

# **Konstruktionsbegleitende Modellierung von Schmiedeprozessen**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Matthias Michael  
geboren am 16.12.1965 in Wurzen

1999

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Doege

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Poll

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. G. Redeker

Tag der Promotion: 22.09.1999

*Everything is vague to a degree you do not realize till you have tried to make it precise.*

Bertrand Russell

© Matthias Michael, Hannover 1999

Matthias Michael  
Weissdornweg 3b  
30900 Wedemark  
Email: matt@mmichael.de

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-00-005174-0

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie als Oberingenieur am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover (IFUM).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege, dem Institutsdirektor, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion. Er hatte großes Vertrauen mir und meiner Arbeit gegenüber und hat besonders auch in schwierigen Zeiten stets an den Erfolg geglaubt. Seine wertvollen Hinweise trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll, dem Leiter des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie der Universität Hannover, danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und für die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker, dem Leiter des Instituts für Qualitätssicherung der Universität Hannover, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herrn Dr.-Ing. Hubertus Mathieu und Herrn Dr.-Ing. Wilfried Beneker bin ich für die exzellente Vorarbeit zu Dank verpflichtet. Sie legten die Grundlagen für das Gelingen dieser Arbeit.

Den Kollegen Jürgen Dohmann, Christoph Kaminsky, Dr.-Ing. Michael Muckelbauer, Ingo Neubauer und Martin Wienströer danke ich für die konstruktive Durchsicht meiner Arbeit.

Den Kollegen und Kolleginnen, die meinen Weg begleitet haben, danke ich für die gemeinsame Zeit und die gute Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch Guido Dreyer, der mich in meiner Zeit als Oberingenieur des IFUM häufig entlastete und mir damit den Freiraum für die Fertigstellung meiner Dissertation verschaffte.

Besonderer Dank gebührt meiner Frau Annelie und meinen Töchtern Maria und Johanna für ihre Unterstützung und Rücksichtnahme, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Hannover, 22. September 1999



# Abstract

Matthias Michael

## **Konstruktionsbegleitende Modellierung von Schmiedeprozessen**

Schlagwörter: Schmieden, Simulation, Prozessmodellierung

Im Rahmen der Dissertation wurde ein Simulationssystem PRINZ mit dem Ziel entwickelt, im Konstruktionsprozess frühzeitig Informationen über den Schmiedeprozess zu erhalten. Der bisherige Weg, die reine Modellierung von Geometrie mit Hilfe von CAD, wird durch den Einsatz von Simulationstechniken ergänzt durch die Prozessmodellierung, welche sich wiederum optimierend auf den Geometriemodellierungsprozess auswirkt. Diese Wechselwirkung ist nun möglich, ohne dass aufwendige Versuche auf Umformmaschinen notwendig werden.

Bei Anwendung des Softwaresystems wird der Konstrukteur mit einer neuen Vorgehensweise bei der Entwicklung der Stadienfolge konfrontiert. Beibehalten wird die von der Fertiggeometrie ausgehende, rückwärtsgerichtete Vorgehensweise, d.h. ausgehend von den Fertigschmiedewerkzeugen werden sukzessive Vorformen und Vorformoperationen entworfen, bis die komplette Stadienfolge vom einfachen Stangenabschnitt bzw. Knüppel bis zum Schmiedestück konstruiert ist. Dabei wurde bisher meist auf der Basis von langjährigen Erfahrungen eine möglichst optimale Gestaltung für jede Einlegeform gesucht. Unter Nutzung von PRINZ können nun alle Entwicklungsschritte am CAD-System durch Simulation verifiziert und optimiert werden. Während der Entwicklung stehen damit neue, qualitativ hochwertige Informationen im Konstruktionsprozess zur Verfügung, die für eine erfolgreiche Arbeit unerlässlich werden. Die Schleife [Entwicklung – Versuch – Entwicklung] kann dabei durchbrochen werden.

PRINZ erlaubt die Berechnung von Schmiedeprozessen von Langteilen ohne Biegeanteil mit sehr guter Berechnungsgenauigkeit. Der Fokus der Entwicklung lag auf kurzen Rechenzeiten, um die Konstruktionsintegration zu erreichen. Dieses Ziel wurde erreicht. Durch die Nutzung der STL-Schnittstelle für die Datenaufbereitung kann PRINZ mit jedem gängigen Volumenmodellierer genutzt werden. Das Zusammenwirken mit Flächenmodellierern wie Euklid gestaltete sich aufgrund des fehlerhaften STL-Daten-Exports dieser Systeme schwierig. Die Pilotsoftware läuft auf gängigen Windows NT – PC.

Die Benutzerschnittstelle von PRINZ ist für den Gebrauch im Bereich der Konstruktion entworfen. Für die Benutzung ist Erfahrung notwendig, Grundlagenkenntnisse im Bereich des Einsatzes von numerischen Berechnungsverfahren sind nicht notwendig.

PRINZ bietet verschiedene Analysemethoden, die über die Analysesoftware PRINZ/DAT genutzt werden können. Neben Stofffluss- und Kontaktanalyse kann die Anlagerungsverteilung und die Verteilung der Verdrängung über der Oberfläche des Schmiedeteils genutzt werden. Anlagerungs- und Verdrängungsverteilung stehen sowohl für den gesamten Umformprozess als auch für einzelne Umformschritte zur Verfügung. Die approximierte Umformkraft kann jederzeit, aufgetragen über den Stößelweg, abgerufen werden.

Für die Anbindung der Software an das Internet können automatisch animierte Bitmaps erzeugt werden. Dadurch ist die Auswertung der Simulationsergebnisse ohne die Installation von PRINZ/DAT möglich. Der Aufwand zum Transport der Daten verringert sich deutlich.

# Abstract

Matthias Michael

## **DESIGN INTEGRATED MODELLING OF FORGING PROCESSES**

Key words: forging, simulation, process modeling

The design procedure for hot forging processes is usually based on experimental and empirical data. This results in iteration loops, since the design process is highly uncertain due to the non-linear behavior of the workpiece during the manufacturing process.

The necessary try-out phase for the forging tools and preforms (physical prototyping) is best simulated on a computer instead of using actual presses in the forging shop. These machines should be kept for production. The difficulty is that the only way traditionally available to get the necessary information on the non-linear forging process is to run forging experiments (try-out) and to continually modify the last try-out. During the design phase, existing methods of 3D Finite Element Simulation for non-linear calculations are often even slower and more expensive than the try-out method.

The main objective when developing the PRINZ (Principle of Minimal Restraint) simulation software was a significant cost reduction and quality improvement of the development and testing of forging processes. A reduction of the time required to production has a high potential for cost saving. A key objective was the implementation of new, efficient methods for simulating complete manufacturing sequences and tool design. The necessary shop floor testing of forging tools and preforms should be done in a computer instead of on presses in the forging shop. These machines should be kept for production.

Solving such tasks is only possible with efficient simulation systems. Traditional 3D simulation systems (FEM) often need several hours or even weeks to calculate the process without currently having a guarantee of success. Even though there is a significant need for integrated and fast design and simulation tools, companies in the forging sector often do not use 3D simulation software due to the lack of suitability.

For this reason, a better approach is to use a combination of elementary methods for rapid preliminary design of forming sequences and to use extensive time-consuming computation approaches such as FEM for concerted problem analysis and optimization, especially for large production runs or for the design of precision die forging processes. To take an example, the technological achievement of tolerances in the IT9 range and better requires revision of the entire process chain, i.e. from stock material through to the finished product. For such applications it is often necessary to compute the thermal influence on the dimensional accuracy, the rebound of the tools and other such phenomena using FEM.

During the preliminary design of the forming sequence, computation of the global material flow is usually sufficient to allow prediction of the type and number of forming operations which are required. If the material flow can be simulated quickly, it should be possible to design the forming sequence even before forging tests are carried out. This allows the number of preliminary tests to be reduced, and shortens the preparatory phase before the production can begin.



# Inhalt

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Einleitung .....  | 1  |
| 2       | Stand der Kenntnisse .....  | 3  |
| 2.1     | Gesenkschmieden und Stadienfolge .....  | 3  |
| 2.2     | Werkstofffluss .....  | 4  |
| 2.3     | CAD-Einsatz in der Massivumformung .....  | 6  |
| 2.4     | FEM-Einsatz in der Massivumformung .....  | 7  |
| 2.5     | CAD-FEM-Integration .....   | 10 |
| 2.6     | Die Plastizitätstheorie .....   | 11 |
| 2.6.1   | Mathematische Beschreibung des plastischen Fließens metallischer Werkstoffe ..... | 12 |
| 2.6.2   | Lösungsverfahren der Plastizitätstheorie .....                                    | 12 |
| 2.6.2.1 | Verfahren der elementaren Theorie .....   | 12 |
| 2.6.2.2 | Finite-Elemente-Methode .....   | 13 |
| 2.6.2.3 | Rand-Elemente-Methode .....   | 15 |
| 2.6.3   | Ansätze zur schnellen Berechnung von Schmiedevorgängen .....                      | 15 |
| 2.7     | Die Theorie der unscharfen Mengen .....   | 16 |
| 2.7.1   | Die Fuzzy-Logik .....   | 16 |
| 2.7.2   | Grundlagen .....  | 16 |
| 2.7.3   | Grundstruktur eines Fuzzy-Controllers .....                                       | 18 |
| 2.8     | Vorarbeiten .....   | 19 |
| 3       | Problemstellung und Zielsetzung .....   | 24 |
| 3.1     | Problemstellung .....   | 24 |
| 3.2     | Zielsetzung .....   | 26 |
| 4       | Werkstoffflußsimulation mit PRINZ .....   | 29 |
| 4.1     | Voraussetzungen für die Modellierung des Schmiedeprozesses mit PRINZ .....        | 29 |
| 4.2     | Spezifikation .....   | 30 |
| 4.3     | Datenrepräsentation .....   | 33 |
| 4.3.1   | Das Datenformat .....   | 33 |
| 4.3.2   | Die interne Datenrepräsentation .....   | 36 |
| 4.4     | Berechnung der Umformung .....  | 37 |
| 4.4.1   | Das Werkstoffmodell .....   | 37 |
| 4.4.2   | Das kinematische Fließgesetz .....  | 37 |
| 4.5     | Der nichtsymmetrische Werkstofffluss .....  | 41 |
| 4.5.1   | Entwurf der Fuzzy-Logik für PRINZ .....   | 45 |
| 4.5.2   | Das Steuerprogramm .....  | 47 |
| 4.5.3   | Das Fuzzy-Inference-System (FIS) für PRINZ .....                                  | 49 |
| 4.5.3.1 | Das Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis .....                                 | 49 |
| 4.5.3.2 | Das Vergleichsvolumen .....   | 51 |
| 4.5.3.3 | Das Vergleichsverdrängungsvolumen .....   | 52 |
| 4.5.3.4 | Die Fließspannung .....   | 54 |
| 4.5.3.5 | Die Ausgangsgröße .....   | 55 |
| 4.5.4   | Einbindung in PRINZ .....   | 58 |
| 4.5.5   | Ergebnisse .....  | 58 |

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.6     | Netzoptimierung.....                                   | 60  |
| 4.6.1   | Vorgehensweise.....                                    | 62  |
| 4.6.2   | Durchdringungen.....                                   | 62  |
| 4.6.3   | Dopplungen .....                                       | 63  |
| 4.6.4   | Netzdichte.....  | 64  |
| 4.7     | Umformkraftberechnung.....                             | 65  |
| 4.7.1   | Problemstellung: Rotationssymmetrie.....               | 68  |
| 4.7.2   | Problemstellung: Langteile.....                        | 69  |
| 4.7.2.1 | Berechnung der unteren Schranke .....                  | 70  |
| 4.7.2.2 | Berechnung der oberen Schranke .....                   | 71  |
| 4.7.2.3 | PRINZ - Kraftberechnung .....                          | 74  |
| 4.7.3   | Ergebnisse .....                                       | 80  |
| 4.8     | Visualisierung und Auswertung.....                     | 83  |
| 4.8.1   | Kontaktanalyse .....                                   | 84  |
| 4.8.2   | Verdrängungsverteilung .....                           | 85  |
| 4.8.3   | Anlagerungsverteilung .....                            | 86  |
| 4.8.4   | Grafikberechnung in PRINZ/DAT .....                    | 86  |
| 5       | Aufbereitung der Geometriedaten .....                  | 88  |
| 5.1     | RUSCHKO.....   | 89  |
| 5.2     | ProPRINZ.....  | 89  |
| 5.2.1   | Teileklassen .....                                     | 90  |
| 5.2.2   | Einbindung in Pro/ENGINEER.....                        | 90  |
| 5.2.3   | Ermittlung einer Querschnittskurve.....                | 91  |
| 5.2.4   | Behandlung von achsensymmetrischen und Langteilen..... | 92  |
| 5.3     | PRINZ/STL .....  | 94  |
| 5.4     | P-TOOL .....   | 95  |
| 6       | Berechnungsbeispiele.....                              | 96  |
| 6.1     | Experimentalteil .....                                 | 96  |
| 6.2     | Pleuel.....  | 100 |
| 6.2.1   | Einlegeform 1 - Stangenabschnitt .....                 | 102 |
| 6.2.2   | Einlegeform 2 .....                                    | 105 |
| 6.2.3   | Einlegeform 3 .....                                    | 106 |
| 6.3     | Getriebe-Lagerbock.....                                | 107 |
| 6.4     | Radträger .....  | 114 |
| 7       | Ausblick .....   | 118 |
| 8       | Zusammenfassung.....                                   | 119 |
| 9       | Schrifttum.....  | 121 |

## Formelzeichen

|                |  |
|----------------|--|
| $a$            | Abstand zwischen Grataussenkanten  |
| $A_{AN,i}$     | freie Anlagerungsfläche im Segment $i$   |
| $A_{AN,WS}$    | kontaktfreier Teil der Werkstückoberfläche   |
| $A_{K,i}$      | Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis von Anlagerungs- und Kontaktfläche eines Segmentes $i$ |
| $A_{Ko,i}$     | Teil der Oberfläche des Segmentes $i$ , der im Kontakt zum Werkzeug steht                      |
| $A_{Ko,WS}$    | Flächenelement des Werkstückes, welches Kontakt zum Werkzeug hat                               |
| $A_P$          | Projektionsfläche des Werkstückes am Ende der Umformung  |
| $A_{WS}$       | Oberfläche des Schmiedeteiles am Ende der Umformung  |
| $b$            | Gratbahnbreite   |
| $b_m$          | Breite eines Ersatz-Rechtecksegmentes  |
| $b_G$          | Gravurbreite   |
| $B_i$          | Bewertungszahl des $i$ -ten Segmentes  |
| $d$            | Durchmesser eines Kreissegmentes   |
| $d_m$          | Durchmesser eines Ersatz-Kreissegmentes  |
| $e_i$          | Element (kann Punkt oder Linie sein)   |
| $F_{max}$      | Maximale Umformkraft   |
| $F_{oSMe}$     | Kraft der oberen Schranke (v. Mises), ebener Formänderungszustand                              |
| $F_{oSMr}$     | Kraft der oberen Schranke (v. Mises), Rotationssymmetrie                                       |
| $F_{oSTe}$     | Kraft der oberen Schranke (Tresca), ebener Formänderungszustand                                |
| $F_{oSTr}$     | Kraft der oberen Schranke (Tresca), Rotationssymmetrie   |
| $F_P$          | PRINZ-Umformkraft  |
| $F_{Siebel,K}$ | Umformkräfte nach SIEBEL beim rotationssymmetrischen Stauchen                                  |
| $F_{Siebel,R}$ | Umformkräfte nach SIEBEL an Stauchprobe mit rechteckigem Querschnitt                           |
| $F_{us}$       | untere Schranke der Umformkraft  |
| $G$            | Polygon (zur Berechnung der medialen Achsen)   |
| $\{g\}$        | Menge von Punkten innerhalb von $G$  |
| $h$            | Höhe eines Segmentes   |
| $h_m$          | Höhe eines Ersatzsegmentes   |
| $h_{WS}$       | Gesamthöhe des Werkstückes   |
| $k_f$          | Fließspannung  |
| $k_{fi}$       | Fließspannung am Ende der Umformung  |

---

|                  |   |
|------------------|---|
| $k_{wI}$         | Umformwiderstand am Ende des Vorgangs                                       |
| $l$              | Gravurlänge   |
| $M$              | mediale Achse bzw. Verschmelzungskurve medialer Achsen                      |
| $m$              | Reibfaktor  |
| $M(G)$           | mediale Achse des Polygons $G$  |
| $m_E$            | Anzahl der konkaven Ecken des Polygons $G$                                  |
| $m_R$            | Anzahl der Ränder des Polygons $G$  |
| $n$              | Anzahl der Segmente   |
| $N$              | Summe der Elemente $n$ und $m$  |
| $R$              | Radiusfunktion zur Bestimmung des Abstandes von $M(G)$ zu $G$               |
| $s$              | Gratspaltdicke  |
| $t_{WZ}$         | Tiefe der Werkzeuggravur  |
| $V_{AN,i}$       | Anzulagerndes Volumen im Segment $i$  |
| $V_{AN,WS}$      | gesamtes, anzulagerndes Volumen am Werkstück                                |
| $V_i$            | Volumen des $i$ -ten Segmentes  |
| $V_{K,i}$        | Vergleichsvolumen eines Segmentes $i$                                       |
| $VOD(G)$         | Voronoidiagramm des Polygons $G$  |
| $V_{VK}$         | Vergleichsverdrängungsvolumen   |
| $V_{WS}$         | Einsatzvolumen des Schmiedestückes  |
| $V_{WS,i}$       | Volumen des Segmentes $i$ des Werkstückes                                   |
| $V_{WS,i}(\tau)$ | Volumen des Werkstücksegmentes $i$ zum Berechnungsschritt $\tau$            |
| $V_{WZ,i}$       | Hohlformvolumen des Segmentes $i$ des Werkzeuges                            |
| $\alpha$         | vom Kreissegment aufgespannter Winkel                                       |
| $\varphi$        | Umformgrad  |
| $\dot{\varphi}$  | Umformgeschwindigkeit   |
| $\underline{S}$  | Zustand in der Menge aller elastischen Zustände                             |
| $\tau$           | Berechnungsschritt  |
| $\Phi$           | Fließfunktion, die die Menge aller elastischen Zustände eingrenzt           |
| $\mu$            | Reibzahl  |
| $\phi(x)$        | Gaußsche Fehlerfunktion   |
| $\sigma_z$       | Normalspannung (in $z$ -Richtung)   |
| $\sigma_{zmax}$  | Drucknormalspannung, die gleichmäßig über die Projektionsfläche $A_p$ wirkt |

# 1 Einleitung

Aufgrund der nachhaltigen Wirkung von Technik und Technologie auf Gesellschaft und Umwelt wird eine sichere Beherrschung der Technik und der Produktionsprozesse gefordert. Diese Maßstäbe werden gleichermaßen an die Umformtechnik gelegt. Das Umformverfahren Schmieden gilt als ein Fertigungsverfahren für die ressourcenschonende Herstellung von hochwertigen Produkten, die aufgrund ihrer Leistungsdichte, die sich aus der mechanischen Belastbarkeit ergibt, häufig als Sicherheitsbauteile in kritischen Bereichen komplexer Baugruppen Verwendung finden. Besonders in Deutschland wird häufig für Konsumgüter mit dem Qualitätssiegel „geschmiedet“ geworben.

