheizraten auf die Umformbarkeit von Stahl (20MnCr6, 40CrMo5 und 100Cr6) und Aluminium (AlSiMgMn) mit dem Ziel, die Grenzen der Anwendbarkeit von Standard-Fließkurven für die Simulation von Umformprozessen zu ermitteln. Sowohl schnelle induktive und konduktive als auch langsamere konvektive Aufheizverfahren wurden miteinander verglichen.

Erwartungsgemäß zeigte sich bei allen Werkstoffen eine starke Abhängigkeit der ermittelten Fließspannung von der Aufheizrate. Bei den untersuchten Stählen konnte beispielsweise bei schnellem Aufheizen (im Vergleich zu langsamem Aufheizen) auf eine Umformtemperatur von 850 °C ein deutlich höherer Fließwiderstand identifiziert werden. Nach Diskussion der vorgestellten Ergebnisse ist mit weiteren Analysen zu rechnen.

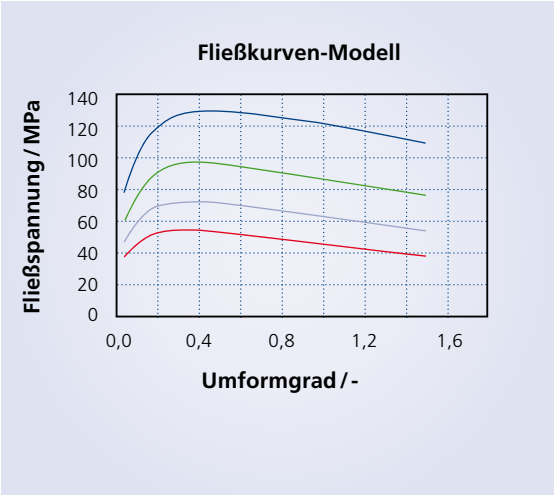



**Abbildung 5.11:** Beispiele für Warmfließkurven für einen Stahl

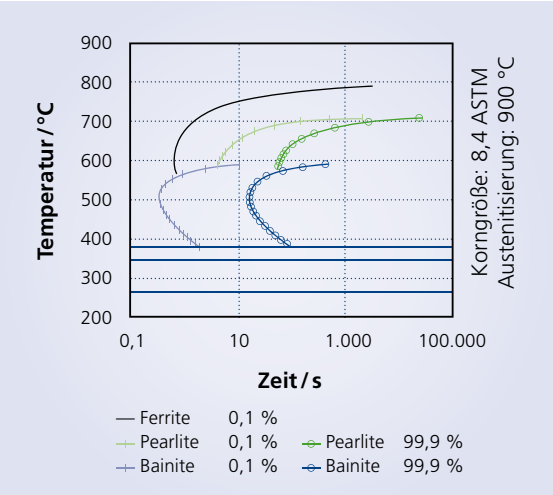



**Abbildung 5.12:** Ein mit Hilfe der Software berechnetes ZTU-Diagramm eines wärmebehandelbaren Stahls

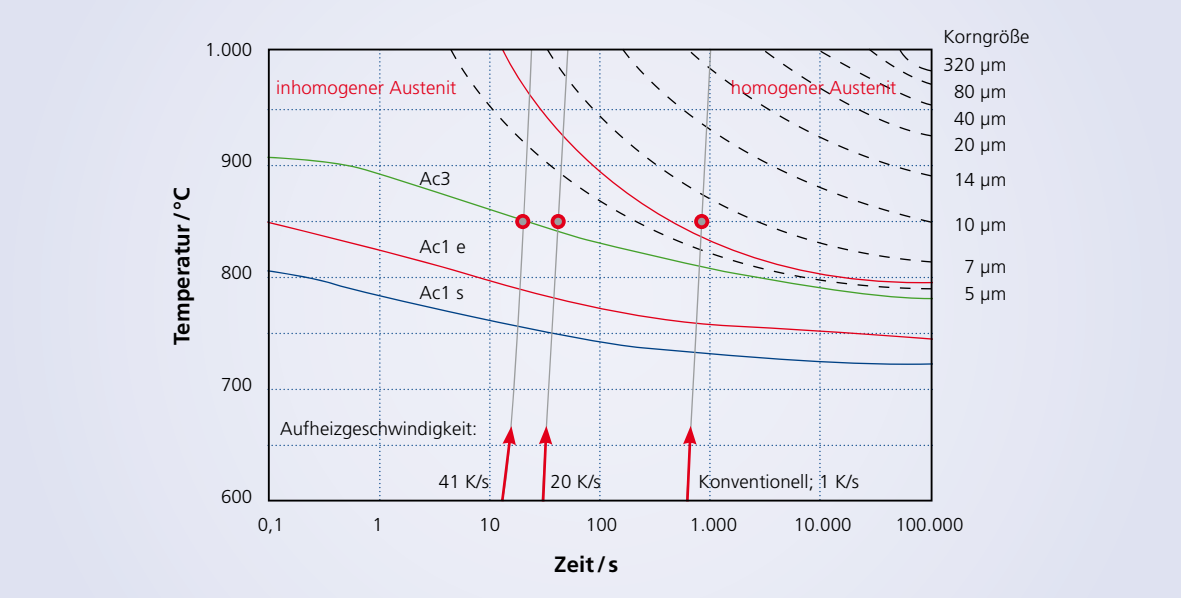



**Abbildung 5.13:** Beispiel eines Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramms (ZTA) eines Stahls für unterschiedliche Aufheizgeschwindigkeiten. Die rot-schwarzen Punkte kennzeichnen unterschiedliche Ausgangszustände der Umformung bei gleicher Temperatur

### 5.2.3 Werkstoff- und Prozessentwicklung mittels Thermodynamik- und Mikrostrukturmodellierung

Im Bereich der Warmmassivumformung von Stahl unterliegen Formänderung, Temperaturverlauf und Mikrostrukturentwicklung meist erheblichen Wechselwirkungen. In bisher verfügbaren Ansätzen zur Modellierung des Umformverhaltens von Stahl wird dieser Erscheinung i. d. R. nur eingeschränkt Rechnung getragen. Im Rahmen der Arbeiten von L. Mosecker [MOSE 1] und K. Schacht [SCHA 1] am Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen wurde ein metallphysikalisches Modell für die verbesserte Abbildung der lokalen Fließeigenschaften entwickelt (Abbildung 5.14). Im Fokus der Untersuchungen standen dabei mikrolegierte Schmiedestähle wie z. B. ausscheidungshärtende-ferritisch-perlitische (AFP) Stähle.

Die Einführung interner Strukturvariablen (wie z. B. der Versetzungsdichte) ermöglicht es, metallphysikalische Phänomene wie Erholung und Rekristallisation sowie Ausscheidungsverhalten und Kornwachstum auf Basis empirischer Ansätze abzubilden und ihren Einfluss auf das mechanische Verhalten zu quantifizieren. Kernstück des Werkstoffmodells ist die mathematische Beschreibung der Versetzungsdichte-Evolution. Diese wird wiederum für die Berechnung der statischen bzw. dynamischen Rekristallisation und für die Ausscheidungsrechnung herangezogen.

Der mikrostrukturbasierte Ansatz lässt sowohl eine verbesserte Simulation des Materialflusses (z. B. zur Vorhersage möglicher Schmiedefehler) als auch eine Prognose hinsichtlich des Gefügezustands erwarten. Die dem Schmieden nachfolgende Phasenumwandlung in Ferrit-Perlit wird derzeit noch nicht abgebildet. Aktuelle Arbeiten beziehen sich auf die Kopplung des Mikrostrukturmodells mit der thermodynamischen Beschreibung der Ausscheidungsentwicklung. In diesem Zusammenhang soll das Werkstoffverhalten bei Verwendung verschiedener Mikro-Legierungs-Element (MLE) Systeme in Abhängigkeit von Versetzungsdichte sowie Art und Massenanteil an MLE beschrieben werden. Ein weiteres Ziel besteht darin, für möglichst viele Modellparameter des bisher formulierten Ansatzes eine Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung zu formulieren. Hierbei wird auf die absolute Schmelztemperatur zurückgegriffen, die wiederum durch thermodynamische Datenbanken vorhergesagt werden kann. Des Weiteren wird durch die Integration der Halbzeug-Wiedererwärmung ein Beitrag zur Entwicklung einer durchgängigen virtuellen Prozesskette geleistet.

### 5.2.4 Robustheit der Gefügemodellierung bei der Auslegung eines Gesenkschmiedeprozesses

Mit der Entwicklung statistischer Methoden zur Quantifizierung von Schwankungen im Werkstoff-

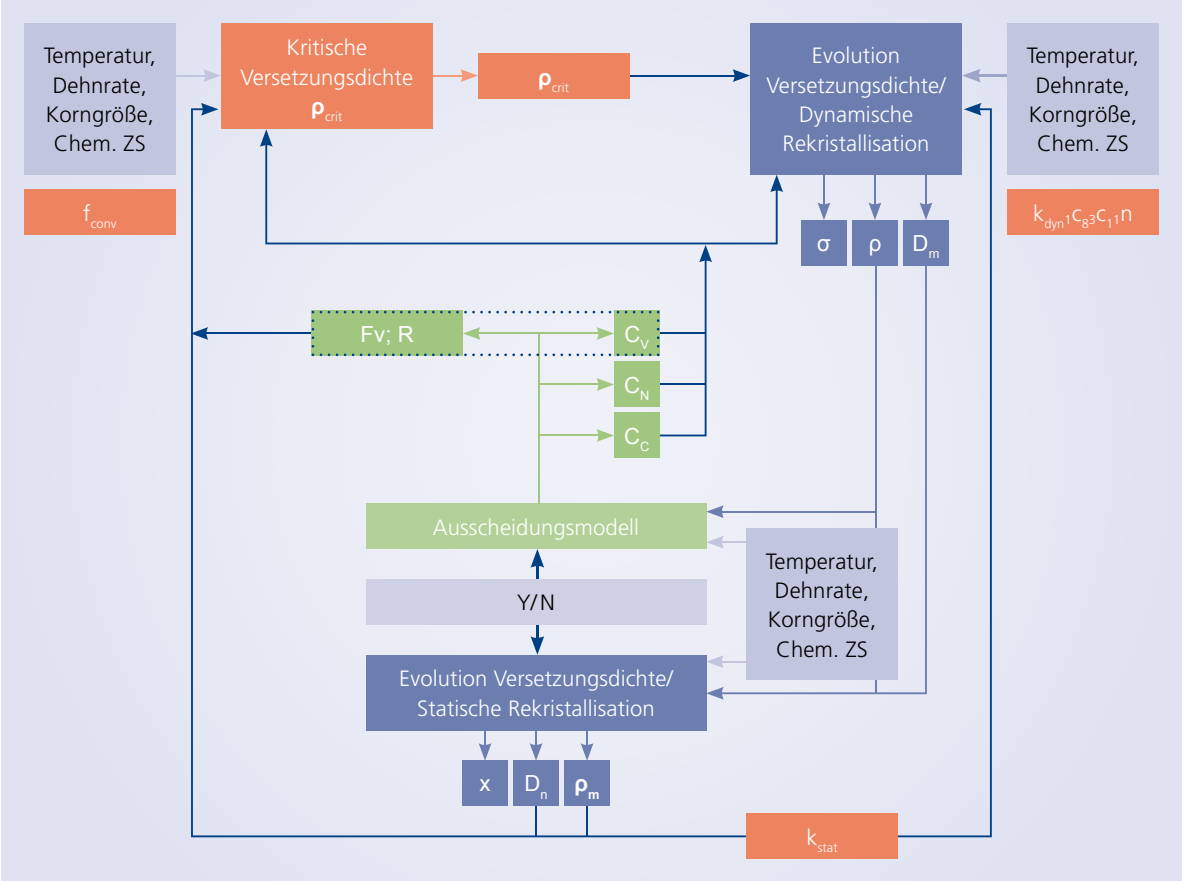



**Abbildung 5.14:** Logische Verknüpfung der Teilmodule für die mikrostrukturbasierte Berechnung mehrstufiger Umformprozesse

verhalten, wie sie beispielsweise durch Chargenschwankungen und Inhomogenitäten entstehen, und zu ihrer Berücksichtigung in mikrostrukturbasierten Werkstoffmodellen befassen sich T. Henke et al. [HENK 1] im Rahmen von Untersuchungen am Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH Aachen. Hintergrund dieser Arbeiten ist der Wunsch, neben der integrativen Vorhersage von Prozessgrößen und Produkteigenschaften auch Aussagen zur späteren Prozessrobustheit vornehmen zu können. Deshalb kommen bei der Prozessauslegung vermehrt statistische Methoden zum Einsatz. Jede Robustheitsanalyse erfordert jedoch Kenntnisse über die Schwankungen in den Eingabedaten des Modells, das für die Auslegung herangezogen wird. Da diese Schwankungen jedoch schwer messbar sind, werden sie meist abgeschätzt.