Das Umformverfahren Schmieden wird in die beiden großen Gruppen Freiformschmieden und Gesenkschmieden unterteilt. Beim Gesenkschmieden handelt es sich um einen Vorgang des gebundenen Formens. Üblicherweise erfolgt das Warmschmieden bei Temperaturen, die Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge erlauben. Beim Kalt- und Halbwarmschmieden liegen die Temperaturen definitionsgemäß darunter.

Das Gesenkschmieden ist ein Druckumformen mit translatorisch gegeneinander bewegten Werkzeugelementen, die die gegensinnige Sollform des Werkstückes enthalten /32/. Die Sollform ist dabei als Hohlform auf zwei oder mehr Werkzeugteile verteilt, die Gesenke genannt werden. Die Ausgangsform ist zumeist der Abschnitt eines Halbzeuges, sie kann aber auch bei formschwierigen Werkstücken bereits vorgeformt sein. Qualität sowie Maß- und Formhaltigkeit der Gesenkschmiedeteile hängen von vielen Einflussfaktoren ab. Einen großen Einfluss üben aus /39/:

- die rechnergestützte Werkzeugkonstruktion und -fertigung,
- die Gestaltung der Stadienfolge einschließlich der Simulation,
- die Toleranzen des Rohteiles,
- die Temperaturführung im Prozess einschließlich der Wärmebehandlung,
- die Umformmaschine sowie das Werkzeugsystem,
- der Grad der Automatisierung sowie
- die Prozesssicherheit und -überwachung.

Die Konstruktion und Planung nimmt eine Schlüsselrolle ein: hier werden alle wesentlichen Entscheidungen für das Teil und für die Produktion getroffen. Die Qualität eines zu fertigenden Teils kann nur so gut sein, wie die Vorbereitung und Produktionsabläufe. Ein nicht mehr wegzudenkender Bestandteil in der Konstruktion und Entwicklung ist die Simulation.

Simulation ist laut Definition die wirklichkeitsgetreue Nachahmung technischer Vorgänge. Unterschieden wird zwischen der Modellaufbereitung und den Modellexperimenten. In fast allen empirischen Wissenschaften gibt es Untersuchungen am Modell. Die Simulationsbedingungen werden mit Hilfe eines aus vielen Einzelteilen bestehenden Modelles, den Freiheitsgraden, und deren Wirken in einer komplexen Struktur definiert. Die aus dem Modellexperiment gewonnenen Ergebnisse sind vorher unbekannt und oft überraschend.

Speziell in der Massivumformung kann das Mittel der Prozesssimulation derart genutzt werden, dass die im Bereich des Gesenkschmiedens unter hohen Temperaturen, hohem Kraftaufwand und in sehr kurzer Prozesszeit stattfindende Fertigung übersichtlich und in einem akzeptablen Zeitrahmen dargestellt bzw. visualisiert wird. Die modellhafte Nachahmung des technischen Vorganges „Schmieden“ sollte dazu

führen, dass die Simulation als Problemlösungsmethode verlässliche Vorhersagen über den Verlauf des Produktionsprozesses möglich macht.

Realitätsnahe Ergebnisse zählen zu den Grundforderungen an eine solche Methode. Akzeptable Ergebnisse können aber nur dann erzielt werden, wenn neben der modellhaften Beschreibung des zu simulierenden Prozesses auch korrekte Anfangs- und Randbedingungen bestimmt werden. Wie u.a. Veröffentlichungen aus dem Bereich der Massivumformung belegen, gibt es gerade bei komplizierten Prozessen nach wie vor Schwierigkeiten, korrekte Kenngrößen, Rand- und Anfangsbedingungen zu bestimmen oder festzulegen und diese in ein Simulationsmodell einzugeben /33, 34/. Eine fehlerbehaftete Beschreibung von Prozessen und deren Randbedingungen schlägt sich immer wieder auf Simulationsergebnisse nieder /34/.

Im Umfeld der Massivumformung ist die Simulation bzw. modellhafte Berechnung vieler Vorgänge und Sachverhalte unter Nutzung unterschiedlicher Verfahren denkbar. Die Simulationsverfahren lassen sich dabei unterteilen in physikalische Prozesssimulation mit Modellwerkstoffen wie Blei und Plastilin mit experimentellem Charakter und die theoretische Prozesssimulation mit computergestützten Methoden. Ziel ist es immer, die Machbarkeit von vorliegenden Konzepten für die Fertigung von Produkten zu überprüfen, die Produkteigenschaften zu beurteilen, das Fertigungsverfahren zu optimieren sowie über die Erhöhung des Verständnisses die Innovationskraft zu verbessern.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff der Simulation nur noch im Zusammenhang mit computerunterstützten Methoden verwendet.

In der Massivumformung sind grundsätzlich die folgenden Untersuchungen mit Hilfe von Simulation denkbar:

- Werkstofffluss,
- Temperatur- und Spannungsverteilung im Werkstück und Werkzeug,
- Gefügeentwicklung des Werkstückes und Gefügeveränderungen der Werkzeuge,
- Werkzeugbelastung und –verformung,
- Schädigung und Verschleiß an den Werkzeugen und Aggregaten,
- Maschinendynamik und –verhalten unter Last,
- Prozessanlaufverhalten,
- Prozessablauf von der Halbzeugabtrennung über Handling, Erwärmung, Umformung über die Wärmebehandlung bis hin zur mechanischen Bearbeitung,
- dynamische und statische Belastbarkeit des fertigen Werkstückes.

Die lange Reihe der oben genannten denkbaren Untersuchungen zeigt, dass die möglichen Probleme bei der Herstellung von Schmiedeteilen sehr vielfältiger Art sind. Sinnvoll ist die Simulation aber nur dort, wo sie wirtschaftlicher oder auch ressourcenschonender als die Durchführung des realen Vorganges in Form von Versuchen ist.

In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit vorgestellt, den Schmiedeprozess von Langteilen sehr schnell und effektiv begleitend zu den Konstruktionsarbeiten an Schmiedeteil und Werkzeugen mehrstufig zu modellieren. Das dafür entworfene Softwarepaket PRINZ (benannt nach der der Software zugrunde liegenden Berechnungsmethode: *Prinzip* des kleinsten *Zwanges*) stellt eine Pilotanwendung für die entwickelten Konzepte dar. Der sich bei der Nutzung von PRINZ einstellende Informationsgewinn steht unmittelbar für die Gestaltung und Optimierung der Produktionsprozesse im Konstruktions- und Entwicklungsprozess zur Verfügung.

## 2 Stand der Kenntnisse

### 2.1 Gesenkschmieden und Stadienfolge

Das Umformen im Gesenk mit Gratspalt ist zur Zeit das am häufigsten angewandte Gesenkschmiedeverfahren (Bild 1), da es häufig schwierig ist, Zwischenformen so genau herzustellen und zu positionieren, dass ohne Grat geschmiedet werden kann /37/. Der Gratspalt dient der Druckregulierung, bewirkt das Ausfüllen der Gravur und bietet die Möglichkeit, den überschüssigen Werkstoff in die Gratrille abfließen zu lassen. Die Gratrille dient als Kompensationsraum. Die Gestaltung der Gratbahn beeinflusst den Werkstofffluss innerhalb der Gravur. Der Grat wird nach der Umformung entfernt.

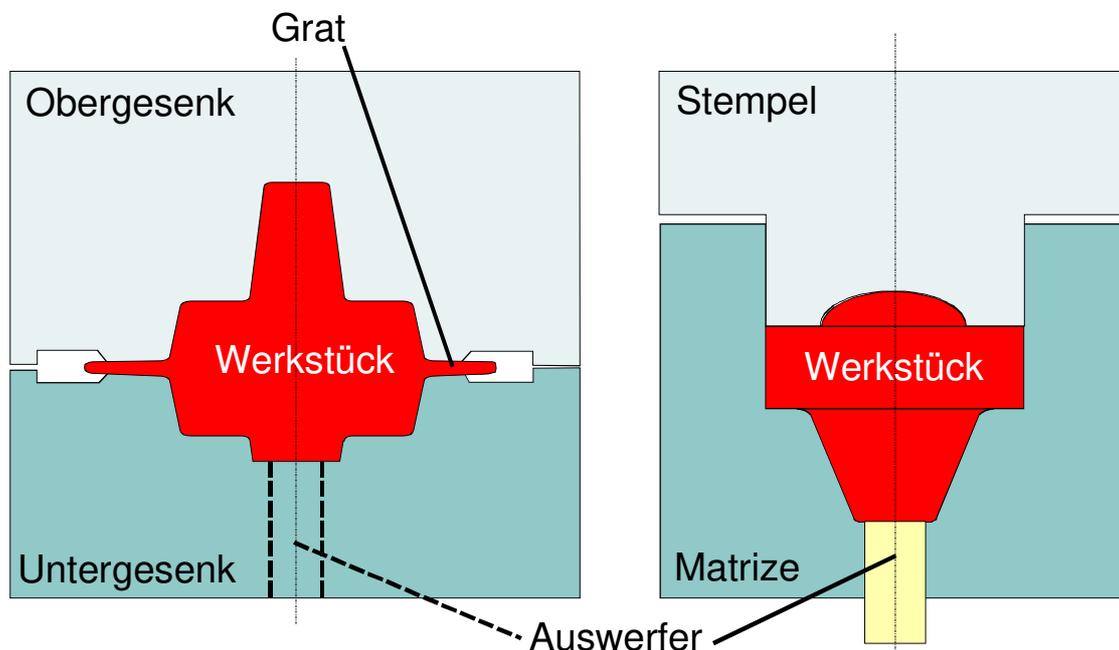


Bild 1: Werkzeuge zum Gesenkschmieden; offen (links) und geschlossen (rechts)

Beim Schmieden im geschlossenen Gesenk ist die Aufnahme von überschüssigem Werkstoff fast ausgeschlossen (Bild 1). Die Vorteile liegen in der Werkstoffeinsparung durch Wegfall des Gratvolumens, die zwischen 10 bis 15 % liegt, in Einzelfällen sogar bis zu 60 %. Probleme kann es bei ungenauer Massendosierung geben, dann wird die Gravur entweder nicht vollständig ausgefüllt oder die bei idealer Steifigkeit des Gesamtsystems theoretisch unendlich hohen Kräfte im geschlossenen Gesenk führen bei Erreichen der vollständigen Füllung zur Überlastung von Werkzeugen oder Umformaggregat. Es muss zunderarm erwärmt werden, weil Metalloxide (Zunder) einen hohen Verschleiß der Gesenke bewirken und das Volumen der Zunderschichten nicht genau vorausbestimmbar ist.

Gegenüber dem Schmieden mit Grat hat das Schmieden im geschlossenen Gesenk den Vorteil einer besseren Maß- und Formgenauigkeit der Werkstücke, geringerer Bearbeitungszugaben und engerer Toleranzen. Durch besondere Maßnahmen werden in jüngster Vergangenheit auch Genauigkeiten im Bereich der ISO-Toleranzklassen 9 oder gar 8 erreicht, was das Fertigschmieden von Funktionsflächen erlaubt. Hier spricht man auch vom Präzisionsschmieden /33, 38, 39/. Als Umformaggregate werden

Spindelpressen und Kurbelpressen, in Einzelfällen z.B. beim Isothermschmieden von Hüftgelenken hydraulische Pressen eingesetzt.

Beim Präzisionsschmieden werden erhöhte Anforderungen an die Fertigungstechnik, Technologie sowie an den Produktentstehungsprozess gestellt /39/.



Bild 2: Herstellungssequenz (Stadienfolge) eines präzisionsgeschmiedeten Gleichlaufgelenkes in der Folge Rohteil – Vorform – Zwischenform – Schmiedeteilendform – Fertigteil /51/.

Schmiedeteile lassen sich nur selten in einem einzigen Schritt herstellen. Je komplexer die Werkstückgeometrie ist und je schwieriger sich der Werkstoff umformen lässt, desto mehr Umformstufen sind erforderlich /37/. Man spricht hier auch von der Stadienfolge (Bild 2). Sie wird dokumentiert im Stadienplan. Ein solcher Fertigungsplan wird in der Regel schrittweise erstellt, indem man zunächst aus dem Fertigteil-CAD-Modell des Werkstückes ein Schmiedeteilmodell ableitet und dann ausgehend von diesem Modell rückwärts die einzelnen Umformstufen bis hin zum Rohteil entwickelt /50/. Bisher ist man dabei vor allem auf die Erfahrung langjähriger Mitarbeiter sowie die Aussagen von Modellexperimenten angewiesen, da zur Zeit für die konstruktionsintegrierte Anwendung bei nicht-symmetrischen Aufgabenstellungen keine geeigneten 3D-Berechnungswerkzeuge verfügbar sind.

## 2.2 Werkstofffluss

Die sequentielle Gestaltänderung des Werkstückes beim Gesenkschmieden wird durch die Stadienfolge erreicht. Der von der Gestaltung der Stadienfolge abhängige Werkstofffluss beeinflusst nachhaltig die Qualität des Schmiedestückes als auch die Herstellungsmethode.

Werkstofffluss und Formänderungen werden beim Gesenkschmieden in hohem Maße durch die Formbindung an die Werkzeuge bestimmt. Das Füllen einer Gravur lässt sich in folgende Abschnitte gliedern /37/:

- freies Stauchen,
- geführtes Stauchen,
- Gratbildung (beim Schmieden mit Grat) und Steigen in Gravurhohlräume,
- Kantenfüllen,
- Nachstauchen.

Zur Beurteilung des Stoffflusses werden u.a. die Vektoren des Geschwindigkeitsfeldes (Bild 3), Fließscheiden, d.h. relativ zu den das Fließen einleitenden Werkzeugoberflächen ruhender Werkstoff im Schmiedestück, und vor allem die Konturen der Augenblicksformen diskreter Umformschritte (Bild 4) herangezogen.

Der Werkstofffluss in Gesenkschmiedewerkzeugen ist vor allem abhängig von der Art und Lage der Gravurelemente, der Größe der Radien, der Gratspaltgeometrie, der Gestalt der Ausgangs- und Zwischenform und dem Verhältnis von Gravur- zu Zwischenformvolumen. Die Gravur- wie auch die Werkstückform sind gestaltbar und können demnach zur Lenkung des Stoffflusses herangezogen werden.

Im Unterschied zum Freiformen, wo der Werkstoff, von der Reibkraft behindert, quer zur Beanspruchungsrichtung fließt, werden beim Gesenkschmieden durch das Werkzeug Volumenströme in Umformrichtung der Werkzeuge und quer dazu erzwungen. Bild 3 stellt die Momentaufnahme einer mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) berechneten Massivumformung eines Flansches dar. Die eingezeichneten Geschwindigkeitsvektoren zeigen, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt sowohl Fließprozesse parallel (relativ) zur Werkzeugbewegung als auch orthogonal zur Werkzeugbewegung stattfinden. Man spricht hier auch von „geführter Verdrängung“ des Werkstoffes.

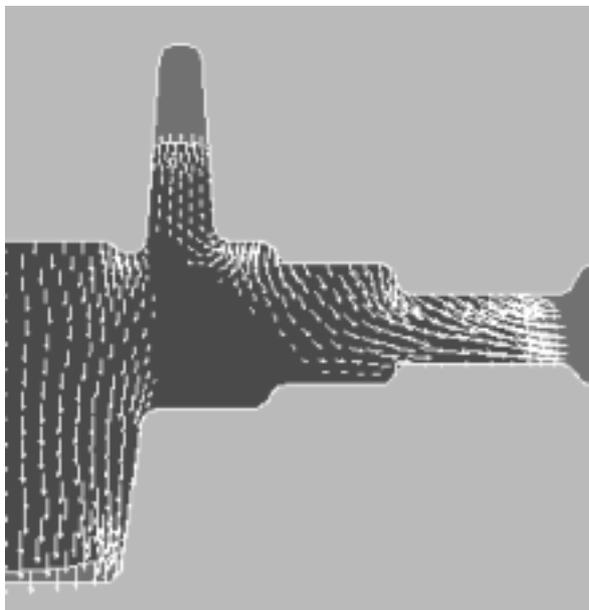


Bild 3: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der 2D-FEM-Simulation einer Radnabe. Berechnet mit Form-2D /62/.

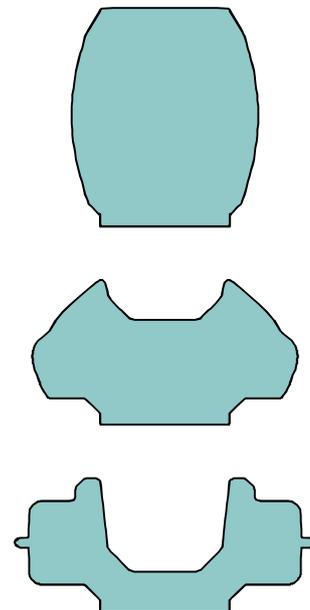


Bild 4: Augenblicksbilder eines Umformvorganges als Ergebnis der Berechnung mit PRINZ

Die zu beobachtenden drei Grundvorgänge werden auch *Stauchen*, *Breiten* und *Steigen* genannt /37/. Wie in Bild 3 zu sehen, sind die Übergänge fließend. Bei jedem Gesenkschmiedevorgang treten zumindest zwei der drei Grundvorgänge auf.

Zu Beginn der Umformung mit Grat kann entweder *Wälzen* oder *Gleiten* auftreten (Bild 5). Am Ende des Prozesses tritt jedoch immer Gleiten auf, welches bei gut ausgelegten Schmiedeprozessen in dieser Phase mit einem starken Stoffabfluss in Richtung des Gratspalts verknüpft ist.

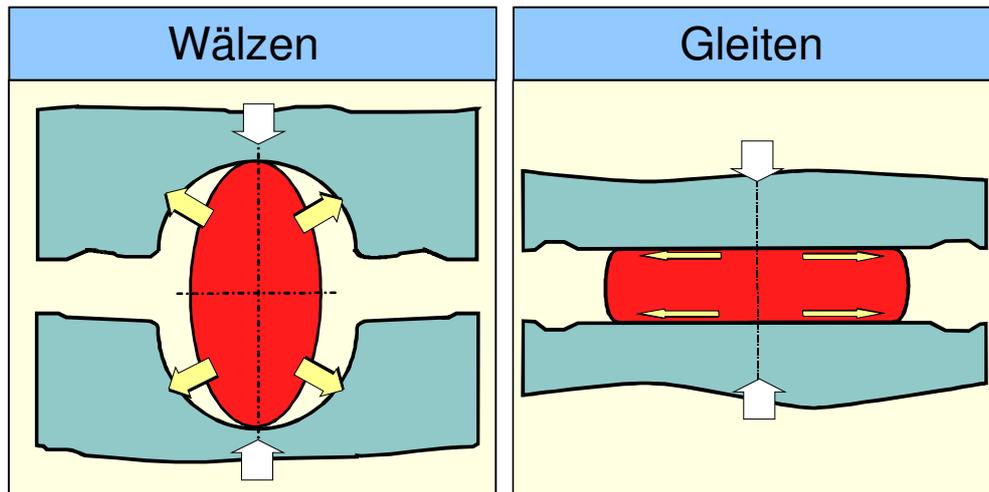


Bild 5: Werkstofffluss im Gesenk nach /93/

Die Gleitgeschwindigkeiten können das 4 bis 8,5fache der Werkzeuggeschwindigkeiten betragen /46/. Bei Stoßelgeschwindigkeiten von ca. 6 m/s beim Hammerschmieden ergeben sich Relativgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/s, die im Gratbereich noch übertroffen werden. Gleiten, und damit lokal hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen Werkstück und Werkzeug, führt zu Verschleiß im Gesenk und erhöhten Fließspannungen. Bild 3 zeigt im unteren Bereich der Gratbahn deutliche Zeichen hoher Relativgeschwindigkeiten zwischen Schmiedestück und dem Untergesenk in einem für diesen Umformvorgang recht frühen Stadium.