Bei der umformtechnischen Prozessauslegung hat das Werkstoffverhalten größten Einfluss auf die Prozessgrößen und auf die Eigenschaften des Produkts. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens für die Simulation kommen daher zunehmend Modelle zum Einsatz, welche die Fließeigenschaften und die Mikrostrukturentwicklung integrativ abbilden können. Hierzu können mit Hilfe eines am IBF entwickelten modularen Werkstoffmodells sowohl physikalische, versetzungsdichte-basierte als auch semi-empirische Ansätze zur Beschreibung von Verfestigung und Entfestigung in Folge von Erholung und Rekristallisation nahezu beliebig kombiniert werden.

Die jetzt am IBF entwickelten statistischen Methoden zur Berücksichtigung von Werkstoffschwankungen basieren auf den sogenannten „Resampling"-Verfahren. Unter Einsatz eines solchen schwankungsbehafteten Werkstoffmodells bei der Auslegung eines Gesenkschmiedeprozesses zur Herstellung eines Kegelrads aus einem mikrolegierten Einsatzstahl 25MoCr4-Nb-Ti gelang es, die im Realprozess zu erwartenden Gefügestreuungen in Verteilungsfunktionen vorherzusagen. Ein Abgleich mit der Gefügeverteilung real hergestellter Zahnräder (Abbildung 5.15) ergab, dass es bei der Anwendung eines konventionellen nichtschwankungsbehafteten Modells dagegen zur Unterschätzung der realen Korngrößen kommen kann. Die Vertrauensgrenzen der

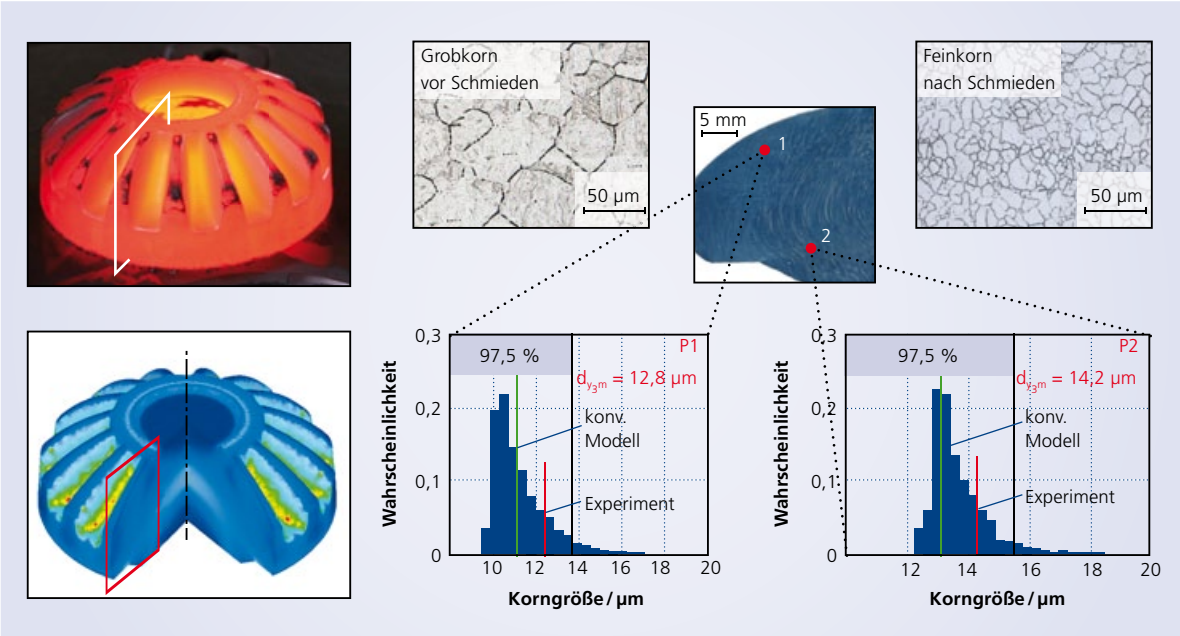



**Abbildung 5.15:** Vergleich von Simulation und realen Ergebnissen einer Gefügeuntersuchung

ermittelten Verteilungsfunktionen hingegen schlossen die experimentellen Korngrößen zuverlässig ein.

### 5.2.5 Modellierung der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug

Vor allem die Machbarkeit sowie der Kraft- und Arbeitsbedarf des Umformprozesses hängt entscheidend von der Fähigkeit des tribologischen Systems ab, Werkstück und Werkzeug während des Umformprozesses voneinander getrennt zu halten und eine gute Schmierung zur Minimierung von Verschleiß aufgrund von Scherkräften aufrechtzuerhalten. Gleichzeitig hängt die Qualität einer Finite-Elemente-Analyse maßgeblich von der Genauigkeit des verwendeten Reibmodells ab, welches die tribologischen Wechselwirkungen zwischen dem Werkstück und den formgebenden Werkzeugen beschreibt. Neben einer Reihe von weiteren Instituten beschäftigen sich sowohl das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt als auch das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover mit der Beeinflussung und Modellierung der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug bei Massivumformprozessen.

Um die Qualität von FEM-Simulationen zu verbessern, wurde zuletzt am PtU durch die Abteilung Tribologie und Oberflächentechnik eine neue, optimierte Modellierung der Reibung im Kaltumformprozess untersucht. Hierfür wurde von Stahlmann et al. [STAH 1] und Ludwig et al. [LUDW 1] ein neuer Ansatz entwickelt. Dieser beschreibt die Veränderungen der Werkstückoberfläche im Verlauf der Kaltumformung und bezieht Feldgrößen mit signifikantem Einfluss auf das Reibverhalten ein. Demnach hängt der Reibkoeffizient nicht nur von der Kontaktnormalspannung, sondern auch von der Oberflächenvergrößerung ab. Des Weiteren berücksichtigt das Modell die Lastabhängigkeit der Werkstück-Oberflächenstruktur. Für die Ermittlung des Reibkoeffizienten kommt als Tribometer für die Kaltmassivumformung die Gleitstauchanlage (Abbildung 5.16) zum Einsatz.

Durch die Berücksichtigung der Veränderungen des Kontaktbereichs zwischen den Reibpartnern liefern die Ergebnisse Aufschlüsse über tribologische Belastungen in Umformprozessen. Im Rahmen des Einsatzes dieser Modelle konnten die Zusammenhänge zwischen Oberflächenrauheit und Variablen zur Beschreibung des Oberflächenzustands abgeleitet werden. Die gefundene Methodik erwies sich sowohl als wirtschaftlich mit Blick auf den Rechenaufwand in der Simulation als auch als vielversprechend bezüglich der Vorhersage der Oberflächenrauheit der Werkstückoberflächen. So können die durch Simulation ermittelten Werte für die Ober-

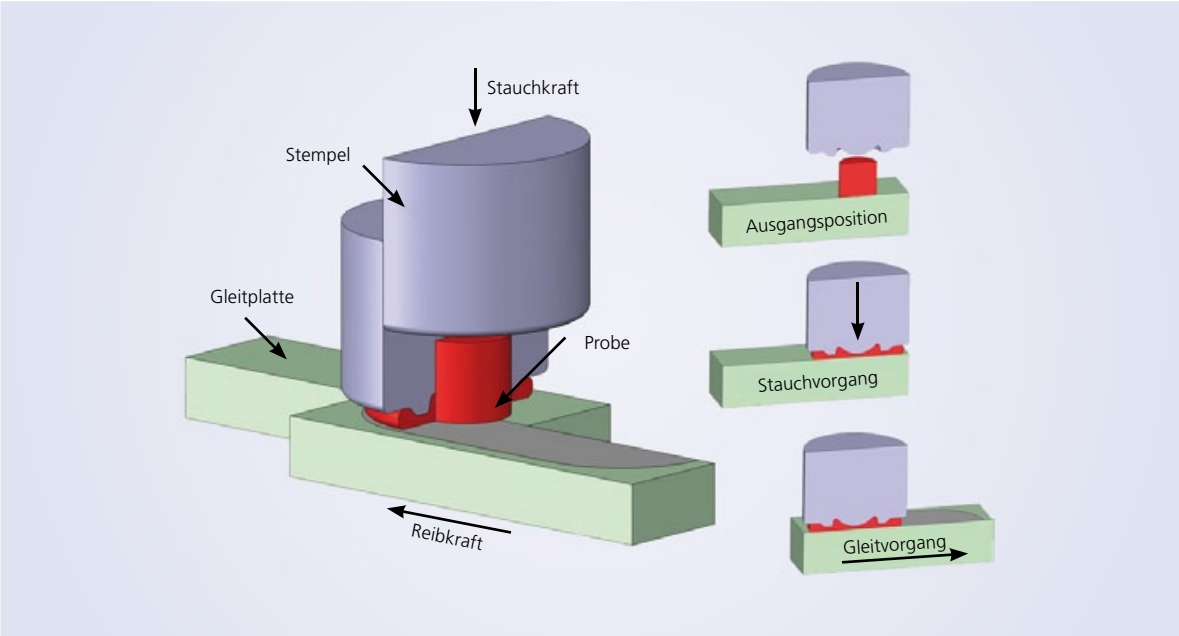



**Abbildung 5.16:** Schema der am PtU für die Untersuchung der Reibungsverhältnisse zwischen Werkstück und Werkzeug verwendeten Gleitstauchanlage

flächenrauheit in Zukunft zur Bestimmung von Reibungskenngrößen in Abhängigkeit von der Oberflächenveränderung verwendet werden. Dies lässt eine bessere Darstellung realer Massivumformprozesse erwarten. Weitere Forschungsarbeiten am PtU streben einen Transfer der bisherigen Ergebnisse in die industrielle Praxis an. Dabei soll auch ein aktuelles Defizit des Modells, die Berücksichtigung von Aufrauungen der Werkzeugoberfläche, in die Modellbeschreibung aufgenommen werden.