In /30/ werden deshalb Regeln für die Vorschmiedeform aufgestellt, die darauf abzielen, in einer dem Fertigformen vorgeschalteten Umformstufe die Gesamtbelastung der Werkzeuge zu verringern und auf diese Weise zu einer werkzeugschonenden und verschleißarmen Stadienfolge zu kommen. Durch die Querschnittsvorbildung soll im wesentlichen das Gleiten verhindert werden und durch Geometrieüberhöhung ein Wälzen bzw. Breiten des Werkstoffes erreicht werden. Diese Vorgehensweise kann aber bei unüberlegter Anwendung zu Schmiedefehlern, z.B. Überlappungen, führen.

In der DIN 7523 /47/ wurden die Gestaltungsrichtlinien für Schmiedeteile dokumentiert, die aus der Notwendigkeit heraus entstanden, den Merkmalen des Gesenkschmiedens u.a. durch eine fließgerechte Gestaltung zu entsprechen.

## 2.3 CAD-Einsatz in der Massivumformung

Gegenwärtig finden in der Massivumformung die Systeme Euklid (Strässle), Pro/ENGINEER (Parametric Technology Inc.) und Unigraphics (Unigraphics Solutions Inc.) die größte Verbreitung. In Entwicklung befindet sich eine Anbindung von RUSCHKO (IFUM) an Pro/ENGINEER /58/.

**Euklid** wurde vom „Industrieverband deutscher Schmieden“ (IDS) aufgrund von Leistungsvergleichen in den Jahren 1985 und 1989 als Basissystem für die eigenen Erweiterungen gewählt /26/. Die IDS-CAD/CAM-Projekte (ICCP) beschäftigten sich seit 1984 mit verschiedenen Bereichen wie Konstruktion, Gesenkbau, Technologie des Schmiedens, Stofffluss, Gesenkdeformation und Teilvermessung. In den etwa 200 Schmiedebetrieben in Deutschland setzten 1997 etwa 30 Betriebe CAD-Technik ein, davon ungefähr 20 Betriebe gemäß der IDS-Empfehlung das EUKLID-System /24/.

Mit **Pro/ENGINEER** ist sowohl eine featurebasierte als auch parametrische Konstruktion realisierbar. Parametrik unterstützt allgemein die Änderungen im Konstruktionsprozess, das heißt z.B., parametrisch

verknüpfte Objekte passen sich einander im Rahmen von vorgegebenen Grenzen gegenseitig an neue Bedingungen an. Ein Beispiel dafür ist die parametrisch definierte Schraube, bei der durch Angabe eines neuen Gewinderadius automatisch auch alle anderen Dimensionen verändert werden. Für die Modellierung stehen dem Anwender in Pro/ENGINEER Features zur Verfügung, die miteinander verknüpft werden. Über Programmierschnittstellen können zusätzliche Formelemente, Makros und Anwendungen in das 3D-CAD-System eingebunden werden.

**Unigraphics** basiert wie Pro/ENGINEER auf einem Hybrid-Kern, vereinigt demnach die Möglichkeiten der volumenorientierten Constructive Solid Geometry und der flächenbasierten Boundary-Representation. Das 3D-CAD-System unterstützt sowohl den parametrischen Ansatz als auch traditionelle Konstruktionsmethoden. Obwohl es sich für die Freiformflächenmodellierung sehr gut eignet, ist es in der deutschen Schmiedeindustrie nicht sehr stark verbreitet.

**Ruschko** wurde speziell zur Unterstützung der geometrischen Gestaltung von Schmiedeteilen und deren Zwischenformen sowie der zugehörigen Werkzeuge entwickelt. Es ermöglicht die Umwandlung und Aufbereitung von Fertigteilgeometrie in die verfahrensgerechte Geometrie des Schmiedeteils im Volumenmodell als Zusatzapplikation zu Pro/ENGINEER. Der Konstruktionsablauf bei der Auslegung der Schmiedeteile und insbesondere der Zwischenformen wird stark vereinfacht, indem die Objekte direkt aus der Geometrie des Schmiedeteils abgeleitet werden, wodurch eine aufwendige Neueingabe der Geometrie vermieden wird /29/.

Die Module des Systems unterstützen die Phasen des Konstruktionsprozesses /24, 58/:

- Gestaltung des Schmiedeteils auf Basis der Fertigteilgeometrie,
- Entwicklung des Hohlformmodells unter Berücksichtigung der Schrumpfung sowie der Gratgeometrie,
- Konstruktion von Endwerkzeug und Abgratwerkzeug und die
- Auslegung einzelner Vorformgeometrien, z.B. Massenverteilung und Vorschmiedeform.

## 2.4 FEM-Einsatz in der Massivumformung

Die FEM hat eine große Verbreitung gefunden bei der Berechnung sowohl linear-elastischer Problemstellungen als auch bei den besonders aus der Umformtechnik bekannten nichtlinearen Aufgabenstellungen (Bild 6).

Die Finite Elemente Methode wird deshalb auch gegenwärtig von den führenden Programmen im Bereich der Simulation von Massivumformprozessen genutzt. Der Einsatz von zweidimensionalen FEM-Programmen für die Berechnung von vor allem rotationssymmetrischen Problemstellungen hat in ca. 80 bis 85% der Schmiedefirmen in Deutschland Eingang gefunden. Die meist guten Ergebnisse sind Resultat vertretbaren Zeitaufwandes für Modellerstellung und Berechnung sowie geringer Kosten für die Hard- und Software und des für die Bedienung und Auswertung notwendigen Personals /9/. Bei dreidimensionalen Berechnungen stehen in der Praxis der Anwendung der Finiten-Elemente-Methode zur Berechnung von beliebigen Schmiedeprozessen jedoch insbesondere der aus heutiger Sicht unverhältnismäßig hohe Modellerstellungs- und Berechnungsaufwand entgegen /9/.

Sind die zweidimensional zu betrachtenden Probleme heute in einigen Stunden lösbar, so muss für die dreidimensionale Berechnung eines Schmiedevorganges noch ein Bearbeitungszeitraum von mehreren Tagen akzeptiert werden. Aufgrund der langen Rechenzeiten und der Vernetzungsproblematik insbesondere bei Teilen mit komplexer 3D-Geometrie kann an die Durchführung von FEM-Rechnungen im Hinblick auf eine Optimierung von Umformstufen nur gedacht werden, wenn bereits eine Grundvariante

entwickelt wurde, die von der optimierten Form nicht zu weit entfernt ist. Nur dann hält sich die Anzahl der zu berechnenden Varianten in Grenzen.

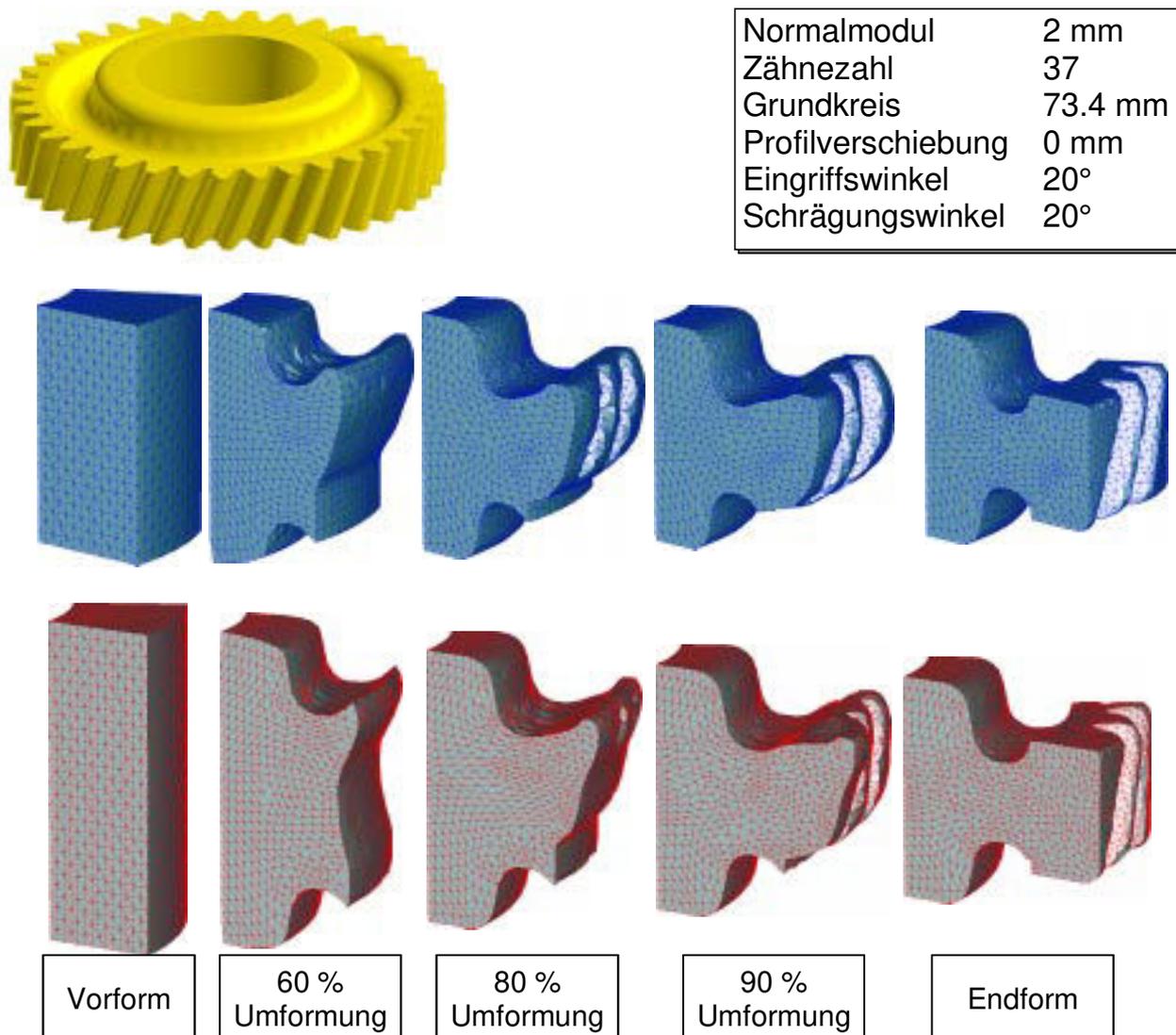


Bild 6: Berechnung der Umformung zweier Einlegevarianten eines Zahnrades mit der FEM /92/.

Fortgeschrittene Arbeiten sind die Anwendung der FEM für die Simulation von Präzisionsschmiedeprozessen von Zahnrädern zur Berechnung des Materialflusses, der Werkzeugbelastung und der Gefügeausbildung /87, 16/. Mit Hilfe der numerischen Identifikation wurden Parameter gefunden, die die Abweichungen zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen minimieren /59/. Weitere Arbeiten hatten zum Ziel, FEM-Modelle zur Simulation des Materialverhaltens von Magnesiumlegierungen sowie von Magnesiumpulverlegierungen zu erarbeiten. Diese wurden als Stoffgesetze in ein kommerzielles FEM-Pakete eingebunden /88/. Für die Berechnung einzelner zu definierender Prozessphasen des Präzisionsschmiedens werden z.Z. unterschiedliche kommerzielle Simulationssysteme genutzt, da die Fähigkeit der Berechnung aller für das Präzisionsschmieden erforderlichen Ergebnisse bis jetzt von noch keinem Softwarehersteller gesamtheitlich realisiert wurde /89/.

Die auf dem Markt verfügbaren Programme zur Berechnung von Schmiedevorgängen auf der Basis der FEM wurden in /63/ mit den folgenden Ergebnissen umfassend analysiert:

- Stand der Technik ist die vollautomatische zweidimensionale Analyse von Umformprozessen. Die dreidimensionale Analyse ist nur in wenigen Systemen ausreichend gut implementiert.

- Für den 2D-Fall sind starr-plastische, viskoplastische und elastisch-plastische Werkstoffgesetze vorhanden.
- Isotrope Verfestigung kann berücksichtigt werden.
- Die thermomechanisch gekoppelte Analyse ist Standard.
- Die gekoppelte Untersuchung von Maschine, Werkzeug und Werkstück ist möglich, wird aber wegen des großen Aufwandes nicht durchgeführt.
- Fließkurven sind in Werkstoffdatenbanken zusammengefasst, die neben den Fließkurven häufig die isotropen elastischen Eigenschaften der Werkstoffe enthalten.
- In führenden Programmen sind die Kinematiken von Umformpressen verfügbar.
- Pre- und Postprocessing sind in einer benutzerfreundlichen Oberfläche zusammen mit den Berechnungsmodulen integriert.
- Die meisten Programme bieten die automatisierte räumliche Netzgenerierung.
- Die meisten kommerziellen Programme rechnen implizit.
- Die Simulation von mehrstufigen Prozessen ist mit einigen Programmen möglich.
- Zu CAD-Programmen existieren Schnittstellen wie IGES, DXF usw.. Sie verfügen über z.T. erhebliche Schwachstellen.
- Vollständige PC-Versionen (Windows NT, Windows 95) existieren zumindest für die meisten 2D-Anwendungen.
- Paralleles Rechnen wird nur vereinzelt unterstützt.
- Nur für 2D-Probleme existieren stabile und effiziente Kontaktalgorithmen.
- Möglichkeiten der Berücksichtigung kinematischer oder allgemein anisotroper Verfestigung sind in kommerziellen Programmen kaum gegeben.
- Die Rechenzeiten sind bei den kommerziellen Programmen bei großen 3D-Problemen inakzeptabel.

|                  | <b>3D-Remeshing</b> | <b>Element-Typ</b> | <b>starr-plastisch</b> | <b>elasto-plastisch</b> | <b>PC-Version</b> | <b>Werkstoff-Datenbank</b> |
|------------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| <b>ABAQUS</b>    | -                   | Hex/(Tet)          | (x)                    | x                       | (x)               | -                          |
| <b>MARC</b>      | (x)                 | Hex                | x                      | x                       | x                 | -                          |
| <b>Autoforge</b> | x                   | Hex                | x                      | x                       | x                 | x                          |
| <b>Deform</b>    | x (Tet)             | Tet/Hex            | x                      | x                       | (x)               | x                          |
| <b>Forge-3</b>   | x                   | Tet                | (x)                    | -                       | x                 | x                          |

Tabelle 1: Vergleich von führenden verfügbaren FEM-Programmen /63/.

Problematisch sind die bei der Simulation komplexer, dreidimensionaler Schmiedeprozesse die großen Verzerrungen, die das Element-Netz des Werkstückes im Verlaufe der Berechnung erfährt. Die überwiegend angewandte Lagrangesche Betrachtungsweise, bei der das Element-Netz den Deformationen des Materials folgt, erfordert daher beim Vorliegen eines hohen Verzerrungsgrades eine Neuvernetzung. Zur Zeit wird intensiv an neuen und effizienten Algorithmen für die automatische Neuvernetzung gearbeitet /84, 85/.

Durch die Anwendung der Eulerschen Betrachtungsweise kann der Materialfluss wie bei stationären Strömungsproblemen fließend durch ein ortsfestes Gitter berechnet werden. Die fehlende Deformation der Elemente und damit das Ausbleiben der Neuvernetzung sind der gravierende Vorteil. Das bringt aber den Nachteil mit sich, dass das Ausprägen der Oberfläche des Umformteiles in den Randelementen nicht vollständig dargestellt werden kann. Gelöst wurde dieses Problem z.B. durch den ergänzenden Einsatz eines Lagrange-Oberflächennetzes in MSC/Superforge /86/. Damit konnten, bedingt durch das nicht erforderliche Remeshing während der Berechnung, die Rechenzeiten substantiell reduziert werden.

## 2.5 CAD-FEM-Integration

Die Integration von CAD- und FEM-Systemen in eine gemeinsame Umgebung erfordert nicht nur einen Austausch von Geometriedaten zwischen den verbundenen Systemen, die auszutauschenden Daten werden darüber hinaus auch in ihrem Informationsgehalt verändert (Bild 7). Im allgemeinen wird dazu eine im CAD-System vorliegende detaillierte Bauteilbeschreibung durch ein vereinfachtes Geometriemodell ersetzt, das hinsichtlich seines Abstraktionsgrades den Anforderungen der FEM entspricht. CAD-Volumenmodelle werden für die Vernetzung in eine Oberflächendarstellung konvertiert und für die Erzeugung regelmäßiger FEM-Netze in Netzgebiete vorstrukturiert. Anschließend wird die aufbereitete Geometrie mit Hilfe eines Netzgenerators durch finite Elemente aufgefüllt.

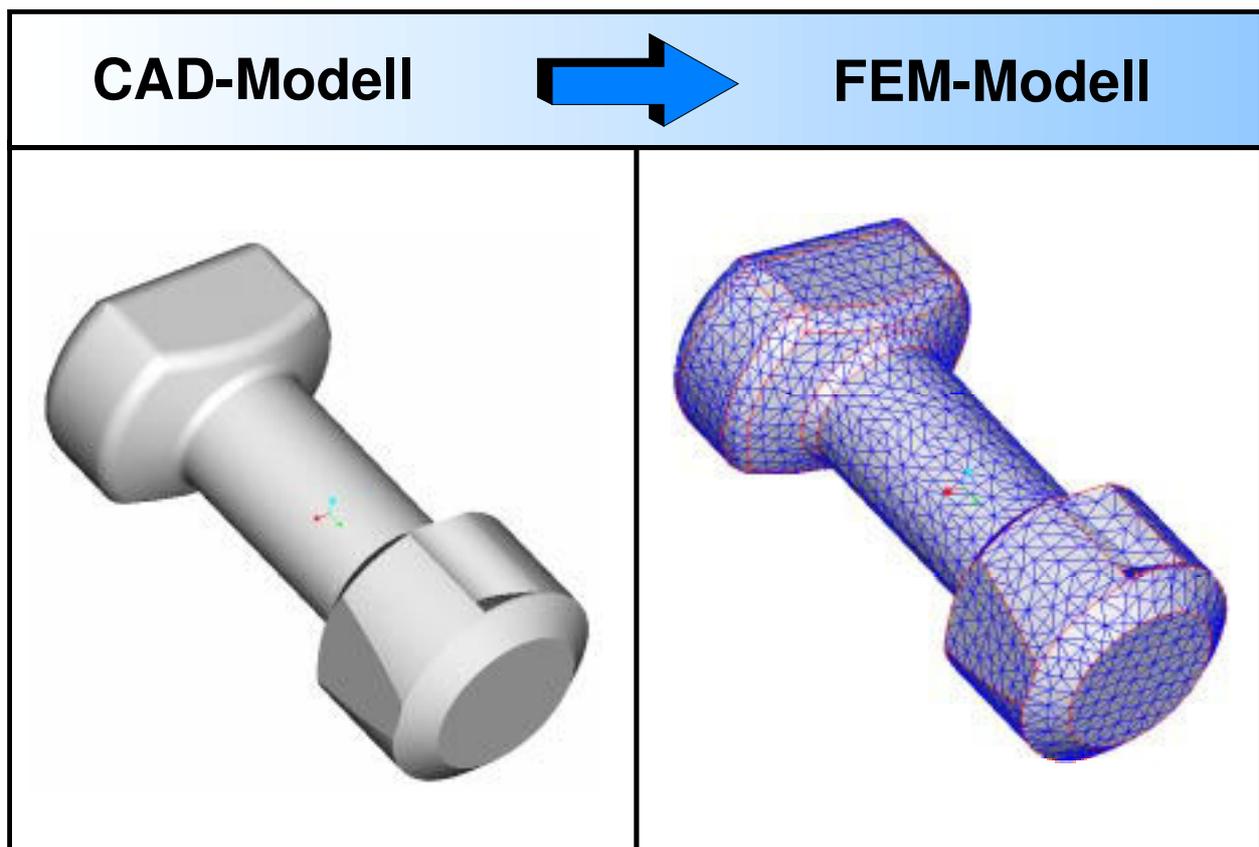


Bild 7: Übertragung von CAD-Information auf ein FEM-Gitter

Eine FEM-Modellierung, ausgehend von volumenorientierten CAD-Modellen, ist in /41, 42/ beschrieben. Vor der FEM-Netzgenerierung muss das CSG-Volumenmodell in eine Oberflächendarstellung aus Flächen, Linien und Punkten konvertiert werden. So ist z.B. in das 3D-CAD-System Pro/ENGINEER ein Berechnungsprogramm Pro/MECHANICA integriert, welches zur Durchführung kinematischer und

thermischer Analysen sowie Untersuchungen hinsichtlich von Bauteilbeanspruchungen geeignet ist. Das System ist in zwei Modi einsetzbar, zum einen als externes Programm und zum anderen im integrierten Modus innerhalb der Pro/ENGINEER-Benutzeroberfläche. In beiden Fällen kann das mit Pro/ENGINEER entwickelte CAD-Modell ohne die Verwendung von Schnittstellen übernommen werden /91/.