Am IFUM wurde von B.-A. Behrens et al. [BEHR 1] ein neues Modell für typische Reibzustände, wie sie in Warmumformprozessen auftreten, entwickelt. Die Reibung wird in erster Linie von der Oberflächenbeschaffenheit sowie vom lokal vorherrschenden Spannungszustand und der relativen Gleitgeschwindigkeit beeinflusst. Klassische Reibansätze berücksichtigen die oben genannten Einflussfaktoren nur mit unzureichender Genauigkeit oder vernachlässigen sie sogar komplett. Das neue Reibmodell ist

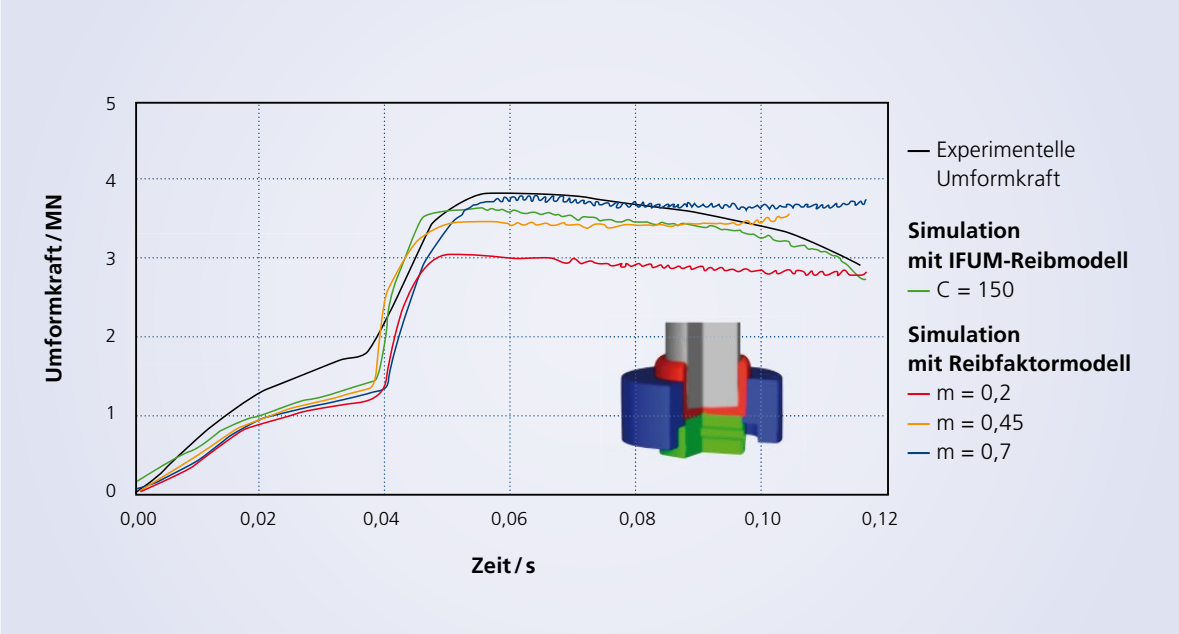



**Abbildung 5.17:** Vergleich von experimentell ermittelten mit simulierten Kraft-Zeit-Kurvenverläufen eines Warmumformprozesses

– analog zu bestehenden Reibansätzen – in der Lage, zwischen Spannungszuständen mit geringen und hohen Kontaktdrücken bzw. zwischen elastischer und plastischer Deformation zu unterscheiden. Diese beiden Spannungszustände sind mit Hilfe des Verhältnisses der Vergleichsspannung nach von Mises und der lokalen Fließspannung des Werkstückwerkstoffs ($\sigma_{eq}/\sigma_y$) gewichtet, sodass eine Kombination des Reibzahlmodells nach Coulomb und des Reibfaktormodelles nach Tresca vorliegt. Eine wesentliche Erweiterung bestehender Reibansätze stellt die Beschreibung des Einflusses der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibschubspannung dar. Dies erfolgt im neuen IFUM-Modell mit einem Exponentialansatz, um dynamische Reibeffekte, die bei geschmierten Schmiedeprozessen auftreten, zu berücksichtigen. Abbildung 5.17 zeigt einen Vergleich von numerisch und experimentell ermitteltem Kraft-Zeit-Verlauf eines Umformprozesses. Die Grafik bestätigt eine hohe Übereinstimmung der numerischen Ergebnisse des neuen Reibmodells mit den experimentell ermittelten Daten.

Der Einsatz des neuen Reibmodells für die numerische Abbildung industrienaher Warmumformprozesse hat gezeigt, dass die Berechnungsgenauigkeit von FE-gestützten Prozesssimulationen erhöht werden kann. Es wurde bereits in branchenspezifische kommerzielle FE-Systeme implementiert und durch Abgleich mit experimentellen Versuchsergebnissen validiert.

### 5.2.6 Kopplung der Umformsimulation mit nichtlinearen Pressenmodellen

Bei mehrstufigen Umformprozessen können Maßnahmen zur Anpassung (z. B. des Füllverhaltens bzw. des Füllgrads) einzelner Umformstufen einen deutlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis ausüben. Gleichzeitig lässt sich die Wirkungsweise derartiger Einzelmaßnahmen häufig nicht eindeutig vorhersagen. Unsicherheiten grundsätzlicher Art ergeben sich aus den zum heutigen Zeitpunkt noch nicht umfassend untersuchten Wechselwirkungen zwischen den umzuformenden Halbzeugen bzw. Zwischenstufen, den für die Umformung entwickelten Werkzeugkonzepten und den eingesetzten Umformmaschinen. Letzteren kommt dabei eine ganz besondere Rolle zu, denn jeder Pressentyp hat i. d. R. sein spezifisches Last-/Verlagerungsverhalten. Des Weiteren wird das jeweilige Auffederungs-, Kippungs- und Versatzverhalten zusätzlich von der Anordnung der Werkzeuge auf dem Pressentisch beeinflusst. In der Praxis – insbesondere bei der Abstimmung von Stufenfolgen zur Fertigung von Neuteilen – ergeben sich demzufolge regelmäßig erhöhte Aufwendungen und z. T. auch erhebliche zeitliche Verzögerungen.

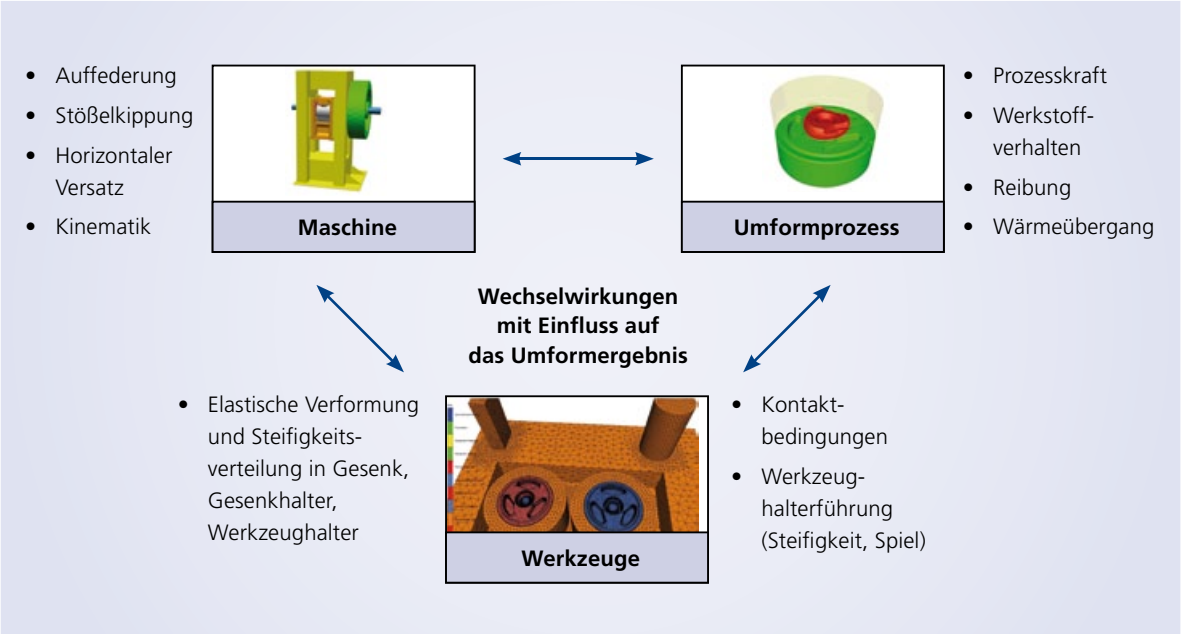



**Abbildung 5.18:** Die im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte am WZL entwickelte Software berücksichtigt die komplexen Wechselwirkungen zwischen Werkstück, Werkzeug und Maschine und liefert dem zur Umformsimulation eingesetzten Programm entsprechende Korrekturgrößen für die Teilegeometrie

Mit der Analyse und Modellierung von Wechselwirkungen zwischen Werkstück, Werkzeug und Umformaggregat (Abbildung 5.18) beschäftigen sich C. Brecher et al. [BREC 1]. Eine in den letzten Jahren am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen entwickelte Methodik unterstützt die virtuelle Optimierung von Ein- und Mehrstufenwerkzeugen unter Berücksichtigung des Last-Verlagerungsverhaltens der Produktionsmaschine und des gewählten Werkzeugsystems. Dazu wird ein neues Softwareprogramm mit herkömmlichen Umformsimulationssystemen gekoppelt. Das Tool bildet die maschinen- und werkzeugspezifischen Feder- und Kippsteifigkeiten sowie die translatorischen und rotatorischen Spiele der Umformmaschine und des Werkzeugsystems mit Hilfe eines nicht-linearen Ansatzes analytisch ab. Auf Basis der in den Einzelschritten vorliegenden Prozesskraft wird jeweils die resultierende Verlagerung berechnet und anschließend wieder dem Umformsimulationssystem zugeführt. Dieses nimmt wiederum die Aktualisierung der Werkzeugposition vor, sodass nachfolgend die Deformation des Werkstücks ermittelt werden kann. Die beschriebene Vorgehensweise ermöglicht – unter vertretbarem Mehraufwand – eine erhöhte Berechnungsgenauigkeit bei der Simulation von Umformprozessen. Das neue Tool leistet somit einen Beitrag zur Reduzierung von Einricht- und Anfahrproblemen bei neuen Werkzeugen.

### 5.2.7 FEM-Simulation des Werkzeugversagens bei Warmmassivumformprozessen

Beim Gesenkschmieden von Stahlwerkstoffen treten infolge der hohen Prozesstemperaturen und Umformkräfte große thermische und mechanische Werkzeugbeanspruchungen auf, welche die Werkzeugstandmenge maßgeblich beeinflussen. Werkzeugausfälle durch Rissbildung infolge thermisch-mechanischer Werkstoffermüdung sind nach dem Verschleiß die zweithäufigste Ausfallursache. Diese treten in Werkzeugbereichen auf, die zyklischen plastischen Verformungen aufgrund mechanischer Wechselbelastungen unterliegen. Zusammen mit thermozyklischen Belastungen führt dies zu Materialschädigungen und letztlich zur Einleitung von Rissen.