Bei der indirekten CAD-FEM-Kopplung werden die unterschiedlichen Anforderungen, die an die Verarbeitung von Geometriemodellen in CAD- und FEM-Programmen gestellt werden, berücksichtigt. Das in /43/ vorgestellte Verfahren stellt eine integrierte Systemlösung einer indirekten CAD-FEM-Kopplung dar. Bei dem in /44/ vorgestellten System erfolgt die Übertragung von Geometriedaten aus dem CAD-System in das CAD-FEM-Kopplungsmodul über die VDA-Flächenschnittstelle. Die übertragene Flächengeometrie kann im Anschluss daran interaktiv aufbereitet und vernetzt werden. Mit der in /45/ beschriebenen Vorgehensweise hingegen wird das CAD-Modell nach einer interaktiven Geometrieaufbereitung vollautomatisch vernetzt.

## 2.6 Die Plastizitätstheorie

Die Plastizitätstheorie ist das Teilgebiet der Kontinuumsmechanik, das sich mit dem Verhalten der Festkörper beim Auftreten von bleibenden Formänderungen beschäftigt. Sie ist damit die Grundlage für die rechnerische Behandlung von Umformvorgängen. Das Verhalten von Werkstoffen hat in der Plastizitätstheorie für die meisten Zwecke eine begründete und abgeschlossene Beschreibung gefunden. Es ist jedoch nur selten möglich, die Grundgleichungen dieser Plastizitätstheorie zu einer strengen Berechnung der Spannungen und Werkstoffbewegungen eines Formänderungsvorganges zu benutzen /3/. In der Praxis hat das zur Entwicklung zahlreicher Näherungsverfahren geführt, die in vielen Fällen dem speziell behandelten Umformvorgang angepasst sind. Als wertvolles Hilfsmittel sind sie unter dem Begriff „Elementare Plastizitätstheorie“ zusammengefasst /2/. Die Berechnungsverfahren der elementaren Plastizitätstheorie sind jedoch in ihren Grundannahmen auf einer starken Vereinfachung der Bewegungs- und Spannungszustände, die sich beim Umformvorgang einstellen, aufgebaut und können meist nicht dazu benutzt werden, exakte Ergebnisse über Spannungs- und Formänderungszustände während des Umformvorganges zu gewinnen /3/.

Ähnlichen Schwierigkeiten sieht sich eine andere Klasse von Berechnungsverfahren gegenüber, die Schrankenverfahren /1,5,6/, bei denen Extremalprinzipien der Plastizitätstheorie dazu benutzt werden, die bei Umformvorgängen auftretenden äußeren Kräfte in möglichst guter Näherung zu ermitteln. Mit diesen Verfahren kann nicht die exakte Lösung, sondern nur ein Bereich ermittelt werden, in dem die Lösung liegt. Die obere Schranke hat dabei die größere Bedeutung, da mit ihr Aussagen über die notwendige Dimensionierung von Werkzeug und Umformmaschine gemacht werden können.

In geringerem Umfang wird auch die Gleitlinientheorie zur Ermittlung des Spannungsfeldes bei ebenen Formänderungszuständen verwendet /5, 7, 8/.

Die Finite-Elemente-Methode ist eine Lösungsmethode, welche umformulierte Ansätze der Plastizitätstheorie nutzt, um den Stofffluss, die Spannungen, die Formänderungen und Versagenserscheinungen unter Ausschöpfung plastizitätstheoretischer Grundlagen zu bestimmen. Sie verwendet im Prinzip eine besondere Form des Ansatzes von RITZ /17/. Die FEM ist zur Zeit das leistungsfähigste Berechnungswerkzeug für die Simulation von Umformprozessen.

## 2.6.1 Mathematische Beschreibung des plastischen Fließens metallischer Werkstoffe

Die mathematische Beschreibung des Verhaltens plastischer Stoffe gründet sich auf Ergebnisse makroskopischer Versuche, insbesondere Modellversuche, wie dem Zugversuch. Eine wichtige Eigenschaft eines sich plastisch verhaltenden Werkstoffes ist das Vorhandensein einer Fließgrenze. Die Fließgrenze bzw. Fließfläche im Dreidimensionalen markiert dabei den Grenzwert von Spannungen, die bleibende Formänderungen bewirken.

Die Fließfläche, die den elastischen Spannungsraum einhüllt, bleibt bei konstanter Temperatur unveränderlich. Ihre Gleichung ist demnach bei Beschränkung auf isotherme Zustandsänderungen durch die Fließbedingung  $\Phi[\underline{S}] = 0$  für ideal-plastischen Werkstoff gegeben. Dabei ist zu beachten, dass Zustände mit  $\Phi > 0$  nicht erreichbar sind, Zustände mit  $\Phi < 0$  charakterisieren elastische Zustandsänderungen.  $\underline{S}$  stellt einen Zustand in der Menge aller elastischen Zustände dar. Der Zustand plastischen Werkstoffverhaltens ist als Grenzfall aller möglichen Zustände des Werkstoffes anzusehen. Im Hauptspannungsraum stellt sich die Fließfläche als geneigter Zylinder oder Prisma dar /35/.

Der Begriff der Werkstoffstabilität ermöglicht es, das von einachsigen Spannungszuständen her bekannte charakteristische nichtlineare Verhalten auf mehrdimensionale Spannungszustände zu übertragen. An der Fließgrenze können die Dehnungen unter wachsenden, konstant bleibenden oder sogar abfallenden Spannungen zunehmen. Das entsprechende Werkstoffverhalten wird als verfestigend, idealplastisch oder erweichend bezeichnet /4/.

Auf dem ideal-starrplastischen Werkstoffmodell baut die VON MISES'sche Plastizitätstheorie auf /10/. Da in der Warmumformung die plastischen Formänderungen die elastischen weit übertreffen, kann dieses idealisierte Stoffmodell hier Verwendung finden. Unter der Annahme, dass bei sehr vielen Metallen die Fließkurve oberhalb der Rekristallisationstemperatur annähernd waagrecht verläuft, ist die Vernachlässigung der Verfestigung zulässig.

## 2.6.2 Lösungsverfahren der Plastizitätstheorie

### 2.6.2.1 Verfahren der elementaren Theorie

Die Grundlagen der Elementaren Plastizitätstheorie wurden 1924/25 von SIEBEL /12/ und KARMAN /13/ am Walzvorgang entwickelt und von SACHS /14/ auf den Ziehvorgang sowie von SIEBEL und POMP /15/ auf das Schmieden übertragen. Die Methoden zur Behandlung von Vorgängen, bei denen ein ebener Bewegungszustand vorliegt, werden unter dem Namen Streifentheorie zusammengefasst. Ihre Übertragung auf axialsymmetrische Vorgänge haben zur Scheiben- und Röhrentheorie geführt. Die drei Modelle sind in Bild 8 dargestellt.

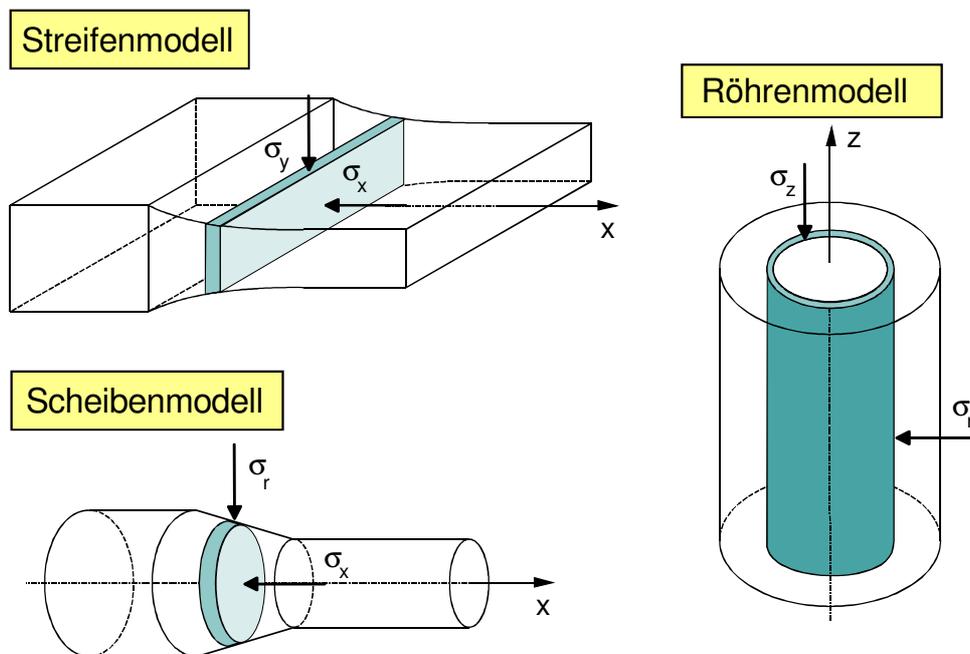


Bild 8: Prinzipien der Streifen-, Scheiben- und Röhrenmodelle der Elementaren Plastizitätstheorie

Die Grundlagen der Elementaren Plastizitätstheorie mit Einschluss von Massenkraften sind ausführlich im Lehrbuch von LIPPMANN und MAHRENHOLTZ /2/ dargestellt.

Die meisten Berechnungsmodelle, die der Elementaren Plastizitätstheorie zugrunde liegen, entsprechen nicht den Anforderungen der realen Schmiedevorgänge. Nur das Röhrenmodell wurde für das Gesenkschmieden und Pressen entwickelt /15/. Dabei gelten die folgenden Einschränkungen:

1. Der Werkstoff fließt axialsymmetrisch und wird durch ein Paar schalenförmiger, axialsymmetrischer Bahnen geführt.
2. Um die Achse zylindrische Werkstoffsschnitte behalten ihre Zylinderform und verschieben sich konzentrisch.
3. Dünne Röhren benötigen für ihre Umformung die gleiche Leistung wie Zylinderröhren gleicher Höhe und gleichen Volumens.

Die Abweichungen sind zum Teil so gravierend, dass sie keinesfalls vernachlässigt werden dürfen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Modellerweiterungen vorgenommen, die die Fälle von Haftreibung und das Auftreten von großen Winkeländerungen im Gesenk, wie sie z. B. am Grateinlauf oder bei tiefen Gravuren auftreten können, berücksichtigen, da sie zu Sprüngen bei den Horizontalspannungen, die wiederum Sprünge der Vertikalspannungen nach sich ziehen, führen.

### 2.6.2.2 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode stellt eine besondere Form des RITZschen Ansatzes dar /17/. Die FEM entstand in der linearen Elastizitätstheorie auf der Basis des Prinzips vom Minimum der potentiellen Energie und seiner Abwandlungen. Später wurde sie auch in der Kontinuumsmechanik sowie in der Dynamik eingesetzt. Erste Arbeiten in der Plastomechanik gab es Anfang der siebziger Jahre /48, 49/.

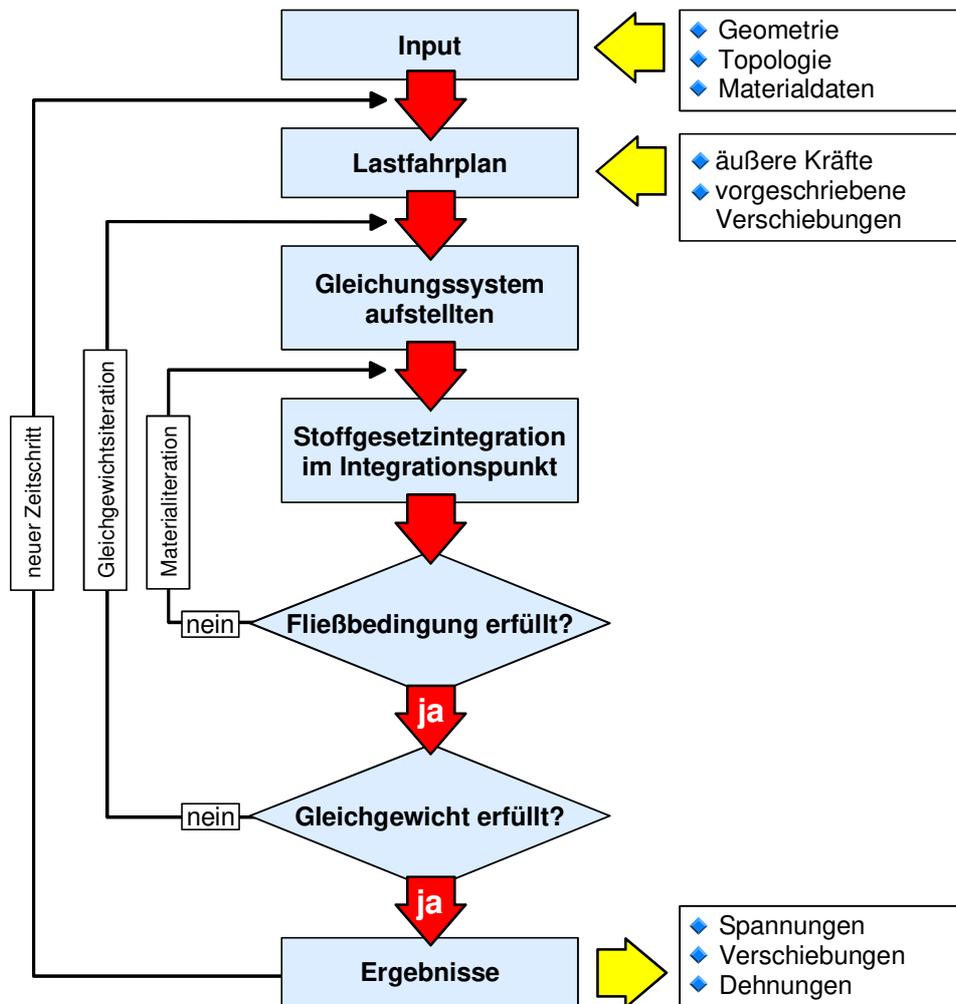


Bild 9: Flussdiagramm einer nichtlinearen FEM-Berechnung /40/

Die der Finiten-Elemente-Methode zugrunde liegende Idee ist die folgende: Jede Ansatzfunktion eines RITZ-Ansatzes für beliebige gesuchten Variablenverteilungen muss im meist stetigen Lösungsgebiet erklärt sein, sie darf jedoch in weiten Teilen des Gebietes stetig verschwinden. Von der Möglichkeit, dass die Ansatzfunktion im Lösungsgebiet verschwinden darf, wird in der FEM stark Gebrauch gemacht: hier wird das Lösungsgebiet in viele kleine Zonen aufgeteilt, die finiten, also endlichen Elemente. Für jedes Element werden einfache Ansatzfunktionen in der Spline-Form, also Polynome niedriger Ordnung, aufgestellt. Die Koeffizienten dieser Ansatzfunktionen werden durch die Funktionswerte oder Ableitungen in den Knotenpunkten festgelegt. Diese Funktionswerte nennt man dann Knotenvariablen /17/.

Auf diese Weise wird erreicht, dass Ansatzfunktionen verwendet werden, die für das einzelne Element in einem angepassten Koordinatensystem leicht beschrieben werden können. Mit einer dem Problem angemessenen Zahl der Knoten und nötigenfalls durch Verwendung geeigneter Ableitungen als Knotenvariablen kann dann nahezu jede Stetigkeitsanforderung erfüllt werden. Die Ordnung der Ansatzfunktionen braucht man nur unwesentlich höher als die Stetigkeitsanforderungen des Problemkreises wählen.

Elementformen sind im einachsigen Fall, der beim Gesenkschmieden praktisch nicht vorkommt, meist Abschnitte von Achsen oder Mittellinien, im zweidimensionalen Fall, für rotationssymmetrische und ebene Problemstellungen, vorwiegend Drei- und Vierecke und im Dreidimensionalen Hexaeder und Tetraeder.

In Bild 9 wird der prinzipielle Ablauf einer nichtlinearen Berechnung unter Nutzung der Finiten Elemente Methode dargelegt. Die Behandlung von geometrischen bzw. physikalischen Nichtlinearitäten erfordert wesentliche Erweiterungen der linearen Betrachtung:

- das Gleichgewicht muss im belasteten Zustand erfüllt werden,
- die Partikelbewegung muss über den Zeitbereich im Raum verfolgt werden,
- das Materialverhalten ist von der Belastungsgeschichte abhängig und
- die Randbedingungen sind von der Lastgeschichte abhängig.

Diese Punkte erfordern eine inkrementelle Berechnung, in der die Gesamtbelastung zerlegt und schrittweise aufgebracht wird. Dabei erfolgt jeder Berechnungsschritt in einem linearisierten Zustand. Die Berechnung der Lösung für das linearisierte System erfordert eine iterative Vorgehensweise, um eine ausreichend genaue Näherungslösung zu erhalten /40/.

### 2.6.2.3 Rand-Elemente-Methode

Im Unterschied zur Finiten-Elemente-Methode kommt die Rand-Elemente-Methode, auch Boundary Element Method (BEM), ohne Gebietsdiskretisierung aus. Im Gegensatz zur FEM muss also bei Anwendung der BEM das Gebiet nicht mit einem Netz finiter Elemente überzogen werden /52, 53, 54/.

Die fehlende Gebietsdiskretisierung wird in eine integrale Beschreibung auf den Rand umformuliert. Damit geht eine Dimensionsstufe verloren, was vorteilhaft für die nachfolgende numerische Behandlung des Problems ist und man kommt mit einer wesentlich geringeren Anzahl von Freiheitsgraden bei der Berechnung aus. Der Aufwand für die Datenaufbereitung sinkt und das algebraische Gleichungssystem reduziert sich entsprechend /23/. Daraus ergibt sich aber nicht zwangsläufig eine Reduzierung des Berechnungsaufwandes im Vergleich zur FEM: das sich ergebende Gleichungssystem ist im Gegensatz zur FEM voll besetzt, nicht symmetrisch und auch nicht positiv definit. Der Vorteil der reduzierten Problembeschreibung kommt besonders kompakten Bauteilen sowie bei Außenraumproblemen zur Geltung.