Möglichkeiten der Simulation des Werkzeugversagens bei der Massivumformung infolge thermisch-mechanischer Materialermüdung untersuchten B.-A. Behrens et al. [BEHR 2]. Ausgehend von verbesserten FE-gestützten Lebensdauerprognosen wurden im Rahmen des IGF Forschungsvorhabens 15640 N drei industrielle Schmiedeprozesse untersucht, bei denen es zu Werkzeugversagen infolge Ermüdungsrissbildung kam. Die Schmiedevorgänge wurden unter Berücksichtigung realer Prozessparameter und -randbedingungen mit Hilfe kommerziel-

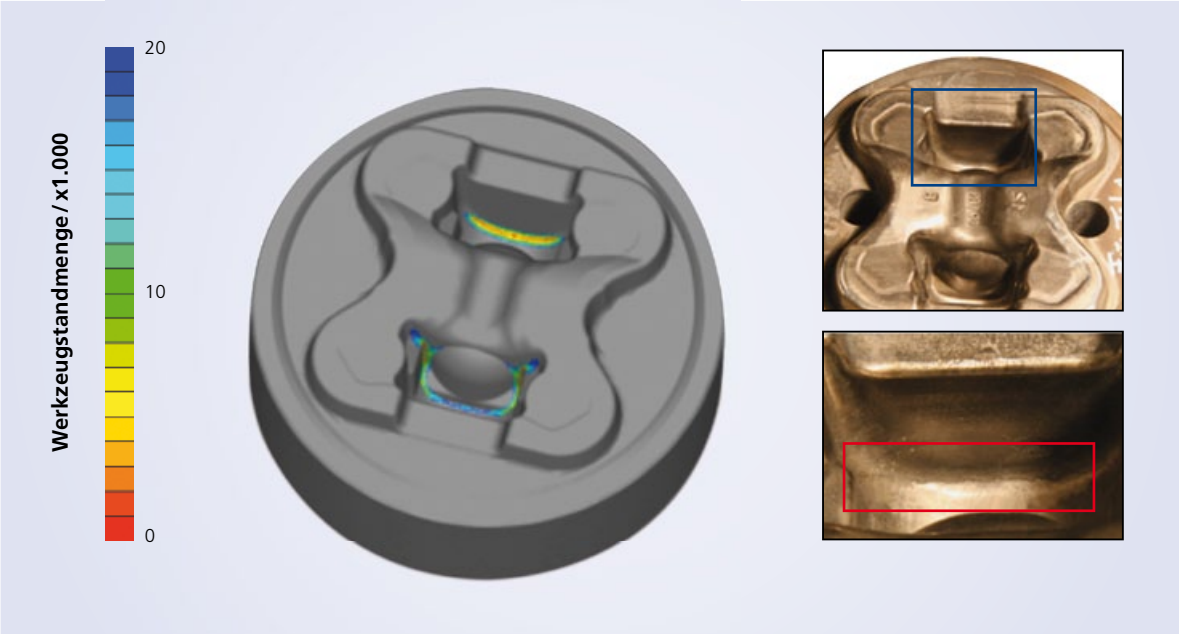



**Abbildung 5.19:** FE-gestützt errechnete Werkzeugstandmenge für das Untergesenk eines realen Schmiedeprozesses (links), im Vergleich dazu ein rissbehaftetes Untergesenk mit Risseinleitungsort (rechts)

ler branchenspezifischer FE-Systeme modelliert und untersucht. Die Berechnung der im Schmiedegesenk hervorgerufenen Spannungen und Dehnungen wurde mit Hilfe entkoppelter Werkzeuganalyseprogramme durchgeführt. Über die Programmierschnittstelle des FE-Systems wurden zusätzlich Daten aus dehnungskontrollierten thermisch-mechanischen Ermüdungsversuchen des verwendeten Warmarbeitsstahls eingebunden. Durch eine Korrelation der lokal ermittelten zyklischen Dehnungsamplitude im Schmiedegesenk mit den Daten aus den Ermüdungsversuchen konnten quantitative Aussagen über die durchführbaren Schmiedezyklen bis zum Versagen infolge Rissbildung gemacht werden.

Abbildung 5.19 zeigt das Ergebnis einer rechnergestützten Standmengenabschätzung für einen Schmiedeprozess, bei dem das Untergesenk aus dem Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 (EN 1.2367) gefertigt ist. Links ist die numerisch bestimmte lokale Standmenge für das Untergesenk dargestellt. Der real auftretende Riss (rechts) entwickelte sich genau in dem Bereich, für den die Simulation die geringste Lebensdauer vorhergesagt hatte.

Auf Basis der Berechnungsergebnisse aus der Versagenssimulation sind bessere und effizientere Auslegungen von Werkzeugkonzepten sowie Stadienfolgen möglich.

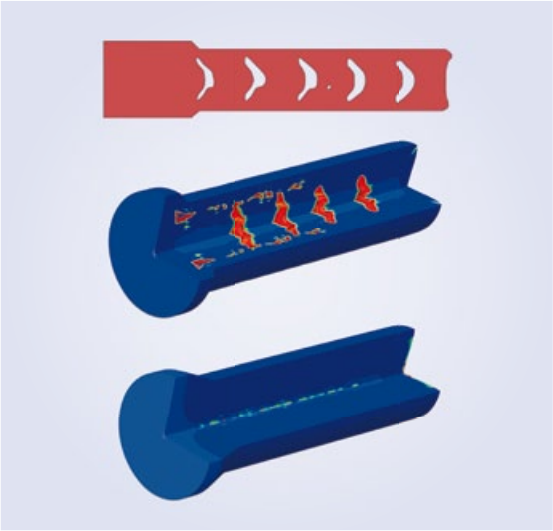


**Abbildung 5.20:** Ausbildung von „Chevron-Cracks“: Experiment (oben) und berechnete Porendichte (rot = hoch, blau = niedrig) vor (Bildmitte) bzw. nach Optimierung der Werkzeuggeometrie (unten) beim Voll-Vorwärtsfließpressen

### 5.2.8 Beherrschung von Materialschädigungen bei Kaltmassivumformprozessen

Aufgrund der Komplexität moderner Werkstoffe und der hohen Anforderungen an die fertigen Bauteile sind fortschrittliche Simulationsmethoden zur präzisen Vorhersage des Werkstoffverhaltens im Fertigungsprozess und der resultierenden Bauteileigenschaften unabdingbar. Mit der Modellierung der Mechanismen, die zur Bildung von inneren Schäden durch lokale Überschreitung des Umformvermögens metallischer Werkstoffe bei Massivumformprozessen führen können, beschäftigt sich D. Helm [HELM 1]. Dadurch können beispielsweise früh Aspekte wie Qualität, Kosten und Prozesssicherheit in den Entwicklungsprozess unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Umformgrenzen integriert werden. So können beispielsweise beim Voll-Vorwärtsfließpressen im kalten Zustand bei ungünstiger Prozessführung massive Schäden im Werkstück in Form sogenannter „Chevrons“ (Abbildung 5.20) auftreten. Ihre Entwicklung kann durch geeignete Gestaltung des Umformprozesses signifikant beeinflusst werden. Ziel der am Fraunhofer IWM in Freiburg laufenden Forschungsarbeiten ist es, für Kaltfließprozesse mit Hilfe weiterentwickelter numerischer Simulationsmethoden zum einen die Schädigungsentwicklung vorauszuberechnen und darauf aufbauend geeignete Parameter beziehungsweise eine optimierte Werkzeuggeometrie zu identifizieren, um den beschriebenen Fehler zu vermeiden.

Als Ansatzpunkt dienen mechanismenbasierte Materialmodelle für die Analyse und Optimierung von Umformprozessen. Diese modellieren die physikalische Ursache der Schädigung, die aus der Bildung, dem Wachstum und dem Zusammenschluss von Poren resultiert, auf Basis der Mikromechanik. Am Fraunhofer IWM wurde das Problem mit Hilfe eines eigens weiterentwickelten Modells nach Gologanu-Leblond angegangen, das den Einfluss komplexer Deformationspfade auf die Porenentwicklung und die Porenform berücksichtigt.

Nach Anpassung der Modellparameter zeigte sich, dass der Ausgangszustand des zu optimierenden Umformprozesses zutreffend beschrieben wird. Die von der Simulation vorausberechnete Periodizität

und Form der „Chevrons“ stimmen mit den Ergebnissen praktischer Versuche gut überein. Ferner gibt das Modell auch zwei aus der Praxis bekannte Effekte – Oberflächenwelligkeit und Abfall des Presskraftverlaufs im Zuge der Bildung der „Chevrons“ – korrekt wieder. Weitergehende Simulationsstudien zeigten, dass durch eine Änderung der Werkzeuggeometrie bei gleichbleibendem Verjüngungsgrad die Porendichte nur geringfügig ansteigt, wodurch „Chevrons“ effektiv vermieden werden. Trotz dieser Erfolge für einen vergleichsweise einfachen einstufigen Massivumformprozess stellt die Vorhersage der Schädigungsentwicklung in mehrstufigen Kaltmassivumformprozessen mit komplexen und von der Prozessgeschichte abhängigen Deformationspfaden eine Herausforderung dar, die weitere Forschungsarbeiten erfordert.

### 5.2.9 Entwicklung von ganzheitlichen Ansätzen

Aktuelle Trends bei Umformprozessen metallischer Werkstoffe beinhalten sowohl die Umformung von Leichtbaukomponenten als auch die Steigerung der Produktvielfalt. Gleichzeitig wird eine Verbesserung der Energieeffizienz in der Produktion angestrebt. Genauso wird die Kontrolle der vielseitigen Prozesse sowie auch deren Verkürzung, Flexibilisierung und Integration berücksichtigt. Darüber hinaus besteht eine spannende Aufgabe für die Umformtechnologie darin, nicht nur die Produktqualität vorherzusagen, sondern auch die Entwicklung der Gefügeausbildung zu beherrschen. Einer der Schwerpunkte der Forschungsarbeiten am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) besteht darin, eine Methode

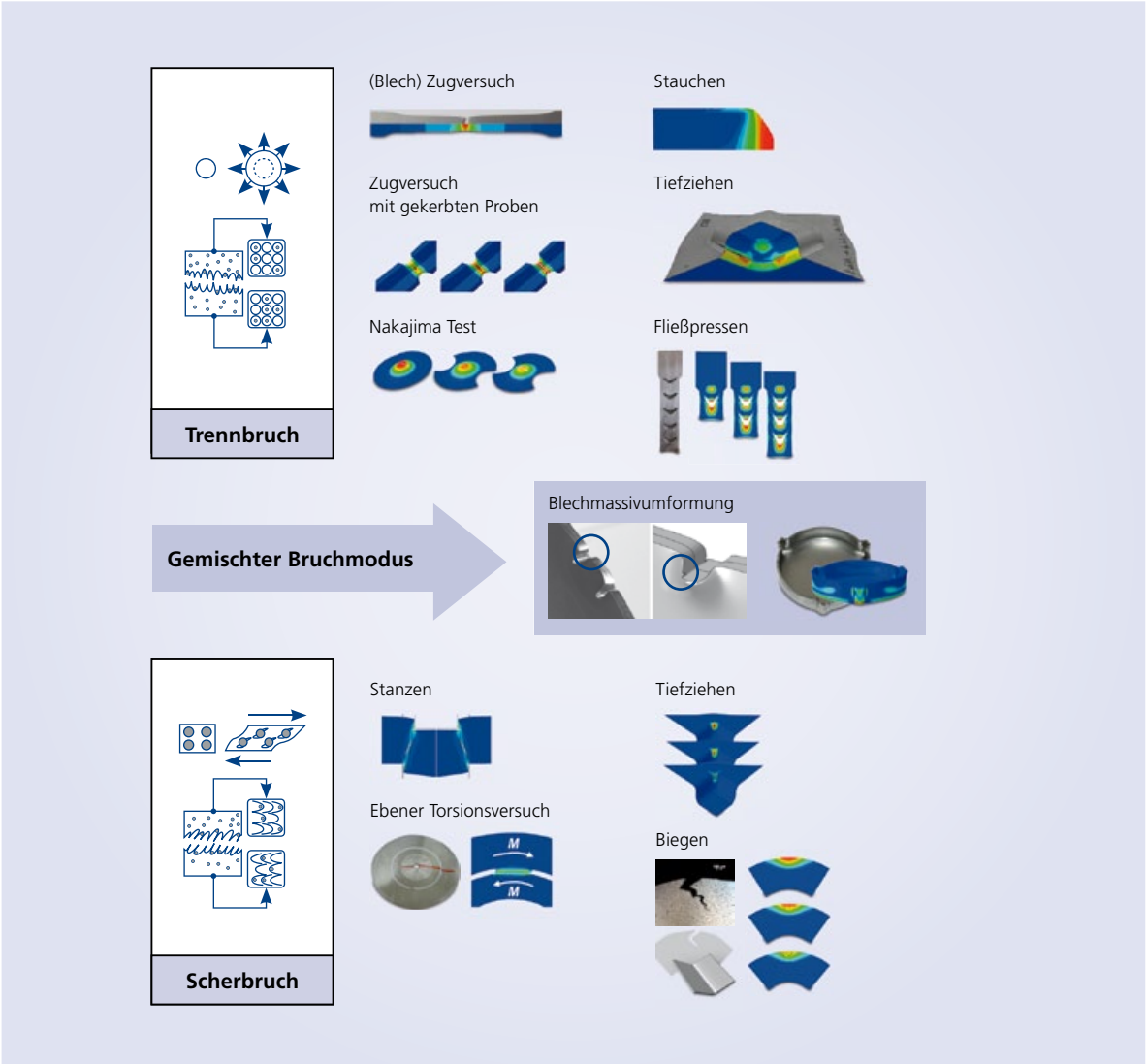



**Abbildung 5.21:** Untersuchungen am IUL zur Simulation der Schädigungsentwicklung anhand verschiedener Blech-, Massiv- und Blechmassivumformprozesse unter Verwendung eines ganzheitlichen Modellansatzes

für die verschiedenen in der Entwicklungsphase von Umformprozessen auftretenden Aufgabenstellungen zu erarbeiten [SOYA 1]. Diese basiert auf hochentwickelten und zugleich effizienten numerischen Modellen zur Abbildung des Materialverhaltens und setzt auf einem ganzheitlichen Finite-Elemente-Ansatz auf. Das Aufgabengebiet erstreckt sich dabei von der Analyse mehrstufiger Blech-, Massiv- und Blechmassivumformprozesse bis hin zur Vorhersage von Produkteigenschaften einschließlich der Bewertung des Crash-Verhaltens und der Lebensdauer. Die Anforderungen, welche sich aus einem Modell- oder Plattformwechsel ergeben, werden bewältigt, indem jeweils ausgetüftelte physikalische Materialmodelle zum Einsatz kommen, die die lokalen Veränderungen des Werkstoffzustands realitätsnah beschreiben. Typischerweise werden dabei das Verfestigungsverhalten, die Schadensakkumulation oder die Veränderungen von Texturen betrachtet. Dies ermöglicht die Anwendung von einheitlichen Modellen für verschiedene Umformverfahren. Weiterhin können das verbleibende Umformvermögen des Werkstoffs abgeschätzt sowie beabsichtigte oder unbeabsichtigte Materialtrennungen (z. B. bei Schnitt-, Scher- oder Stanzvorgängen) modelliert werden (Abbildung 5.21). Darüber hinaus wird die genaue Vorhersage von Produkteigenschaften – beispielsweise Festigkeit oder Zonen mit kritischer Schadensakkumulation – nach dem Produktentstehungsprozess möglich. Auch stehen diese Daten wiederum als Eingangsgrößen für die Vorhersage des Crashverhaltens sowie der Lebensdauer zur Verfügung. Jede Eigenschaft kann gezielt eingestellt werden, wenn sie anfangs als Zielgröße für den Auslegungsprozess definiert wurde. Zur Absicherung dieses ganzheitlichen Ansatzes führt das IUL experimentelle Untersuchungen durch, auf deren Basis die jeweiligen Werkstoffeigenschaften charakterisiert werden. Dies erfolgt mit dem Ziel, bestehende Produktionsprozesse zu optimieren oder neue Prozesse zu entwickeln. Die Entwicklung von bisher nicht verfügbaren bzw. nur wenig ausgeprägten Schnittstellen zwischen der Simulation mehrstufiger Umformprozesse, der Vorhersage von Produkteigenschaften und der Produktlebensdauer wird dabei fortlaufend vorangetrieben.

# Wirtschaftliche Aspekte

H. Ade und J. Heizmann [UMFR 1] gingen im Rahmen einer vom Industrieverband Massivumformung e. V. durchgeführten Erhebung bei Mitgliedswerken der Frage nach, welchen Nutzen die Unternehmen der Branche den von ihnen genutzten Programmen zur Simulation von Massivumformprozessen beimessen. Dazu wurde ein Fragenkatalog zu monetär und nicht-monetär bewertbaren Aspekten der Softwareanwendung entwickelt. Mit dieser Erhebung sollte ein Überblick über die Anwendung von Umformsimulationssoftware in der deutschen Massivumformbranche gewonnen werden. Darüber hinaus wurde in Aussicht gestellt, dass die Rückmeldungen einen wertvollen Beitrag zur Bewertung des Nutzens von Umformsimulationssoftware in den Unternehmen leisten. Es wurden knapp 140 Unternehmen per Fragebogen angeschrieben, wovon ca. ein Fünftel Informationen zur Verfügung gestellt hat. Im Rahmen der Umfrage wurden folgende Themenbereiche adressiert:

- Software-Einführung (Gründe und Kriterien für die Auswahl der Software),
- Software-Anwendung (Umform- und werkzeugtechnische Anwendungsgebiete),
- Anwendungszeitraum (Budget und eingesetzte Hard- & Software),
- Einsparungen aufgrund von FEM-Anwendung (Parameter wie Zeit, Kosten u. a.),
- Produktion, Prozessentwicklung und Kosten (Verfahren, Werkstoffe, Kostenverteilung),
- Trends (Erwartungen der Unternehmen, die Simulation einsetzen, und Erwartungen der Kunden).

Ergebnisse der Unternehmensbefragung:

Die Umsatzgrößenverteilung der antwortenden Firmen entsprach dem typischen Bild der Branche: Mit rund 56 % dominierten kleinere Unternehmen mit einem Jahresumsatz von unter 100 Mio. Euro, 30 % lagen im Bereich zwischen 100 und 200 Mio. Euro Jahresumsatz und lediglich 15 % waren in der Spitzengruppe mit mehr als 250 Mio. Euro Jahresumsatz angesiedelt.

Die ermittelten Ergebnisse können somit als repräsentativ für die Branche eingestuft werden.

Besonders positiv fiel das Urteil der Praktiker bezüglich der Erfüllung von Erwartungen an den Nutzen der eingesetzten Software aus, wobei die Verkürzung der Prozessentwicklungszeiten im Vordergrund stand (Abbildung 6.1). Diesbezüglich erwarteten nahezu alle antwortenden Unternehmen einen deutlichen Nutzen. Zu diesem Punkt gab es gar keine

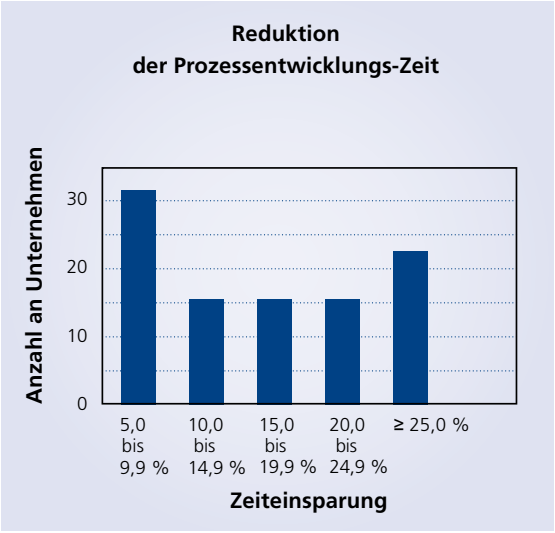



**Abbildung 6.1:** Eine deutliche Mehrheit der befragten Unternehmen versprach sich durch den Einsatz von Simulationssoftware eine Verringerung der Prozessentwicklungszeit

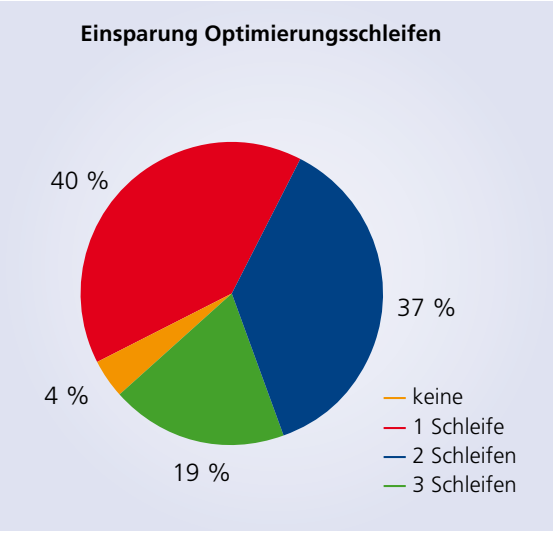



**Abbildung 6.2:** Fast alle an der Umfrage teilnehmenden Firmen konnten durch den Einsatz von Simulationssoftware mindestens eine Optimierungsschleife einsparen

Negativaussagen und ganze 75 % volle Zustimmung, wobei fast 70 % die Vorteile im zweistelligen Prozentbereich ansiedelten. Fast ebenso hoch war mit 52 % die Einschätzung, dass die Prozess-Entwicklungskosten um mehr als 10.000 Euro pro Bauteil gesenkt werden. Weitere wichtige Gründe für die Einführung waren die Verbesserung der Innovationskraft des Unternehmens, die Verringerung der Stillstandszeiten der Pressen, die Verbesserung der Ausbildung der Mitarbeiter und die Reduzierung der Werkzeugkosten. Bezüglich des Nutzens der eingesetzten Programme fiel die positive Beurteilung der Reduktion der Zahl an Entwicklungsschleifen bei neuen Bauteilen auf, Abbildung 6.2.

Weitere Vorteile des Softwareeinsatzes wurden bezüglich Einsparungen am Einsatzgewicht (Abbildung 6.3) und an den Werkzeugkosten gesehen.

Beim Einsatz stehen vor allem die Erzielung einer besseren Füllung, die Verringerung der Faltenentstehung, die Reduzierung des Einsatzgewichts sowie die Ermittlung des Kraft- bzw. Arbeitsbedarfs im Vordergrund. Großes Interesse gilt auch der Analyse des Faserverlaufs sowie der Entstehung von Rissen. Berechnungen von Eigenspannungen und Bauteilverzug sowie Analysen mit Blick auf Härte und Gefügestruktur werden dagegen seltener durchgeführt. Bei der Werkzeugberechnung fokussierte sich das Interesse vor allem auf die Aspekte Reduzierung des Verschleißes sowie Versagensanalyse – zumal die Werkzeugkosten in der Massivumformung i. d. R. einen deutlichen Anteil an den jeweiligen Stückkosten des Bauteils ausmachen (Abbildung 6.4).