Die Anfang der siebziger Jahre für rein lineare Probleme entwickelte BEM wurde später auch auf nichtlineare und zeitabhängige Probleme übertragen /55/. Trotz unbestreitbarer Erfolge auch im nichtlinearen Bereich liegen die Hauptvorteile der BEM im linearen Bereich /23/.

### 2.6.3 Ansätze zur schnellen Berechnung von Schmiedevorgängen

Die wichtigsten Verfahren zur Berechnung des Umformvorganges basieren auf der Plastomechanik. Zielgröße der Berechnung ist der Stofffluss, denn Faserverlauf, Gesenkfüllung, Kraftbedarf und Gesenkverschleiß hängen in hohem Maße vom Stofffluss ab. In der Konstruktion und Entwicklung, in der heute ein interaktives Arbeiten mit unterschiedlichen Softwarewerkzeugen notwendig ist, werden zudem Berechnungsprogramme benötigt, die eine Auslegung der notwendigen Umformstufen mit geringem Aufwand ermöglichen. Für die Behandlung axialsymmetrischer Schmiedeteile sind verschiedene Ansätze entwickelt worden. BOUJUT und Mitarbeiter /18, 19/ entwickelten ein Programm zur schnellen Simulation axialsymmetrischer Pressvorgänge auf der Basis eines heuristischen Modells. BRAMLEY /94/ realisierte ein System zur Auslegung von Vorformen beim Schmieden, das auf dem Oberen Schrankenverfahren basiert (UBET: Upper Bound Elemental Technique). DOEGE und Mitarbeiter entwickelten ein schnelles Berechnungsmodell zur Ermittlung des Werkstoffflusses in rotationssymmetrischen und später in scheibenförmigen und gedrungenen Gesenkformen, das nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges arbeitet /20, 21, 22/. DU /6/ ermittelte den Werkstofffluss beim Gesenkschmieden mit einem eigens entwickelten Stäbchenmodell. Hier bildet der Satz der Oberen Schranke die Grundlage.

FLEISCHER /56/ reduzierte die Rechenzeit einer FEM-Simulation für eine Kompressorscheibe zur Grobauslegung um 96 %. Untersucht wurde der Einfluss von Grobsimulation auf den Stofffluss, den

Kraftverlauf, die Vergleichsformänderung und –spannung. Es zeigte sich, dass Kräfte und Stofffluss unter Nutzung einer automatischen Kontaktzonenverfeinerung auch bei groben Simulationsläufen noch tendenziell zu beurteilen sind. Es wurde keine gekoppelte thermisch-mechanische Berechnung durchgeführt. Die Temperatur im Werkstück wurde als konstant angesehen, um auf diese Weise höhere Rechengeschwindigkeiten zu erreichen.

Durch Anwendung der Eulerschen Betrachtungsweise kann die bei Verwendung der FEM auftretende Problematik der im Umformprozess auftretenden großen Verzerrungen des Netzes gelöst werden. Im kommerziellen Softwarepaket MSC/Superforge wurde u.a. durch die Anwendung dieser Technik, kombiniert mit einem Lagrangeschen Oberflächennetz, eine signifikante Berechnungsbeschleunigung erreicht /86/.

## 2.7 Die Theorie der unscharfen Mengen

### 2.7.1 Die Fuzzy-Logik

Bei der mathematischen Beschreibung komplexer technischer Systeme bereiten nichtlineare und zeitinvariante Anteile große Probleme. Außerdem steigt der Schwierigkeitsgrad mit der Komplexität des Systems. Oft kann kein formelmäßiger Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems gefunden werden.

In der klassischen Regelungstechnik herrscht die folgende Vorgehensweise: das zu regelnde System wird in seine Komponenten zerlegt, jede einzelne Komponente wird durch eine Differentialgleichung beschrieben, die, um ein mathematisches Modell des Systems zu erhalten, miteinander verknüpft werden.

Einen ganz anderen Weg geht die Fuzzy-Logik. Sie basiert auf den Ideen von ZADEH, die er in den sechziger Jahren an der University of California - Berkeley entwickelte /68/. Die Grundidee dabei ist, menschliches Erfahrungswissen bei der Regelung schwieriger technischer Prozesse einfließen zu lassen. Ausgehend von einem Satz sogenannter „linguistischer“ Regeln, die die Kontrollstrategie des Reglers beschreiben, wird ein Regelalgorithmus konstruiert, bei dem Worte als sogenannte Fuzzy-Sets definiert sind.

Das Systemverhalten lässt sich durch eine Anzahl von Regeln ausdrücken, die nach und nach ständig verfeinert werden können. Die klassische Logik wird dabei durch die Theorie unscharfer Mengen ergänzt.

### 2.7.2 Grundlagen

Die Theorie der unscharfen Mengen stellt eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre dar. Sie ist jedoch nicht, wie der Name vermuten lässt, ungenau, sondern ist nach klaren Regeln aufgebaut. Während in der klassischen Mengenlehre ein betrachtetes Element eindeutig und vollständig in einer Menge enthalten ist, kann es in einer unscharfen Menge zu einem gewissen Grad enthalten sein. Die Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge wird durch sogenannte Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben. Durch die exakte Zuordnung der Werte 0 und 1 der Zugehörigkeitsfunktion wird eine scharfe Entscheidung getroffen. Dies entspricht den Aussagen „wahr“ und „unwahr“ der klassischen Binärlogik. In der Theorie der unscharfen Mengen werden diese Aussagen der Binärlogik durch alle möglichen Zwischenstufen zwischen 0 und 1 ergänzt. Dies entspricht der Erkenntnis, dass sich sprachliche Ausdrücke wie z.B. „heiß“ oder „kalt“ nicht durch einen exakten Wert beschreiben lassen. Wird der Term „heiß“ zu 50 °C angenommen, so sind auch

Werte in der Umgebung von 50 °C als mehr oder weniger heiß anzunehmen. Begriffe wie „gehört dazu“ oder „gehört nicht dazu“ lassen sich mit Hilfe unscharfer Mengen also aufweichen.

### Linguistische Variablen

Mit Hilfe linguistischer Variablen kann man Aussagen formulieren, die Zustände aus der Arbeits- und Lebenswelt mit Begriffen von Experten beschreiben. Sie unterscheiden sich von numerischen Variablen dadurch, dass ihre Werte nicht Zahlen sind, sondern Wörter und Ausdrücke der Umgangssprache. Da Wörter im allgemeinen nicht so präzise sind wie Zahlen, werden die einzelnen Werte (diese werden auch als Terme bezeichnet) der linguistischen Variablen durch Zugehörigkeitsfunktionen bzw. Fuzzy-Sets dargestellt. Nimmt man z.B. die linguistische Variable „Temperatur“, die einen Wertebereich von 0 und 100 Grad abdecken soll, so lassen sich ihre Werte durch natürlich-sprachliche Ausdrücke darstellen (z.B. sehr kalt, kalt, normal, heiß, sehr heiß). Diese Ausdrücke sind Namen für Fuzzy-Sets.

Verschiedene Formen von Fuzzy-Sets sind möglich, am gebräuchlichsten sind jedoch Dreiecks- bzw. Trapezform. Es ist üblich, dass sich die Sets überschneiden, so dass bei jedem scharfen Eingangswert jeweils 2 Sets angesprochen werden bzw. „feuern“. Außerdem sollte der gesamte Wertebereich einer Variablen abgedeckt sein.

### Unscharfes Schließen

Es gibt folgende wichtige Formen des Schließens:

- Deduktives Schließen (Mathematik),
- Induktives Schließen (Lernen aus Beispielen),
- analoges Schließen,
- und unscharfes Schließen, dass sich unterteilen lässt in:
  - *unscharfe Logik*: Aussagen sind scharf und deterministisch. Die Wahrheitswerte sind aber nicht auf wahr bzw. unwahr beschränkt sondern werden als Terme der linguistische Variablen „Wahrheit“ behandelt.
  - *approximatives Schließen*: Wahrheitswerte sind unscharfe Mengen, die Aussagen können unscharfe Komponenten enthalten (linguistische Variablen, unscharfe Relationen etc.). Entsprechend stehen auch die Schlussfolgerungen in Form linguistischer Variablen und unscharfer Relationen zur Verfügung.
  - *plausibles Schließen*: hier lässt man darüber hinaus zu, dass die Komponenten in den Prämissen und Regeln nicht streng identisch sind.

In der Fuzzy-Logik ist das approximative Schließen maßgebend. Hier besteht eine Regel aus Vorbedingungen (linguistische Variable mit Termen), einem Relevanzgrad der Regel und als Folgerung wieder aus einer linguistischen Variablen.

### Mengenoperatoren

Für die logische Verknüpfung von Fuzzy-Variablen gibt es zahlreiche Operatoren. Zur Operatordefinition sind die Zugehörigkeitsfunktionen zweier Teilaussagen zu einer neuen Zugehörigkeitsfunktion zu verrechnen. Dabei kann Durchschnitt als logisches „UND“ (pessimistische Systembetrachtung), Vereinigung als logisches „ODER“ (optimistische Einschätzung) und das Komplement als logisches „NICHT“ betrachtet werden.

Minimum- und Maximumfunktion sind nicht immer günstig für die Interpretation von „UND“ bzw. „ODER“. Häufig finden deshalb Operatoren Anwendung, die sich als Kombination von je zwei Operatoren mit einem Parameter beliebig einstellen lassen. „Fuzzy-UND“ sowie „Fuzzy-ODER“ bieten sich hier als

interessante Alternativen an. Sie werden auch als kompensatorisch bezeichnet und kombinieren den Minimum- bzw. Maximumoperator mit dem arithmetischen Mittel.

Neben rein mathematischen Forderungen wie Assoziativität, Kommutativität, Monotonie und Stetigkeit interessieren als Auswahlkriterien vor allem die pragmatische Kriterien der Adaptierbarkeit (der Operator soll mit einem Parameter einstellbar sein), die einfache Benutzung, die numerische Effizienz und die Kompensation, womit ein kleiner Wert durch einen großen wie beim Fuzzy-UND kompensiert werden kann.

### 2.7.3 Grundstruktur eines Fuzzy-Controllers

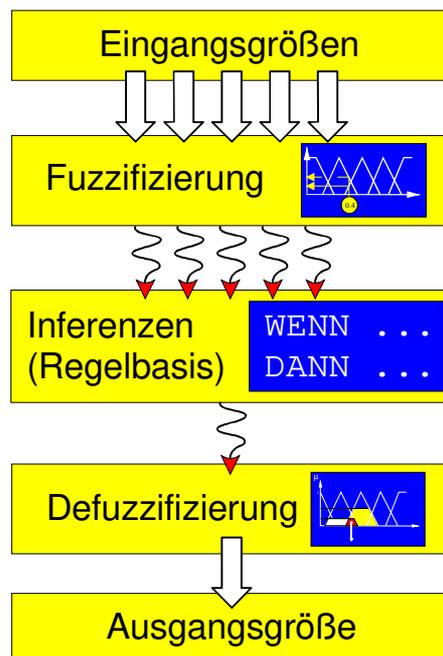


Bild 10: Grundstruktur eines Fuzzy-Controllers

Der Entwurf eines Fuzzy-Controllers nach Bild 10 besteht aus folgenden Schritten:

#### **Fuzzifizierung**

Bei der Fuzzifizierung werden für jede Ein- und Ausgangsgröße Fuzzy-Variablen definiert. Jede Variable wird durch eine beliebige Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen repräsentiert. Es wird nun jedem scharfen Wert dieser Größe ein numerischer Wert einer Zugehörigkeit zu jeder Zugehörigkeitsfunktion zugeordnet. Die Gesamtheit dieser Werte stellt das fuzzifizierte Signal der scharfen Eingangsgröße dar.

Für die Darstellung der Zugehörigkeitsfunktionen haben sich abschnittsweise lineare Funktionen durchgesetzt, die auch in dieser Arbeit Verwendung finden. Der Vorteil liegt in der einfachen Berechnung. Der Verlauf der Zugehörigkeitsfunktionen kann vom Bearbeiter beliebig gewählt werden. Falls das Ergebnis nicht befriedigend ist, ist der Verlauf zu modifizieren.

#### **Regelbasis**

Im Gegensatz zu klassischen Regelalgorithmen verfügt der Fuzzy-Regelalgorithmus über eine Regelbasis, die einen Wissensspeicher darstellt. Die für die Regelung notwendigen Gesetzmäßigkeiten sind in der Regelbasis in Form von WENN-DANN-Regeln abgelegt. Diese Regeln beruhen meistens auf Erfahrungen. Auf diese Weise kann Wissen direkt, ohne den Umweg über die Bildung abstrakter, theoretischer Modelle, umgesetzt werden. Im einfachsten Fall wird sie durch eine 2-dimensionale Matrix repräsentiert, die durch

die Fuzzy-Variablen zweier Eingangsgrößen A und B mit ihren Termen  $A_1...A_n$  und  $B_1...B_n$  aufgespannt wird. Die Anzahl der Regeln richtet sich nach der Anzahl der Terme.

### **Inferenz**

Bei der Inferenz werden die in der Regelbasis festgelegten Regeln auf die in der Fuzzifizierung ermittelten Zugehörigkeitsgrade angewandt. Am Ende der Inferenz stehen wieder Zugehörigkeitsgrade, und zwar die der Ergebnisteilmengen der Ausgangsgröße.

Bei nur einer Prämisse wird der Wert des Zugehörigkeitsgrades aus der Prämisse für den Zugehörigkeitsgrad der Schlussfolgerung übernommen. Bei mehreren Prämissen werden die Werte der einzelnen Zugehörigkeitsgrade nach den Regeln der unscharfen Logik (UND, ODER...) miteinander verknüpft. In diesem Fall muss dafür ein geeigneter Operator ausgewählt werden. Für die Wahl eines Operators gibt es keine festen Gesetze, er muss ein gegebenes Problem zur Zufriedenheit lösen. Ist dies nicht der Fall, kann er gegen einen anderen Operator der gleichen Verknüpfung ausgetauscht werden. In der Praxis werden hauptsächlich der Minimumoperator für die UND- und der Maximumoperator für die ODER-Verknüpfung verwendet. Sie sind für viele Probleme brauchbar und mit einem geringen Rechenaufwand verbunden.

### **Defuzzifizierung**

Bei der Defuzzifizierung erfolgt die Umsetzung einer unscharfen, fuzzifizierten Größe in einen scharfen Ausgangswert. Die mit der Inferenz ermittelten unscharfen Ausgangsmengen werden in eine konkrete Zahl umgerechnet. Für die Umsetzung gibt es verschiedene Möglichkeiten, die teilweise unterschiedliche Ergebnisse liefern. Auch hier gilt, dass das Ergebnis den Ansatz rechtfertigt. Löst ein bestimmter Ansatz ein gegebenes Problem nicht befriedigend, so ist ein anderer, besser geeigneter Ansatz zu wählen.

Zur Defuzzifizierung der Ergebnisflächen der Ausgangsgröße haben sich vor allem zwei Verfahren in der Praxis bewährt, die „Mean of Maximum“ Methode und die Flächenschwerpunktmethode.

Die erst genannte Methode eignet sich eher für überschlagsmäßige Berechnungen. Am häufigsten wird die Flächenschwerpunktmethode verwendet. Bei ihr werden entsprechend dem STEINERSchen Satz Flächenteilmomente bezüglich  $y=0$  aufsummiert und durch die Gesamtfläche dividiert. Als Ergebnis erhält man die scharfe Ausgangsgröße.

## **2.8 Vorarbeiten**

Schon 1990 zeigte MATHIEU /21/, dass sein Werkstoffflußsimulationsprogramm PRASTAG, welches auf seinem „Prinzip des kleinsten Zwanges“ beruhte, das Fließverhalten des Werkstoffes für rotationssymmetrische Schmiedeteile bei Nutzung eines 2D-Modelles mit akzeptabler Genauigkeit bei vergleichsweise kurzen Berechnungszeiten wiedergibt. Er ging davon aus, dass die Geometrien der Werkzeuge und des Werkstückes den größten Einfluss auf die Schmiedeergebnisse haben und dass der Werkstoff des Werkstückes deshalb in die Richtung des kleinsten Zwanges fließt.

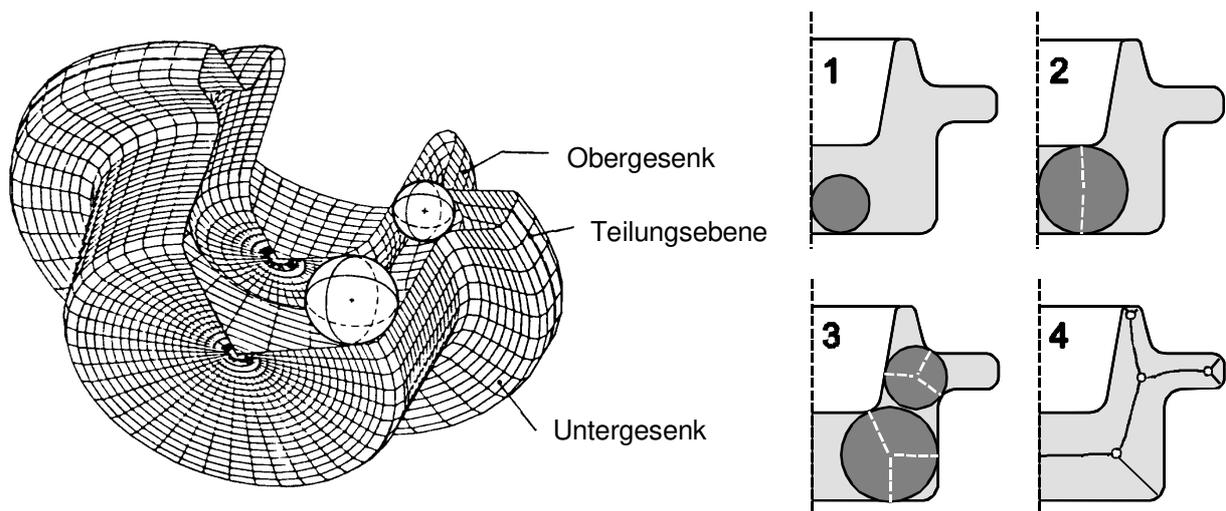


Bild 11: Berechnungsmodell von MATHIEU. Mit Hilfe von Verdrängungsbahnen werden für zweidimensionale Schmiedevorgänge Fließwiderstände berechnet /21/.

Die folgenden Punkte standen dabei im Mittelpunkt:

- geringe Rechenzeiten für den gesamten Simulationslauf im 2D-Modell,
- der in der Realität kontinuierlich ablaufende Prozess wird diskretisiert,
- der Werkstofffluss läuft nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges ab, wobei die örtliche Volumenänderung nicht betrachtet wird,
- die Geometrie hat den größten Einfluss auf das Fließverhalten,
- die Materialbewegung findet auf Verdrängungsbahnen statt, die vorwiegend parallel zu den Achsen der Haupt- und Nebenformelemente verlaufen,
- das Gesamtvolumen bleibt konstant.