Mit Blick auf die Zukunft erwartet die große Mehrheit der Teilnehmenden, dass ihre Kunden in Zukunft noch kürzere Entwicklungszeiten einfordern, während die Entwicklungskosten steigen werden. Ganz ähnlich stellt sich auch die Erwartungshaltung bezüglich der Vielfalt der im Rahmen von Entwicklungen zu präsentierenden Varianten dar: Hier erwarten 93 % einen Anstieg. Volle 100 % der befragten Unternehmen erwarten, dass die Bedeutung der Simulation weiter zunehmen wird. Entsprechend hoch sind daher auch die Zustimmungswerte betreffend der Bereitschaft, in Zukunft die Anwendung solcher Simulationswerkzeuge sowohl in der Breite, vor allem aber auch bezüglich der Tiefe des Einsatzes im Unternehmen auszuweiten.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass nicht nur technische Verbesserungen, sondern auch wirtschaftliche Vorteile wie kürzere Entwicklungszeiten oder verringerte Herstellkosten letztlich ebenso den Abnehmern von massivumgeformten Komponenten zugutekommen. Schließlich sorgt in unserer funktionierenden Marktwirtschaft der Wettbewerb automatisch dafür, dass Vorteile jeglicher Art nicht beim Hersteller allein verbleiben, sondern in Form von Preisnachlässen oder Produktverbesserungen seinen Kunden weitergereicht werden.

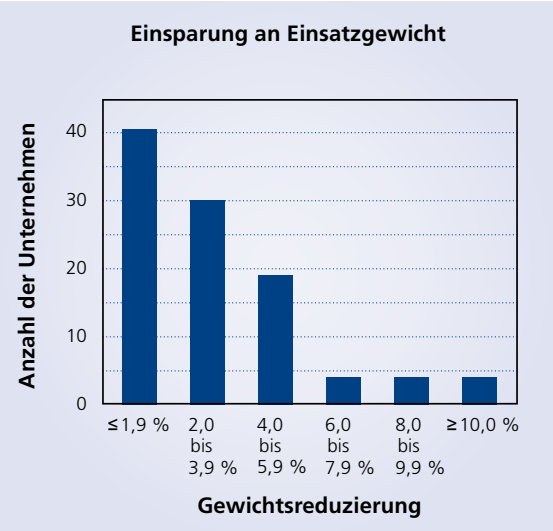



**Abbildung 6.3:** Die Mehrzahl der Anwender konnte mit Hilfe der Simulationsprogramme das Einsatzgewicht deutlich senken und damit die Ressourceneffizienz merklich erhöhen

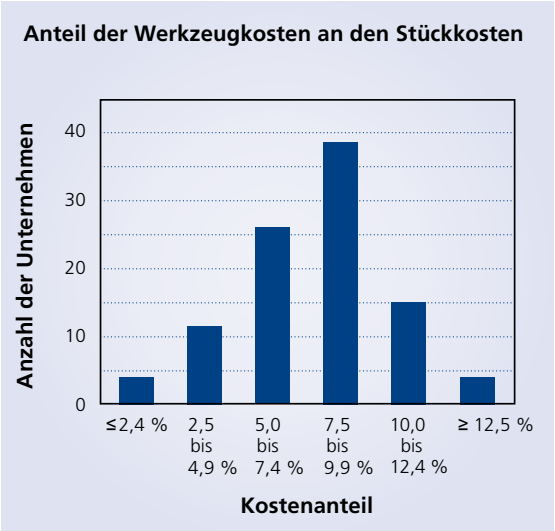



**Abbildung 6.4:** Der Werkzeugverschleiß bzw. die damit verknüpften Kosten haben einen erheblichen Einfluss auf die Kosten pro Stück

# Ausblick



Der Einsatz von Simulationssoftware für die Auslegung und Optimierung von Massivumformprozessen hat sich im Verlauf der Jahre zu einer erfreulichen Erfolgsstory entwickelt. Sowohl die Betriebe der Massivumformung als auch ihre Kunden erzielten dabei ständige Verbesserungen. Dies betrifft sowohl technische Fortschritte bezüglich der Gebrauchseigenschaften der Produkte als auch Leistungssteigerungen bei den Prozessen. Die Ausprägung dieser Erfolge ist dabei ebenso vielfältig wie die Produkte, die mit Hilfe der Massivumformung hergestellt werden. Besonders im Vordergrund stehen dabei Aspekte wie Leichtbau, Ressourceneffizienz sowie die Einsparung von Kosten. Hiervon profitieren letztlich alle an der Wertschöpfungskette Beteiligten – der Massivumformer ebenso wie seine Kunden und im Endeffekt auch der Verbraucher, in Form eines Extras an Produktleistung für das gleiche Geld oder von gleicher Produktleistung zu geringeren Preisen.

Eine wesentliche Bedeutung kommt der Simulation auch im Bereich der Ressourcenschonung durch Weiterentwicklung von Legierungskonzepten zu. Viele Legierungselemente sind nicht nur teuer, auch der Zugang zu ihnen wird immer schwieriger. Bei der Entwicklung neuer, leistungsstarker und gleichzeitig ressourcenschlanker Legierungskonzepte spielt der Einsatz von Simulationsprogrammen eine immer größere Rolle. Mit Hilfe numerischer Modelle zur Beschreibung der Wechselwirkungen verschiedener Legierungszusätze mit dem Kristallgitter des Eisens lassen sich neue Stähle und Prozesse entwickeln, die unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit gleichzeitig hohen mechanischen Anforderungen gerecht werden. Dank dieser Errungenschaft kann der Massivumformer künftig durch Anpassung des Legierungskonzepts schneller auf Versorgungs- und Preisänderungen reagieren.

Einen weiteren – wenn auch indirekt auf den Einsatz von Simulation zurückzuführenden – Faktor stellt der erhebliche Zuwachs an Entwicklungskompetenz dar, mit dessen Hilfe der Massivumformer im Rahmen partnerschaftlicher Produktentwicklung für seine Kunden Zusatznutzen generieren kann. Dank des Einsatzes von Simulationssoftware lassen sich nicht nur beanspruchungsangepasste Produkte entwickeln, die Produktqualität heben und die Ausschussquoten senken, sondern auch die Entwicklungs- und Produktionsprozesse schneller und effizienter gestalten. Diese Entwicklungskompetenz ist zugleich ein wesentlicher Faktor, um im internationalen Wettbewerb mit Anbietern aus Niedriglohnländern zu bestehen. Somit trägt Simulation auch dazu bei, Arbeitsplätze im Inland zu sichern.

Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren im Zuge der Weiterentwicklung der Simulationsprogramme in Kombination mit der weiteren Steigerung der Rechnerleistungen fortsetzen. Alle Anbieter von Simulationssoftware haben eine volle Pipeline an Verbesserungen und neuen Funktionen, die in den nächsten Jahren nach und nach auf dem Markt verfügbar werden dürften. Darüber hinaus beschäftigen sich zahlreiche Hochschulen sowie sonstige Forschungseinrichtungen mit wissenschaftlichen Untersuchungen, deren Ergebnisse sich früher oder später in der industriellen Praxis wiederfinden werden.

# Literaturverzeichnis




[ADAM 1] Adam, G.; Beyersdorfer, H.; Heizmann, J.: Persönliche Mitteilung, Dezember 2012

[ADL 1] Adlof, W. et al.: Schmiedeteile – Gestaltung Anwendung Beispiele, Auflage 1994/1995, Hagen, ISBN 3-928726-12-9

[BACH 1] Bachmann, M.: Persönliche Mitteilung, September 2012

[BEHR 1] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Hadifi, T.; Mielke, J.; Kazhai, M.: Persönliche Mitteilung, November 2012

[BEHR 2] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Hadifi, T.; Mielke, J.; Kazhai, M.: Persönliche Mitteilung, November 2012

[BIND 1] Binder, S.: Persönliche Mitteilung, September 2012

[BREC 1] Brecher, C.; Bäumler, S.; Tannert, M.; Bakarinow, K.: Modeling of machine and tool elasticity in coupled forging simulation. 13th round table Simulation in der Umformtechnik, 23.-26. April 2012, Bamberg, ISBN 978-3-9813814-1-2

[BRIT 1] Britzger, H.-J., Heizmann, J.: Persönliche Mitteilung, November 2012

[CARD 1] Cardinaux, D.; Bay, F.; Chastel, Y.: Coupled multi physics modelling for heat treatment processes. Proceeding of 16th UIE International Conference 2008, 19.-21. May 2008, Krakow, Poland, (http://uie-2012.ru/en/about-uie)

[DIEK 1] Diekmann, U.: StahlDat SX und Werkstoffdatenmanagement. Vortrag, Tagung „Werkstoffprüfung 2012", 6.-7. Dez. 2012, Dorint Parkhotel Bad Neuenahr, Deutschland 2012

[DIEK 2] Diekmann, U.: Calculation of Steel Data using JMATPRO. Vortrag, Comat 2012, Recent trends in structural materials, 21.-22. November 2012, Plzeň, Czech Republic

[DOKT 1] Doktorowski, A.; Biba, N.; Borowikow, A.; Wehage, D.: Simulation des Umwandlungsverhaltens niedrig legierter NiCrMo-Schmiedestähle – von der Datenanalyse zum Werkstoffmodell. International Conference on New Developments in Forging Technology in Fellbach (near Stuttgart) – Germany, on May, 17th and 18th 2011]/IFU, Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart ; DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. Ed. by Mathias Liewald

[DUCL 1] Ducloux, R.; Beraudo, C.: Simulation of press frame deflection and tilting in case of cold forging, Proceeding of 26th Jahrestreffen der Kaltmassivumformer 2012, 15.-16. February, Düsseldorf, Germany

[DUH 1] Duh, D.; Ernst, C., Klung, J.-S., Werner, M.: Implementation of materials modelling to enhance efficiency in industrial tool steel development. In: Proceedings 8th International Tooling Conference Aachen (2009), S. 763-774

[ERNS 1] Ernst, C., van Soest, F.: Von der Werkstoffsimulation zur Praxis – Entwicklung moderner Warmarbeitsstähle. In: Praktische Metallographie Sonderband 40 (2008), S. 111-116.

[ERNS 2] Ernst, C., Klung, J.-S., Pannes, W.: Novel plastic mould steel for tools with large dimensions. In: Proceedings 8th International Tooling Conference Aachen (2009), S. 399-410

[FELD 1] Feldhaus, T.: Persönliche Mitteilung, August 2012

[FELD 2] Feldhaus, T.: Persönliche Mitteilung, November 2012

[FOUR 1] Fourment, L.; Ducloux, R.; Marie, S.; Ejday, M.; Monnereau, D.; Massé, T.; Montmitonnet, P.: Mono and multi-objective optimization techniques applied to a large range of industrial test cases using Metamodel assisted Evolutionary Algorithms. Proceeding of 10th Numiform 2010, 13. - 17. June 2010, Pohang, Korea (http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1252/1/833_1?bypassSSO=1)

[GUEL 1] Guel-López, P.: Zeit sparen durch FEM. Umformtechnik 1/2012, S. 48-49.

[GUT 1] Gutmann, P.: Gangräder mit präzisionsgeschmiedeter Kupplungsverzahnung. SchmiedeJOURNAL September 2008, S. 20 - 21.