Der Ansatz wurde entwickelt, nachdem festgestellt wurde, dass die in der Vorschmiedeformentwicklung nach den Regeln von SPIES /30/ ermittelten Einlegeformen für Schmiedeteile im Schmiedeversuch weiterhin Fehler aufwiesen. Es wurde somit erforderlich, die Qualität der Vorschmiedeform mit Hilfe eines Berechnungsprogramms zu überprüfen. Das geschaffene Programm eignete sich aufgrund seines universellen Ansatzes nicht nur zur Überprüfung der Vorschmiedeform, auch jede beliebige andere, bereits entwickelte Vorform konnte mit PRASTAG überprüft werden.

Die Berechnung erfolgte in sechs Rechenschritten: die Datenaufbereitung aus der technischen Zeichnung, das Plotten zur optischen Kontrolle der eingegebenen Daten, die Datensicherung, die Netzpunktgenerierung, die Berechnung der Simulationsausgangsposition sowie die eigentliche Werkstoffflußberechnung mit Materialverdrängung, Materialbewegung und Materialanhäufung.

BENEKER entwickelte bis 1995 den in PRASTAG verwendeten Ansatz weiter, indem er das zweidimensionale Berechnungsmodell zur Berechnung rotationssymmetrischer Teile auf eine solche Weise verknüpfte, dass gedrungene und scheibenförmige Schmiedeteile in kurzer Zeit mit guter Genauigkeit berechnet werden konnten /22/. Ausgehend von einem „Verdrängungszentrum“ wird der Werkstoff entlang der nach dem Algorithmus von MATHIEU berechneten Verdrängungsbahnen in die Fließzonen verteilt. Gesteuert wurde der Werkstofffluss durch eine Reihe von Kennlinien, die im Vorfeld der Berechnung auf die realen Gegebenheiten, ähnlich zur FEM, zu kalibrieren waren.

Bei der Erfassung der Materialbewegung wurde angenommen, dass der beim Zusammenfahren verdrängte Werkstoff entlang der mit dem Kugelmodell ermittelten Hauptverdrängungsbahnen bewegt wird. Die

Intensität der Bewegung entlang der Bahnen wurde durch die Veränderung des Kugeldurchmessers im Verhältnis zum zurückgelegten Weg der Kugel erfasst.

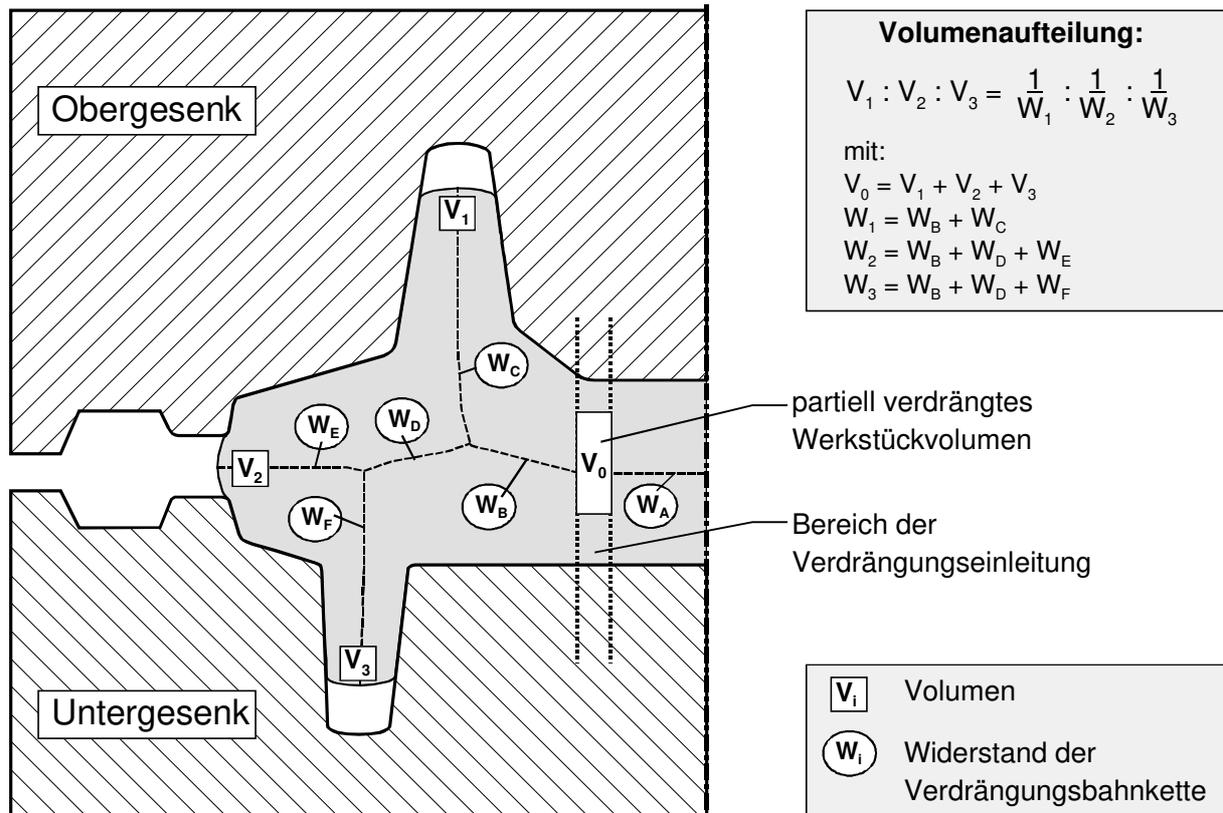


Bild 12: Berechnung der Werkstoffbewegung im rotationssymmetrischen Modell /22/

Im verwendeten Modell lag der Startpunkt einer Widerstandsberechnung am Ort der Verdrängung eines partiellen Volumenelementes (Bild 12). Ausgehend von diesem Punkt erfolgte die Berechnung der Fließwiderstände für alle einzelnen Bahnketten. Die Aufteilung des verdrängten Volumens erfolgte im umgekehrt proportionalen Verhältnis zu den berechneten Gesamtwiderständen der Bahnketten.

Die Werkstoffanlagerung, d. h. die eigentliche Modifizierung der Werkstückoberflächengeometrie, erfolgte erst nach der Berechnung der Werkstoffbewegung. Während jedes Iterationsschrittes wurde hierbei die Kontur des Werkstücks in jeder Schnittebene in Richtung des freien Werkzeugraums verschoben.

Das verdrängte Volumen wurde durch Verschiebung der einzelnen Konturkurven angelagert. Die Intensität der Verschiebung war dabei abhängig von den ermittelten lokalen Widerstandswerten (Bild 12). Die Anlagerung erfolgte in einer Iterationsschleife, wobei in jedem der Iterationsschritte alle vorhandenen Konturkurven bewegt wurden. Die Schleife wurde erst dann abgebrochen, wenn eine dem verdrängten Volumen entsprechende Menge des Werkstoffs zu den Anlagerungsstellen bewegt wurde.

Die lokale Verformung an den einzelnen Anlagerungsstellen erfolgte als vektorielle Verschiebung der die Außenhaut des Werkstücks beschreibenden Punkte in den einzelnen Schnittebenen. Die an den jeweiligen Stellen zu verwendenden Vorschubvektoren ergaben sich aus den mit dem Kugelmodell berechneten, lokal zugelassenen Volumenströmen.

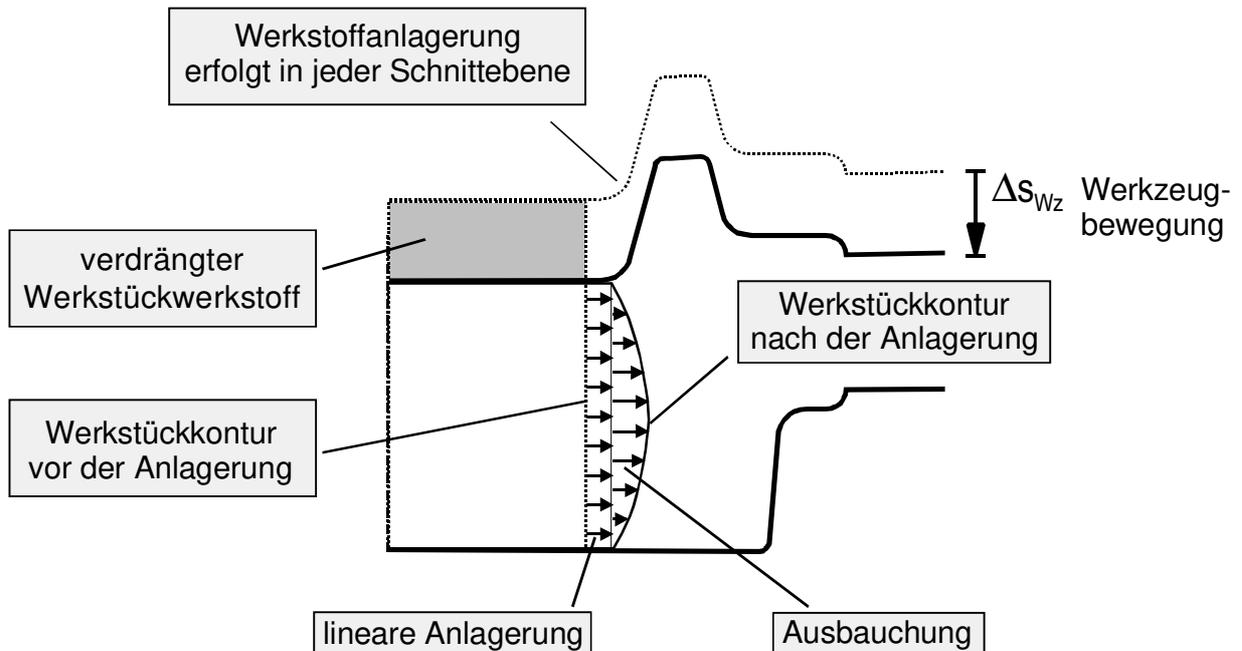


Bild 13: Lineare Anlagerung des Werkstoffs mit überlagerter Ausbauchung in einer Schnittebene /22/.

Das Prinzip des Vorschubs einer einzelnen Anlagerungskonturkurve ist in Bild 13 dargestellt. Die Verschiebung erfolgte linear mit überlagerter Ausbauchung. Es wurden pro Iterationsschritt jeweils alle Anlagerungsstellen in allen Schnittebenen gleichzeitig behandelt und das Volumen des Werkstücks neu berechnet. War eine dem verdrängten Volumen entsprechende Menge angelagert, wurde die Iterationsschleife verlassen und die Simulation eines neuen Umformschrittes konnte beginnen.

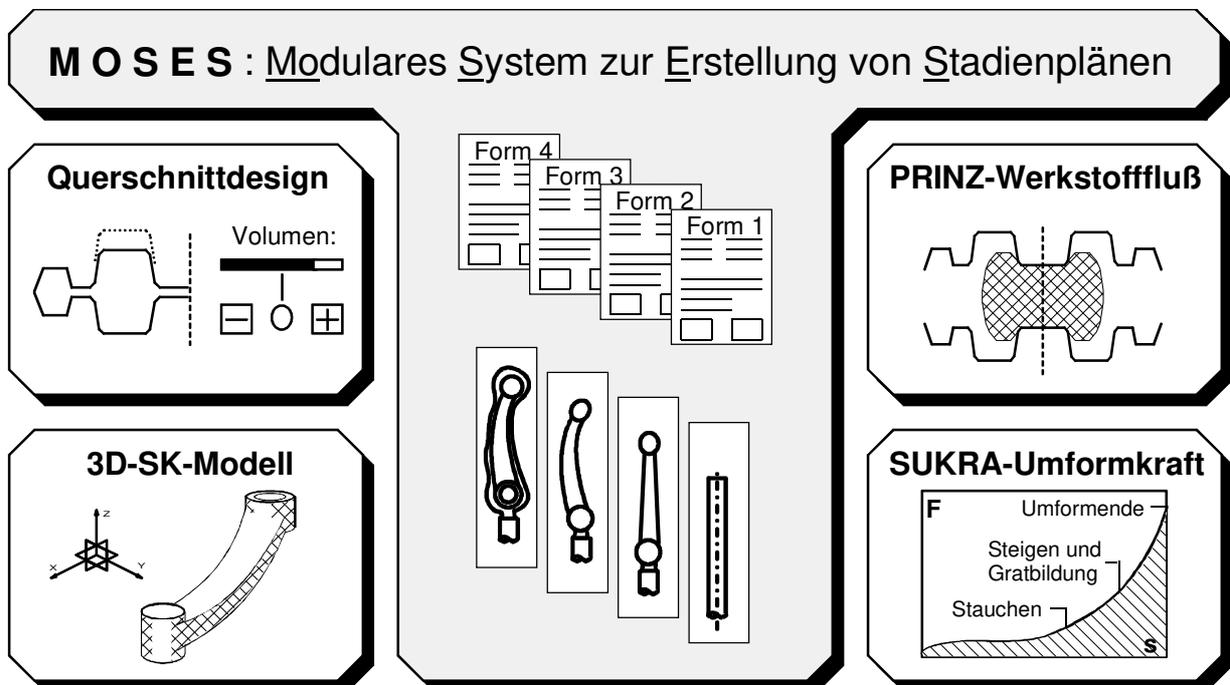


Bild 14: Modulares System zur Erstellung von Stadienplänen /22/.

Das weiterentwickelte Simulationsprogramm wurde in ein modulares System zur Erstellung von Stadienplänen (MOSES) eingebettet (Bild 14). Geometrisch einfache Bauteile und die zu deren Herstellung notwendigen Umformwerkzeuge konnten direkt in Form ausgewählter Konturkurven vorgegeben werden. Gleiches galt für vereinfachte Darstellungen komplexer Teile.

Das Gesamtsystem beinhaltet neben dem Basisprogramm MOSES zur Stadienplanverwaltung die folgenden, in Bild 14 dargestellten Module:

- Querschnittsdesign als einfacher Modellierer von 2D-Schnittkurven,
- 3D-SK-Modell (Schnittkurvenmodell),
- PRINZ-Werkstofffluss-Simulation (Prinzip des kleinsten Zwanges) und
- Umformkraftberechnung (Spannungs- und Kraftberechnung nach der Elementaren Plastizitätstheorie).

In MOSES implementiert wurde ein Berechnungsmodul zur Ermittlung von Umformkraft und Umformarbeit SUKRA, das auf den Arbeiten von MARQUARDT /60/ basiert. Eingesetzt wurden das Röhren- und das Streifenmodell der Elementaren Plastizitätstheorie zur Berechnung rotationssymmetrischer bzw. ebener Umformvorgänge.

Die Ergebnisse stellen einen groben Näherungswert dar, da die Modelle der Elementaren Plastizitätstheorie streng genommen nur zwischen axialsymmetrischen, schalenförmigen Stauchbahnen gültig sind und dieser einfache Sonderfall in der Praxis nur selten auftritt. Die Berechnungsergebnisse waren jedoch als Auswahlkriterium für das zu verwendende Umformaggregat hinreichend genau.

## 3 Problemstellung und Zielsetzung

### 3.1 Problemstellung

Das Gesenkschmieden hat große Bedeutung für die Volkswirtschaft Deutschlands. So werden ca. 45 % aller massiv umgeformten Werkstücke Europas in Deutschland hergestellt. Dieser Industriezweig setzt ca. 12 Mrd. DM pro Jahr (einschließlich Kaltmassivumformung und mechanische Bearbeitung) um /64/.

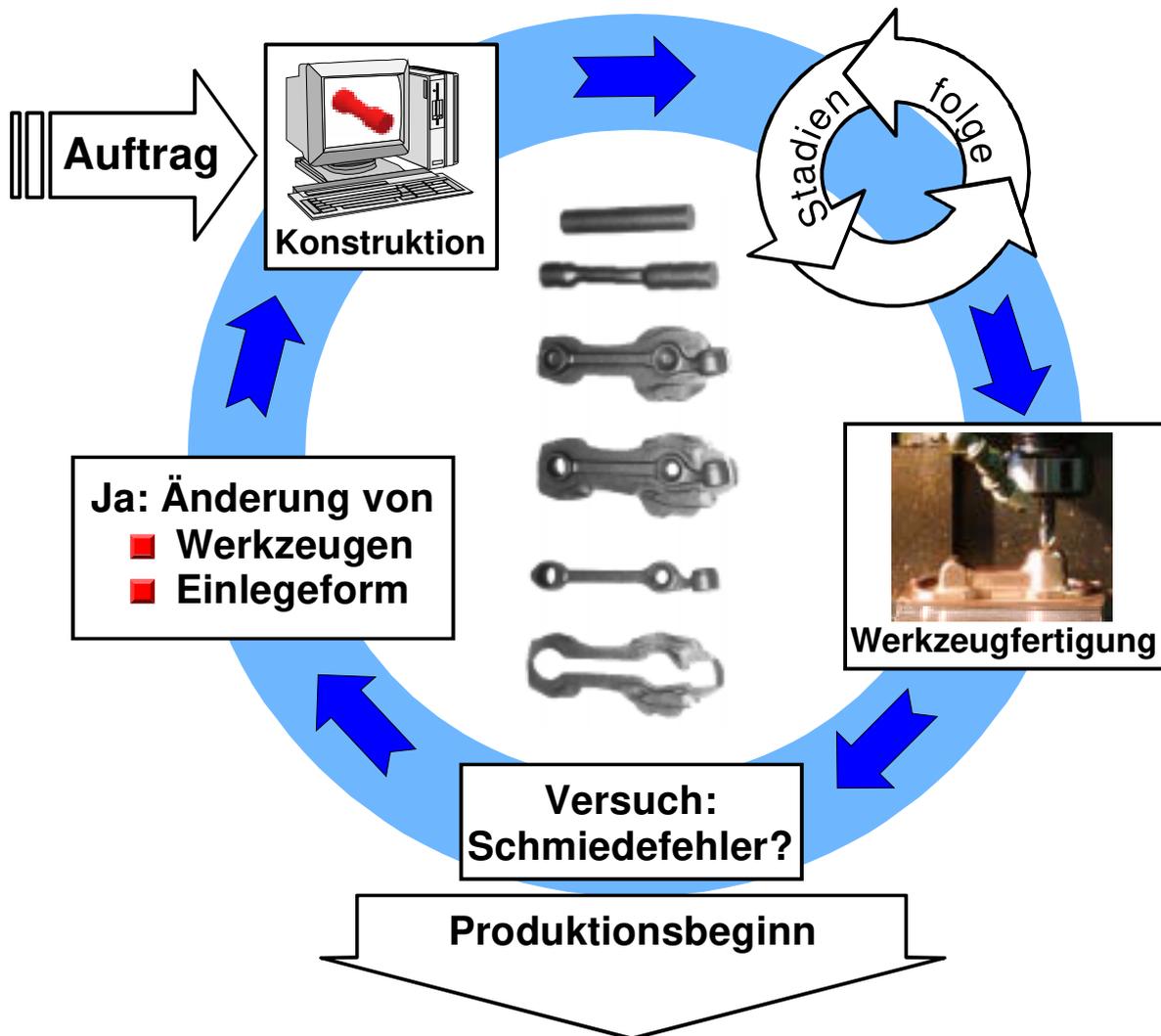


Bild 15: Vereinfachte, traditionelle Vorgehensweise bei der Stadienplanung von nicht-achsensymmetrischen Teilen.