[HEES 1] Heeß, K.; et al.: Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung von Stählen, 4. Auflage 2012, Expert-Verlag, Renningen. ISBN13 978-3-8169-3067-9

[HEIZ 1] Heizmann, J.; Raedt, H.-W.: Simulationssysteme im Einsatz bei der Hirschvogel Automotive Group, MEFORM, Freiberg, 2008

[HEIZ 2] Heizmann, J.: Persönliche Mitteilung, Dezember 2012

[HELM 1] Helm, D.: Beherrschung der Umformgrenzen in Massivumformprozessen. Jahresbericht 2011, Fraunhofer IWM. http://www.iwm.fraunhofer.de/fileadmin/media/organisiert-geschaeftsfelder/prozess-und-werkstoffbewertung/formgeb-u-umformungsprozesse/pdf/JB09_7-4.pdf

[HENK 1] Henke, T.; Bambach, M.; Hirt, G.: Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Einsatz mikrostrukturbasierter Werkstoffmodelle, in: Tagungsband 28. Aachener Stahl Kolloquium, Aachen 2013

[HERR 1] Hermann, M.; Fiderer, M.: Die Entwicklung der Kaltmassivumformung von der einzelnen Umformstufe zur kompletten Prozesskette. Vortrag, 27. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 15. + 16. Februar 2012

[HIVO 1] Hirschvogel Automotive Group: Massivumgeformte Komponenten/Forged Components. Hirschvogel Holding GmbH, Denklingen, 2010

[HUBE 1] Huber, S.; Bauser, S.; Müller, H-J.; Guel-López, P.: Innovative Lösungen in der Großserien-Fertigung für nicht-rotationssymmetrische Bauteile, Vortrag, Int. Konferenz Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, 31. Mai - 1. Juni 2005, Fellbach. ISBN 3-88355-341-7

[KAWA 1] Kawalla, R.; Korpala, G.: Berücksichtigung erwärmungsabhängiger Einflüsse auf die Quantifizierung der Fließeigenschaften von Stählen und Aluminium. Institut für Metallformung Freiberg, 2012

[KLUN 1] Klung, J.-S.; Helm, D.; Prakash, A.: Prediction Of The Void Fraction Evolution During Hot Rolling Of Plastic Mould Steel. In: Proceedings 9th International Tooling Conference Leoben (2012), S. 551-560

[KLUN 2] Klung, J.-S.; Ernst, C.; Hartmann, L.: Ingot casting simulation of tool steels at Deutsche Edelstahlwerke GmbH. In: Proceedings 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging Aachen (2012), CD, Session Ingot Casting-Simulation 2

[LAAC 1] Laackmann, B.; Bläßer, U.; Gröbel, C.: Aktuelle Technologien für die industrielle Präzisionsumformung. Umformtechnik – Zukunftstechnologie mit Tradition. 18. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 2. und 3. März 2005, hrsg. v. Behrens, B.-A. (Hannover 2005), S. 169-175

[LAND 1] Landgrebe, D: Precision Forming and Machining – An often underestimated Coordination Problem – International Conference on recent Developments in Metal Forming Technology, Columbus/Ohio, October 2.-4., 2002

[LANG 1] Lange, K.: Umformtechnik – Band 1 Grundlagen, 2. Auflage 1984, 2002, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-43686-3

[LANG 2] Lange, K.: Umformtechnik – Band 2 Massivumformung, 2. Auflage 1988, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-17709-4

[LEH 1] Lehmann, M.: Persönliche Mitteilung, August 2012

[LUDW 1] Ludwig, M.; Stahlmann, J.; Groche, P.: Advanced Friction Model for Cold Forging Processes. Steelresearchjournal 2012, S. 1003-1006. 2012

[MAH 1] Friedrich, J.: Persönliche Mitteilung, August 2012

[MOSE 1] Mosecker, L.: BMBF Schlussbericht FKZ 03X0506A

[OEHL 1] Oehler, O.: Persönliche Mitteilung, Dezember 2012

[OEHL 2] Oehler, O.: Bauteilverzug in der industriellen Fertigung aus Sicht der Kaltmassivumformung. Vortrag Symposium Verzug in der Kaltmassivumformung, 27. Oktober 2011

[OLLE 1] Olle, P.: Persönliche Mitteilung, Oktober 2012

[PERE 1] Pérémé, M.; Ducloux, R. Lasne, P; Fourment, C.: Transvalor, September 2012

[RUE 1] Rütjes, U.: Persönliche Mitteilung, August 2012

[SCHA 1] Schacht, K.: Werkstoff- und Prozessentwicklung von mikrolegierten AFP-Stählen mittels gekoppelter Thermodynamik und Mikrostrukturmodellierung – Nb-Schmiedesimulation. Forschungsprojekt IGF 17246 N, Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen. 2011-2014

[SOYA 1] Soyarslan, C.; Isik, K.; Ben Khalifa, N.; Tekkaya, A. E.: Unified Approaches for Concurrent Multi-Stage Forming Design, Product Property and Service Life Prediction. Persönliche Mitteilung, Dezember 2012

[STAH 1] Stahlmann, J.; Nicodemus, E.R.; Sharmab, S.C.; Groche, P.: Surface roughness evolution in FEA simulations of bulk metal forming process. Wear 288 (2012), S. 78-87

[TRI 1] Triesch,G.; Heizmann, J.: Persönliche Mitteilung, Dezember 2012

[TWIC 1 ] Twickler, M.: Persönliche Mitteilung, Oktober 2012

[UMFR 1] Ade, H.; Heizmann, J.: SchmiedeJOURNAL Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen, Ausgabe September 2011, S. 16

[VLAS 1] Vlasov, A.; Maximov, A.; Lehmann, G.; Dedov, S.: Coupled Simulation of the System „Workpiece-Dies-Forging Press" by Finite Element Model. Tagungsband Werkstofftechnologie und Massivumformung/MEFORM 2012, 28. - 30. März 2012 in Freiberg. Acatrain e. V., Verein für Weiterbildung an der TU Bergakademie Freiberg; Institut für Metallformung

[WALT 1] Walters, J.; Foster, M.; Shankar, R.; Fiderer, M.: Die Entwicklung der Umformprozesssimulation – Verfahren zur vertikalen Integration „New Developments in Forging Technology 2011", IFU Stuttgart, S. 153-171, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2011

[WOHL 1] Wohlmuth, M.: Persönliche Mitteilung, November 2012

[WOHL 2] Wohlmuth, M.; Schafstall, H.: Trends in der Prozesssimulation – Vision und Wirklichkeit, Tagungsband 31. Verformungskundliches Kolloquium 2012, 25.-28. Februar 2012, Planneralm, ISBN 978-3-902078-17-9

# Bilderverzeichnis

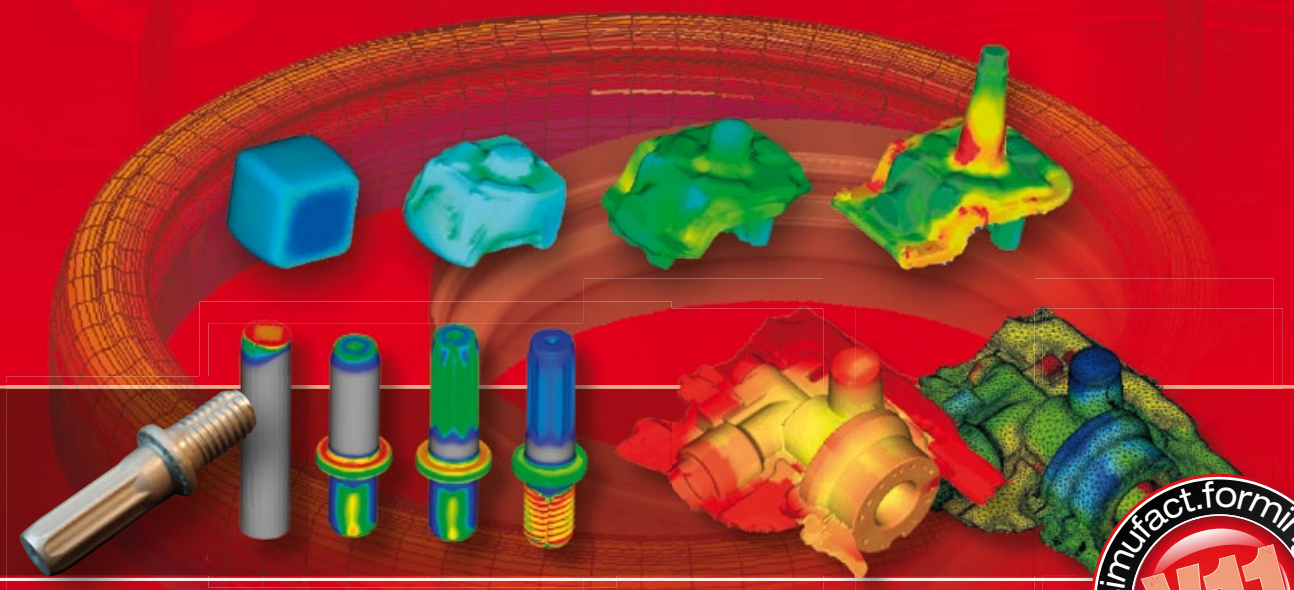
| | |
|---|---|
| Titelbild | Bauteilabbildungen: Hirschvogel Automotive Group<br>Zeichnung: CDP Bharat Forge GmbH<br>Gestaltung: simplon.<br>Agentur für Werbung und Design,<br>Film, Audio und neue Medien |
| Abbildung 2.1, 2.3, 3.1, 3.3, 3.18, 4.6, 4.10, 4.13, 4.14, 4.19 | Hirschvogel Automotive Group |
| Abbildung 2.2, 2.4, 4.9, 5.6 | simufact engineering gmbh |
| Abbildung 3.2, 3.4, 3.5, 4.8 | CDP Bharat Forge GmbH |
| Abbildung 3.6, 3.7, 4.7 | Seissenschmidt AG |
| Abbildung 3.8, 3.9 | Otto Fuchs KG |
| Abbildung 3.10, 3.11, 3.15, 3.16, 3.17 | SONA BLW Präzisionsschmiede GmbH |
| Abbildung 3.12, 3.13 | Neumayer Tekfor Holding GmbH |
| Abbildung 3.14 | MAHLE Motorkomponenten GmbH |
| Abbildung 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 | Deutsche Edelstahlwerke GmbH |
| Abbildung 4.5, 4.18, 5.5, 5.7, 5.9 | Transvalor S.A. |
| Abbildung 4.11, 4.12 | HEYCO-Werk Heynen GmbH & Co. KG |
| Abbildung 4.15 | [K. Heeß] |
| Abbildung 4.16, 4.17 | Schondelmaier GmbH Presswerk |
| Abbildung 5.1 | QuantorForm Ltd. |
| Abbildung 5.2 | Kistler Automotive GmbH |
| Abbildung 5.3 | CPM GmbH |
| Abbildung 5.4 | GMT Gesellschaft für Metallurgische Systeme mbH |
| Abbildung 5.8 | SFTC/Kistler Automotive GmbH |
| Abbildung 5.10, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 | Industrieverband Massivumformung e. V. |
| Abbildung 5.11, 5.12 | Metatech GmbH |
| Abbildung 5.13 | Institut für Metallformung (IMF) |
| Abbildung 5.14 | Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) |
| Abbildung 5.15 | Institut für Bildsame Formgebung (IBF) |
| Abbildung 5.16 | Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) |
| Abbildung 5.17, 5.19 | Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) |
| Abbildung 5.18 | Werkzeugmaschinenlabor (WZL) |
| Abbildung 5.20 | Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (FhG-IWM) |
| Abbildung 5.21 | Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) |