Die Trends in der Schmiedeindustrie gehen in Richtung Präzisionsschmieden, durchgreifende Automatisierung, kleinere Serien und größere Anzahl von Varianten und Neuteilen, Einsatz von Leichtmetallen (besonders für die Luft- und Raumfahrt sowie für die Automobilindustrie), kundenspezifische Werkstoffwahl und Beeinflussung der Eigenschaften sowie Erweiterung der

Formänderungsgrenzen. Ziel ist die Verbesserung der Qualität der Produkte bei gleichbleibenden bzw. geringeren Kosten.

Für die Auslegung der Schmiedeprozesse war bisher Erfahrung und Fingerspitzengefühl von höchster Bedeutung (**Bild 15**). Die hier dargestellte, ineinander verschachtelte Iterationsschleife kann mehrmals durchlaufen werden, nicht dargestellt sind die auch für Konstruktion und Versuche notwendigen Iterationsschleifen. Das Umformen von Metallen stellt einen hochgradig nichtlinearen, dynamischen Prozess dar. Abgesehen von der Finiten-Elemente-Methode in einigen Bereichen ist es bisher noch nicht gelungen, ein umfassendes Modell der Vorgänge zu entwickeln. Alle Versuche scheiterten an den schwer vorhersehbaren Vorgängen. Selbst Mitarbeiter mit jahrzehntelanger Erfahrung können komplizierte Schmiedevorgänge nicht im Voraus vollständig beurteilen und auslegen.

Schmiedeprozesse bestehen, besonders bei komplizierter Gestalt und hohen Stückzahlen, aus vielen Fertigungsschritten, der Stadienfolge (**Bild 16**). Hier müssen viele Aspekte der Prozessentwicklung in Einklang gebracht werden. Eine große Rolle spielen der Werkstoff, die Eigenschaften des Werkstückes nach der Umformung, geforderte Genauigkeit, die Standzeit und die Kosten der Werkzeuge, die Art, Anzahl und Kosten der verfügbaren Maschinen, Anlagen und des Personals zur Durchführung der notwendigen Umformoperationen. Die Stadienfolge wird dokumentiert im Stadienplan, der wiederum die Grundlage des Arbeitsplanes ist. Der Arbeitsplan beinhaltet neben den Umformoperationen noch alle anderen Fertigungsschritte, so z.B. die nachfolgende mechanische Bearbeitung, Zwischenglühen, die Logistik usw..

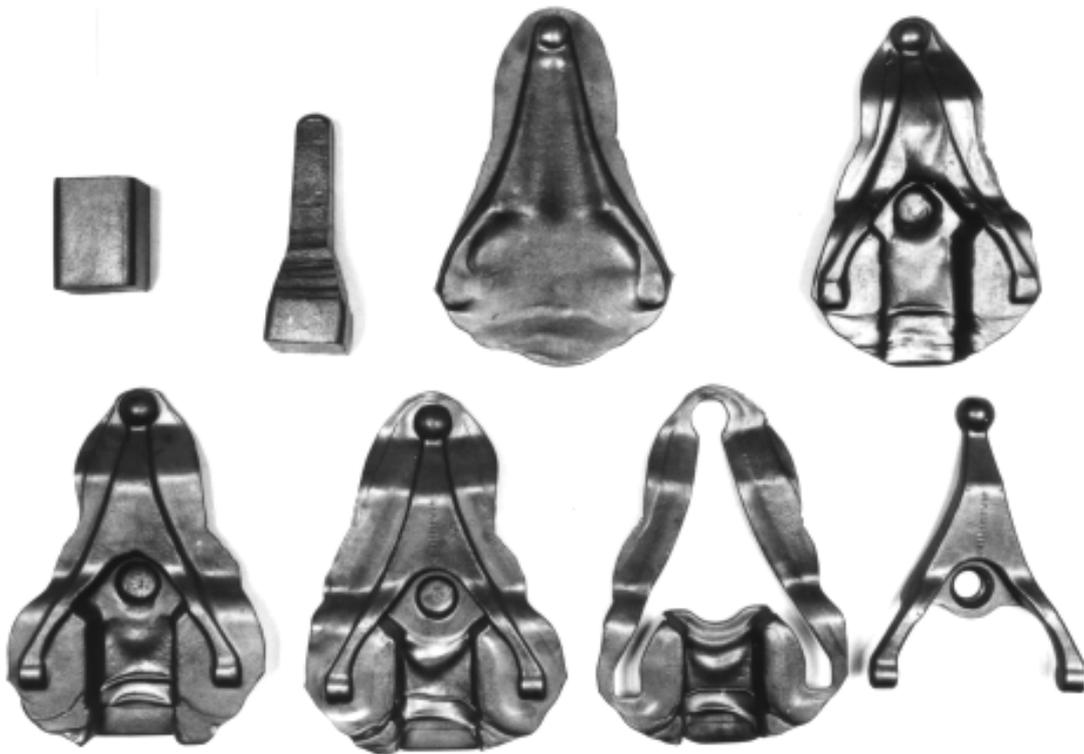


Bild 16: Stadienfolge einer Schaltgabel

Beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse kann der Stadienplan erst vollständig aufgestellt werden, wenn durch Versuche sichergestellt wurde, dass die projektierte Fertigungsfolge funktioniert. Es entsteht eine Schleife: für die Versuche sind Arbeitspläne notwendig, Werkzeuge müssen angefertigt werden, Produktionsmaschinen und -anlagen müssen zur Sicherung der Reproduzierbarkeit des Prozesses freigegeben werden, Personal muss umdisponiert werden. All das verursacht hohe Kosten. Misslingt der

Schmiedeversuch, bei komplizierteren Vorgängen Alltäglichkeit, müssen die Pläne abgeändert, Werkzeuge umgearbeitet oder neu angefertigt und der Versuch neu gestartet werden. Diese langwierige Handlungsweise führt selbstverständlich zu langen Entwicklungszeiten und hohen Werkzeugkosten. Für nichtrotationssymmetrische Schmiedestücke dauert deshalb die Entwicklung ca. 3 bis 4 Monate, die Werkzeugkosten machen durchschnittlich 18 % der Gesamtkosten der Schmiedeproduktion aus /90/.

Für die Entwicklung von Schmiedeprozessen sind deshalb Softwarewerkzeuge notwendig, die im Vorfeld von Versuchen und Produktion die Herstellbarkeit und die Prozessbedingungen prüfen. Die Voraussetzungen dafür sind heute sehr gut. Sehr viele Unternehmen setzen inzwischen für die Modellierung der Schmiedestücke und –werkzeuge CAD-Systeme ein. Die CAD-Modelle können für die Herstellung der formgebenden Werkzeuge auf numerisch gesteuerten Fräs- und Erodiermaschinen verwendet werden. Sie können für FEM-Berechnungen genutzt werden, die spanende Nachbearbeitung kann wiederum auf NC-Maschinen erfolgen, deren Steuerdaten auf der Basis des CAD-Modells des Fertigteils generiert werden. Die Modelldaten des Kunden werden immer häufiger übernommen, sie werden für die schmiedetechnischen Belange modifiziert und gemeinsam mit den Teilen ausgeliefert, um beim Kunden Einsatz in komplexen Baugruppenmodellen oder in Untersuchungen in Systemen des virtuellen Prototyping Einsatz zu finden.

Zur Unterstützung der Vorformauslegung wird bei rotationssymmetrischen Problemstellungen die Finite-Elemente-Methode immer mehr mit Erfolg eingesetzt. Im Dreidimensionalen wird sie zur Zeit in der Industrie zwar getestet, aber noch nicht für praktische Lösungen genutzt. Grund sind die hohen Kosten für Personal, Hard- und Software und die enormen Rechenzeiten. Von der Schmiedeindustrie selbst wurde formuliert, was benötigt wird: erforderlich sind Simulationsmethoden, die Projektzeiten, also Entwicklung von kompletten Fertigungsplänen, von unter 3 Wochen ermöglichen und insgesamt keine höheren Kosten als ca. 30.000 DM pro Projekt verursachen /9/.

Die in diesem Kapitel erläuterten Probleme können nur mit Hilfe eines Simulationssystems zur Prozessmodellierung gelöst werden, welches sehr frühzeitig während der Entwicklung der Prozessfolge zum Schmieden eingesetzt werden kann, d.h. konstruktionsintegriert. Ein solches Simulationssystem kann dazu beitragen, die Entwicklungszeiten zu verkürzen, die Anzahl der Versuche herabzusetzen oder gänzlich zu ersetzen und insgesamt die Kosten zu reduzieren. Es muss extrem kurze Antwortzeiten aufweisen und einfach zu bedienen sein, so dass der Konstrukteur, der die Ergebnisse benötigt und in seinen Entwurf einarbeiten muss, die Berechnung ohne Hilfe eines Berechnungsspezialisten durchführen kann. Nur so kann die logische Folge Konstruktion – Stadienplan – Arbeitsplan – Produktion ohne Iterationsschleifen durchlaufen werden.

## 3.2 Zielsetzung

Ziel ist es, ein Berechnungssystem, welches die schnelle Modellierung von Langteil-Schmiedeprozessen ermöglicht, zu entwickeln. Dazu bedarf es der Schaffung einer wirtschaftlichen Methode zur Simulation des Werkstoffflusses beim Gesenkschmieden als konstruktionsbegleitende Maßnahme zur Optimierung des Produktionsprozesses.

Die für die Konstruktion notwendigen Informationen, die sich bisher erst in nachfolgenden Schmiedeversuchen auf Produktionsmaschinen auf kostenintensive Weise sammeln ließen, sollen dort bereitgestellt werden, wo sie benötigt werden. Ziel ist es folglich, die konstruktive Auslegung der Stadienfolge einschließlich aller dafür notwendigen Werkzeuge auf eine neuartige Weise zu optimieren. Ergebnis dieser optimierten Vorgehensweise wird die Möglichkeit sein, in sich geschlossene, optimierte, funktionsfähige und vollständige Stadienfolgen ohne zusätzliche aufwendige Versuche in vergleichsweise

kurzer Zeit zu gestalten. In Bild 17 ist die mögliche, grundsätzliche Vorgehensweise dargestellt: durch die wechselseitige Anwendung von Konstruktion und interaktiv nutzbaren Simulationenethoden kann in kurzer Zeit eine optimierte, fehlerfreie Stadienfolge entwickelt werden, die nur noch geringer oder keiner experimenteller bzw. numerischer Nacharbeit bedarf.

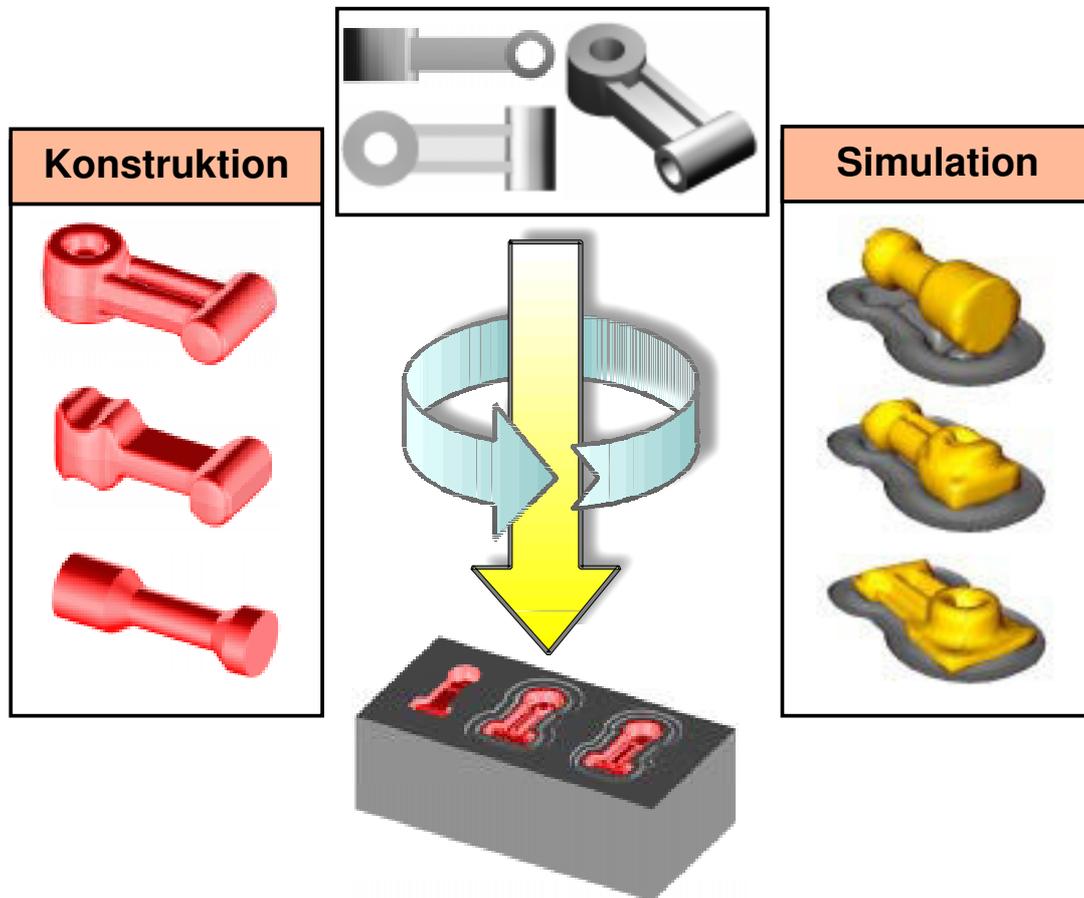


Bild 17: Simulationsgestützte Konstruktion von Schmiedeteilen und -werkzeugen /29/.

Die Ziele für die Entwicklung der Simulationssoftware lassen sich aus von der deutschen Schmiedeindustrie formulierten Anforderungen /9/ ableiten.

Folgende Anforderungen hat das zu erstellende Programmsystem im einzelnen zu erfüllen:

- Extrem kurze Berechnungszeiten,
- Beschränkung auf Umformprozesse beim Gesenkschmieden unter Nutzung von optimierten, hochspezialisierten und schnellen Algorithmen für diesen Anwendungsfall,
- Beschränkung des Funktionsumfangs der Berechnung auf die Fließvorgänge und die Berechnung der Umformkraft bzw. -arbeit,
- skalierbare Genauigkeit, da:
  - der Prozess in der Produktion je nach Prozessführung erheblichen Schwankungen ausgesetzt ist und deshalb eine 100%-Präzision beim gegenwärtigen Wissensstand über die Vorgänge während des Prozesses und dessen Randbedingungen auch bei genauester Berechnung nicht möglich ist,
  - nur ausgewählte geometrische, werkstoff- und prozessspezifische Einflussgrößen sowie Randbedingungen in die Berechnung eingehen,
  - auf diese Weise die Berechnungsgeschwindigkeit erhöht werden kann,

- automatische Vernetzung der im CAD-System modellierten Werkzeuge und des Werkstückes,
- kurze Einarbeitungszeiten, d.h. einfache Bedienung und Erlernbarkeit,
- übersichtliche, dreidimensionale, dem Einsatzfall in der Werkzeugkonstruktion und Stadienplanung angemessene Präsentation und Auswertung der Daten,
- Lauffähigkeit auf Standardhardware, zur Zeit: x86-PC,
- interaktive Nutzung des Systems im Wechsel mit 3D-CAD-Systemen,
- benutzerfreundliche „Plug&Play-Konfiguration“: Bedienung des Systems ohne aufwendige Installation und mit Standardvorgaben ist möglich.

## 4 Werkstoffflußsimulation mit PRINZ

### 4.1 Voraussetzungen für die Modellierung des Schmiedeprozesses mit PRINZ

Voraussetzung für die Berechnung eines Schmiedevorganges ist das Vorhandensein von 3D-CAD-Modellen der Werkzeuge und der Einlegeform des Werkstückes. Sie sollten möglichst als Volumenmodell vorliegen, da diese fehlerfrei mathematisch beschrieben werden können. Flächenmodelle müssen fehler- und lückenfrei modelliert sein. Für die Vorbereitung der Modelle zur Simulation müssen Werkzeuge und Werkstück im CAD-System im Raum positioniert werden. Dabei hat der Anwender die aus realen Schmiedungen bekannte Anordnung einzuhalten: zwischen Ober- und Untergesenk wird das Werkstück angeordnet. Die Werkstückposition ist besonders sorgfältig zu wählen: Das Werkstück muss, genau wie in der Realität, in das Untergesenk „hineinfallen“. Da für PRINZ noch kein automatischer Schmiedestück-Positionierer existiert, muss dies vom Konstrukteur vorgenommen werden. Moderne Volumenmodellierer bieten aber eine reichhaltige Funktionalität, die aus dieser Aufgabe keine Schwierigkeit machen sollten. Zur Vereinfachung dieser Aufgabe wurde das Programm P-TOOL als Zusatzmodul zu Pro/ENGINEER geschaffen, welches in dieser Arbeit in *Kapitel P-TOOL* auf Seite 95 vorgestellt wird.

Vor Beginn und während des Verlaufes der Simulationsrechnung müssen weiterhin Anfangs- und Randbedingungen bekannt sein. Sie stellen ein Modell des neben den Geometriedaten in der Realität vorhandenen Umfeldes dar. Einige zusätzliche Informationen können aus den gegebenen Informationen abgeleitet werden. So kann z.B. die Umformgeschwindigkeit vereinfacht aus der Auftreffgeschwindigkeit des Stößels auf das Werkstück und den vorhandenen geometrischen Informationen über das Werkstück berechnet werden:

$$\text{Umformgeschwindigkeit: } \dot{\phi}_0 = \frac{v_0}{h} \quad (\text{Gl. 1})$$

| Anfangs- bzw. Randbedingungen | Größe  | Einheit           |
|-------------------------------|--------|-------------------|
| Fließspannung                 | $k_f$  | $\frac{N}{mm^2}$  |
| Dichte                        | $\rho$ | $\frac{kg}{dm^3}$ |
| Werkstücktemperatur           | $T$    | $^{\circ}C$       |
| Stößelgeschwindigkeit         | $v_0$  | $\frac{m}{s}$     |
| Werkstückvolumen              | $V$    | $mm^3$            |
| Reibfaktor                    | $m$    | -                 |

Tabelle 2: Erforderliche Randbedingungen zur Simulationsrechnung mit PRINZ

Die Komplexität eines Realprozesses kann in einer Simulationsrechnung nicht wiedergegeben werden. Insbesondere für ein Rechenmodell, welches die nichtlinearen Fließvorgänge beim Schmieden in kurzen Reaktionszeiten darstellen soll, aber auch für alle anderen bekannten Rechenmethoden, müssen Vereinfachungen getroffen werden.

1. Thermische Einflüsse wie Wärmeleitung, Strahlung, Konvektion und Wärmeübergang sowie dissipative Einflüsse werden nicht berücksichtigt, die Werkstücktemperatur wird konstant gehalten.
2. Die Werkstoffeigenschaften sind homogen isotrop, Gefügeänderungen werden nicht berücksichtigt. Das Materialmodell berücksichtigt nur metallische Werkstoffe.
3. Die Materialeigenschaften des Werkstückes werden in einem starr-plastischen Fließgesetz formuliert, Einflüsse der elastischen Formänderungen werden vernachlässigt. Das Fließgesetz beruht auf der Annahme, dass im Werkstück ein hydrostatischer Spannungszustand herrscht.
4. Die Werkzeuge werden als ideal starr vorausgesetzt. Ihre Auffederung wird nicht berücksichtigt.
5. Es wird kein Bewegungsgesetz der Umformmaschine implementiert. Die Stößelgeschwindigkeit wird als konstant angesehen, ebendies trifft dann auch auf die Umformgeschwindigkeit zu.
6. Die Fließspannung wird als konstant angesehen. Da es sich bei PRINZ um ein Berechnungsprogramm für Warmumformvorgänge handelt, ist es zulässig, die annähernd horizontale Fließkurve der Werkstücke bei diesen Temperaturen in dieser Form zu vereinfachen.
7. Die Reibung als Einflussgröße auf das Berechnungsergebnis wird zu einer zeitlich und örtlich unveränderlichen Größe eines Reibfaktors vereinfacht. Diese Vorgehensweise ist auch bei FEM-Berechnungen üblich.
8. Kontaktidentifizierung und -modellierung erfolgt nur bei auftretendem Kontakt Schmiedeteil – Werkzeug. Werkstück – Werkstück – Kontakt wird durch interne Netzoptimierung korrigiert.
9. Zeitintegrationsverfahren wurden nicht implementiert.
10. Es sind nur mechanische Vorgänge zu berechnen.