# simufact.forming

effizient - vielseitig - leistungsstark

## Produktionsprozesse in der Umformung optimieren

mit höchster Qualität zum Erfolg



mit freundlicher Genehmigung der Sieber Forming Solutions GmbH

simufact.forming V11 NEW RELEASE

## Simufact.forming 11:

Mehr Effizienz und neue Modellierungsmöglichkeiten für die Umformsimulation

- **Für den Praktiker in der Fertigung –** *weiter verbesserte Bedienoberfläche und vereinfachte Bedienerführung*
- **Neue Module für Ringwalzen und Freiformschmieden –** *anwendungsspezifische Funktionen für Spezialverfahren nutzen*
- **Schneller und sicherer Datenaustausch mit CAD –** *alle Standard- und viele Direktschnittstellen*
- **Wärmebehandlung und Kalkulation von Materialeigenschaften –** *auf der Basis von Simufact.premap*
- **Genauere Simulationsergebnisse –** *durch die Integration von hochwertigen analytischen Materialdaten (JMatPro®)*
- **Innovatives Parallel Computing –** *für schneller verfügbare Ergebnisse und deutlich umfangreichere Simulationsmodelle*
- **Umfangreiche Möglichkeiten für die Prozessoptimierung –** *für die Definition der besten Prozessauslegung*

**Simufact.forming** deckt alle Anwendungsbereiche des Schmiedens, Walzens und der Kaltumformung ab. Spezielle Module zur Simulation von Ring- und Querkeilwalzprozessen sowie von Freiform- und Radialschmiedeprozessen komplettieren das Funktionsspektrum.

Simulieren Sie finale Bauteileigenschaften – oder ganze Prozessketten. Simufact.forming bringt Sie der ganzheitlichen Betrachtung und prozessübergreifenden simulatorischen Abbildung gesamter Prozessketten wieder ein Stück näher.

***register online now!***

**14. RoundTable** Simulating Metal Forming
9.-12. April 2013, Heidelberg, Germany

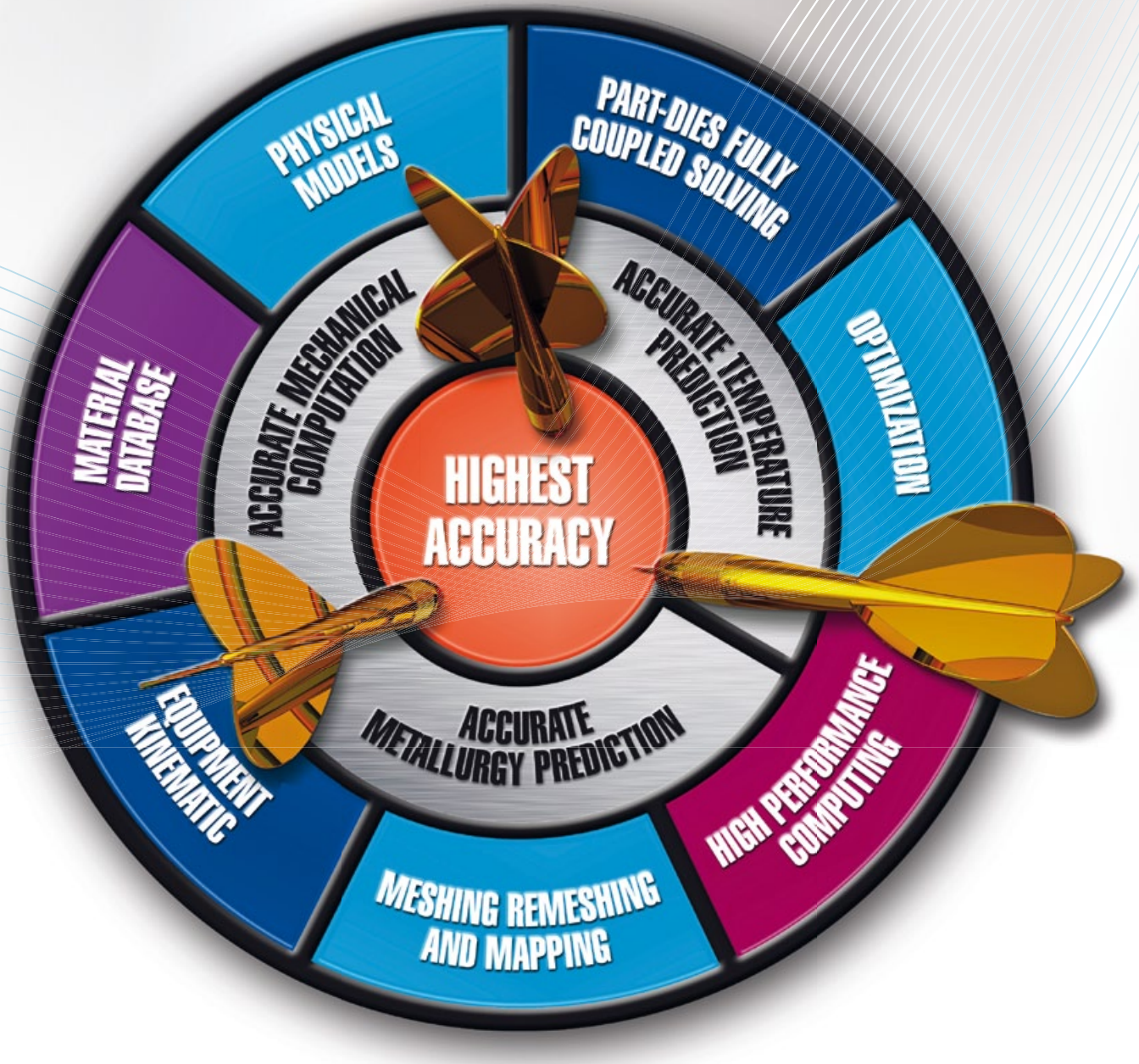
simufact
Simulating Manufacturing

www.simufact.de

TRANSVALOR - NUMERISCHE SIMULATION
FÜR DIE MASSIVUMFORMUNG

# FORGE

## FIRST TIME RIGHT




Wir, bei Transvalor, verstehen Ihre Herausforderungen, um geschmiedete Komponenten zu liefern. Seit fast 30 Jahren gilt FORGE als die perfekte Lösung für die Vorhersage von in Ihrer Werkstatt täglichen Fragen und hilft so Ihren Designern, Metallurgen und R&D-Ingenieuren bei der Überwindung technischer Probleme und bei der Optimierung Ihrer Verfahren.

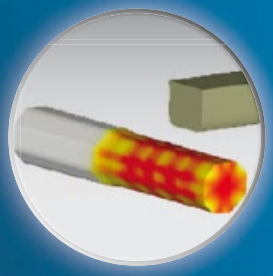
TRANSVALOR

MATERIAL FORMING SIMULATION

TRANSVALOR S.A. - Parc de Haute Technologie - 694, avenue du Dr. Maurice Donat - 06255 Mougins Cedex - France
Phone: +33 (0)4 92 92 42 00 - Fax: +33 (0)4 92 92 42 01 - Email: marketing@transvalor.com

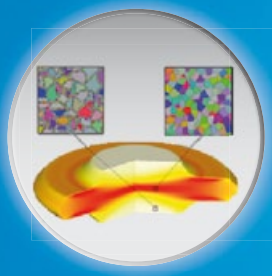
# Umformsimulation für die Praxis

Freiformrecken



Ringwalzen

Analyse des Mikrogefüges



Zerspanen

Wärmebehandlung
Abschrecken

Mechanisches Fügen

**Was**

- Schmieden, Fließpressen, Walzen, Stangpressen, mechanisches Fügen
- Kalt- und Warmumformung
- In Kombination mit Wärmebehandlung und Rekristallisation
- Gekoppelte Werkzeugbelastungsanalyse
- Optimierung mit DOE
- Integrierte Prozesskettensimulation von Vorformoperation über Schmieden zur Wärmebehandlung
- Inverse Berechnungsmethoden zur Materialparametercharakterisierung

**Warum**

- Kosten reduzieren
- Entwicklungszeiten reduzieren
- Testwerkzeuge einsparen
- Prozessspezifisches Grundverständnis aufbauen
- Zukunft vorhersagen
- Weltweit erprobt

**Kistler Instrumente GmbH**, Daimlerstr. 6, 73760 Ostfildern
Tel. +49 711 34 070, Fax +49 711 34 07159, deform@kistler.com

www.deform.com

DEFORM™
Design Environment for FORMing

www.kistler.com

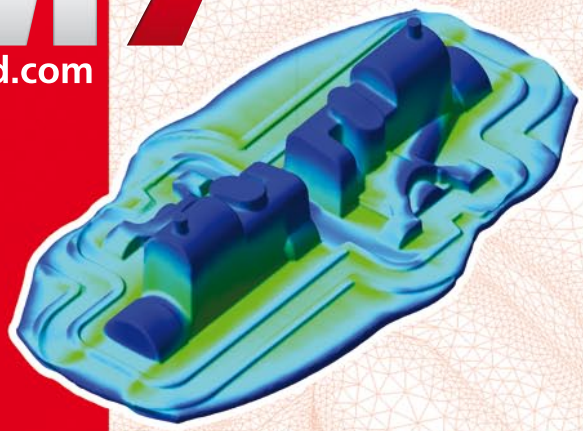
KISTLER
measure. analyze. innovate.

# QUANTOR FORM

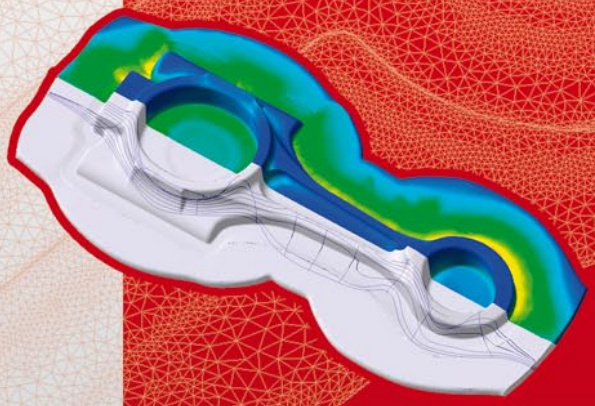
# QFORM 7

www.qform3d.com

## Ultimate simulation tool for industry, research and education



- 2D & 3D simulation
- Import geometry from any CAD system
- Database of materials (more than 1000 grades)
- Database of equipment and lubricants
- Optimization for multicore and multi-CPU systems
- Results output from the first moment of simulation
- Simulation of the solid and assembly tool
- Coupled thermal problem
- Coupled mechanical problem
- Thermoelastic problem
- Any type of tool movement
- Microstructure and heat treatment
- User defined subroutines



**Represented in Germany by GMT mbH.**
qform@gmt-berlin.com
info@qform3d.com
+49 (3338) 33421815

Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon: +49 2331 958830
Telefax: +49 2331 958730

E-Mail: orders@metalform.de

Weitere Informationen unter
**www.metalform.de**

ISBN: 978-3-928726-30-6

Den Veröffentlichungen des Industrieverbands liegen die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung der im Industrieverband Massivumformung e. V. zusammengeschlossenen Unternehmen zugrunde.

Stand: April 2013

EI-Sim-0413-20sim