Bei PRINZ handelt es sich um ein inkrementelles Verfahren, d.h. durch schrittweise Berechnung der Umformung werden in jedem Schritt nur kleine Verzerrungen zugelassen. Nach jedem Schritt wird durch eine Netzoptimierung ein Ausgangszustand wieder hergestellt.

## 4.2 Spezifikation

Das erstellte Softwaresystem ist spezialisiert auf die Simulation von Warmmassivumformvorgängen.

PRINZ ist streng modular aufgebaut. Das bringt die folgenden Vorteile:

- Die Software trägt dem Status als Forschungs- und Entwicklungswerkzeug Rechnung, indem flexibel Unter- oder Zusatzprogramme hinzugefügt oder ausgetauscht werden können.
- Die einzelnen Module lassen sich unkompliziert warten.
- Die Module lassen sich leicht auf andere Plattformen portieren.
- Die sich durch den technischen Fortschritt ergebenden Veränderungen bzgl. Hardware, Betriebssystemen und Entwicklungsumgebungen können optimal genutzt werden.
- Die unterschiedlichen Module innerhalb des Gesamtsystems wurden in der für die jeweiligen Aufgaben zweckmäßigsten Umgebung und Programmiersprache geschrieben.

- Die parallele Abarbeitung von Aufgaben der Berechnung, Datenvorbereitung und Analyse bei Nutzung von Mehrprozessorsystemen ist möglich.

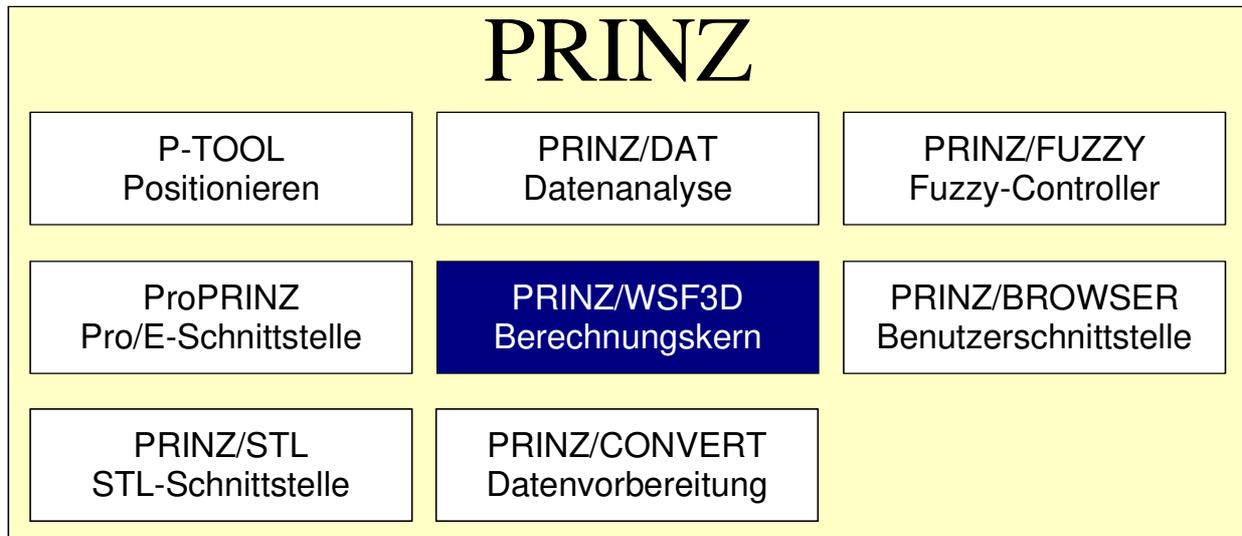


Bild 18: Die PRINZ-Module

PRINZ untergliedert sich entsprechend Bild 18 in die Module:

- **PRINZ/WSF3D** Der Berechnungskern für die Berechnung des Werkstoffflusses. Geometriedaten werden in Form des Oberflächennetzes eingegeben. Rand- und Anfangsbedingungen werden über eine Steuerdatei eingelesen. Während der Berechnung wird eine Ausgabedatei für das Postprocessing mit allen Simulationsdaten geschrieben. Bei Langteilen erfolgt die Berechnung unter ständiger Kommunikation mit PRINZ/FUZZY.
- **PRINZ/FUZZY** Der Fuzzy-Controller dient der Berechnung der Volumenströme in Langteilen. (4.5 *Der nichtsymmetrische Werkstofffluss* auf Seite 41)
- **PRINZ/BROWSER** PRINZ/BROWSER ist die Benutzerschnittstelle, die alle Module von PRINZ zusammenfasst. Simulationsprojekte erlauben die übersichtliche Datenhaltung, alle Steuer- und Eingabedateien werden graphisch unterstützt, sämtliche Funktionen können angesprochen werden. Im Hinblick auf die zukünftige Internetpräsenz wurde diese Anwendung als HTML-Dokument mit Java entwickelt.
- **PRINZ/DAT** PRINZ/DAT heißt „PRINZ-Daten-Analyse-Tool“. Hier erfolgt das Postprocessing der berechneten Informationen. Die Objekte werden in dreidimensionaler Form auf dem Bildschirm dargestellt und bewegt. Neben der Analyse des Werkstoffflusses ist die Kontaktanalyse, die Darstellung von Anlagerung und Verschiebung sowie die zweidimensionale Darstellung von Details möglich. Die automatische Generierung von „Animated Gif’s“ ermöglicht die Darstellung und Verteilung von animierten Berechnungsergebnissen ohne Installation von PRINZ-Software z.B. über das Internet.
- **ProPRINZ** ProPRINZ ist die direkte Schnittstelle in Pro/ENGINEER zu PRINZ. Sie ist direkt in das CAD-System integriert und gestattet das Vernetzen der Oberfläche von Pro/E-Volumenmodellen. In diesem Zusammenhang sei verwiesen auf

*Kapitel 5.2 ProPRINZ (Seite 89).*

- **P-TOOL** Für das Positionieren von Werkzeugen und Werkstücken zur Vorbereitung der Vernetzung oder des Exports von STL-Daten aus dem 3D-CAD-System Pro/ENGINEER wurde P-TOOL geschaffen. Es ist direkt in Pro/ENGINEER integriert. (vgl. *Kapitel 5.4 P-TOOL*).
- **PRINZ/STL** STL ist ein allgemeines Datenformat zur Beschreibung von Volumenobjekten im dreidimensionalen Raum. Das für Rapid-Prototyping-Prozesse entwickelte Format wird von fast jedem 3D-CAD-System unterstützt. Auf diese Weise ist es möglich, das Simulationssystem gemeinsam mit diesen CAD-Systemen zur integrierten Konstruktion und Entwicklung von Schmiedeprozessen zu nutzen.
- **PRINZ/CONVERT** PRINZ/CONVERT verknüpft Objekte für PRINZ. Auf diese Weise werden den Werkzeugen Werkstücke zugeordnet. Es wird möglich, komplette Stadienfolgen im Rechner abzubilden, indem das Werkstück mittels PRINZ/CONVERT von Umformstufe zu Umformstufe weitergereicht wird. Eine Konvertierung ist nach jeder Vernetzungsoperation notwendig.

Alle Module werden unter PRINZ/BROWSER zusammengefasst. Eine durchgängige Bedienung für ein Berechnungsprojekt, beginnend mit der Bearbeitung der Geometrie, ist auf diese Weise möglich (**Bild 19**). Durch den modularen Aufbau von PRINZ lassen sich jederzeit neue Elemente hinzufügen. So kann z.B. das Analysemodul PRINZ/DAT ersetzt werden durch eine den jeweiligen Bedürfnissen des Nutzers angepasste Version. Auch der Fuzzy-Controller kann bei Bedarf durch neue Stoffflusssteuermodule substituiert werden.

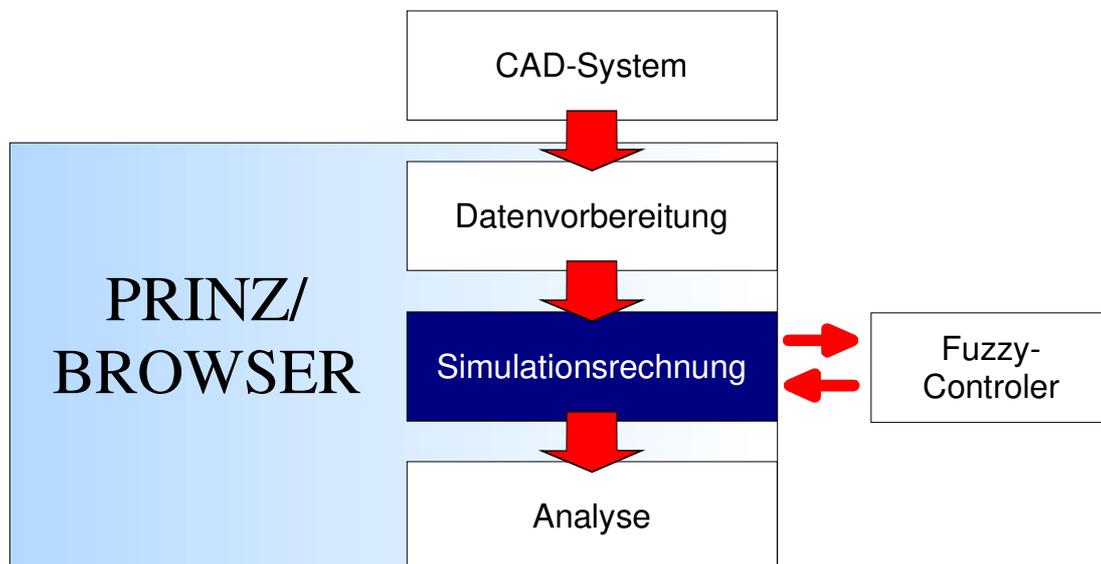


Bild 19: Sequentielle Nutzung der Softwaremodule für die Berechnung und Analyse eines Schmiedeprozesses

Alle Programme kommunizieren über speziell gestaltete Datei-Schnittstellen. Sie sind systemunabhängig und können mit jedem Editor überprüft werden. Die Vorteile überwiegen den Nachteil der Verlangsamung durch die Nutzung des ASCII-Formates, die für den Gesamtdurchlauf nur wenige Promille beträgt.

Nach /61/ werden bei großen Softwareprojekten ca. 50% der Kosten durch Modifikationen und Erweiterungen verursacht. Um zukünftige Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Berechnung von

Stoffflußvorgängen beim Schmieden auf der Basis von PRINZ positiv zu beeinflussen, mussten grundlegende Anforderungen an den modularen Aufbau und die Erweiterbarkeit erfüllt werden.

Als Programmiersprachen wurden ANSI-C und C++ gewählt. Nur für die Auswertung wurden zusätzlich zur graphischen Darstellung der Objekte die Funktionen und Prozeduren der OpenInventor-Bibliothek von Silicon Graphics, die auf Open GL basieren, verwendet. Diese Bibliothek ist auf praktisch allen Rechner-Plattformen erhältlich.

## 4.3 Datenrepräsentation

### 4.3.1 Das Datenformat

Für die Durchführung der Simulation sind verschiedene Dateien notwendig, die nacheinander umgewandelt werden (Bild 20). Für die Durchführung einer schnellen Berechnung ist ein einfaches, aber dennoch genaues Geometriebeschreibungsformat notwendig. Es hat sich im Vorfeld gezeigt, dass ein ortsfestes, sternförmig angeordnetes Modell eine effiziente Ausgangsplattform für eine solche Simulation darstellt /22/. Die ortsfesten Ebenen spannen paarweise Segmente auf, in denen die Gestaltänderung des Werkstückes berechnet wird.

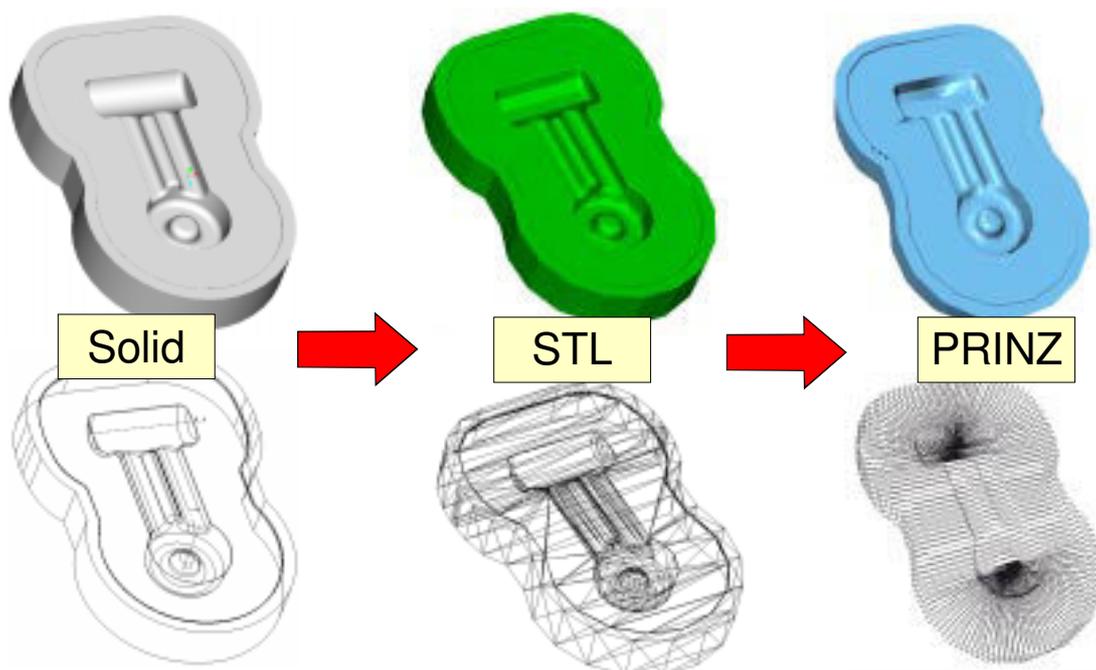


Bild 20: Übergabe der CAD-Daten über die PRINZ/STL-Schnittstelle an das Simulationsprogramm

Ausgangspunkt sind immer die CAD-Modelle im Datenformat des jeweils verwendeten 3D-CAD-Systems, von welchen STL-Daten abgeleitet werden. Neben der universellen Schnittstelle über das STL-Format wurde auch eine direkte Schnittstelle zu Pro/ENGINEER geschaffen, die in Zukunft die Einbindung von PRINZ in das CAD-System ermöglichen wird. Beide Schnittstellen versorgen das Berechnungsmodul mit den notwendigen Geometrie-Eingangsdaten.

Werkzeuge und Werkstück werden im PRINZ-Eingangsformat in Einzeldateien geschrieben. Erst für die Verwendung im Berechnungsmodul werden sie zusammengefasst. Dadurch ist die Austauschbarkeit der

Werkstücke in einer Werkzeugkombination gewährleistet. In den Berechnungsdateien wird zwischen Koordinaten- und Vektorenbereichen unterschieden. Im Vektorenbereich wird die Lage der jeweiligen Schnittebene bestimmt, im Koordinatenbereich werden die Schnittpunkte von Schnittebene und den Oberflächen der Werkzeuge und des Werkstückes abgelegt. Im Koordinatenbereich werden Punkte in Form von kartesischen 2D-Koordinaten beschrieben. Auf jeder Schnittebene befinden sich immer die Konturen von Obergesenk, Untergesenk und Werkstück (Bild 21), links vom Verdrängungszentrum.

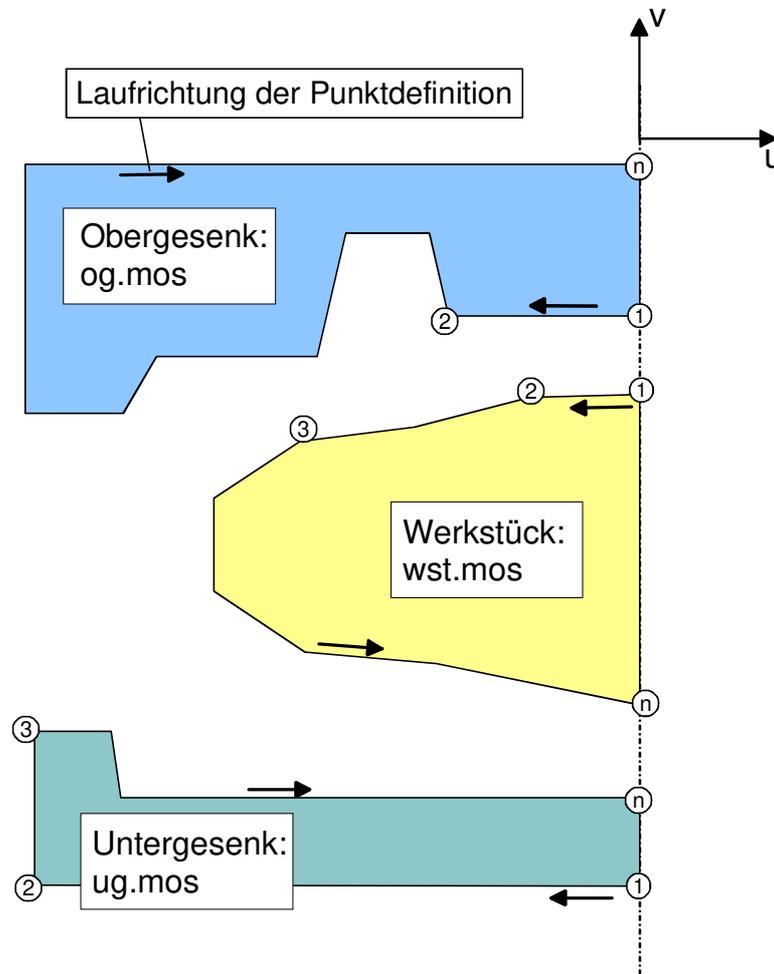


Bild 21: Anordnung von Werkzeugen und Werkstück in den Eingangsdateien og.mos, ug.mos, wst.mos.

Der Vektorenbereich der Dateien ist gegliedert in:

- einen Ortsvektor (OV) und
- zwei Vektoren, die eine Ebene aufspannen (E1 und E2).

Alle Vektoren bestehen aus x, y, z-Anteilen. (OV.x, OV.y, OV.z; E1.x ...). Wie in Bild 22 dargestellt, zeigt der Ortsvektor vom Weltkoordinatensystem auf die jeweilige Schnittebene. In der Schnittebene befindet sich das lokale u,v-Koordinatensystem. Die v-Achse liegt immer parallel zur globalen z-Achse. u-Achse und v-Achse werden durch die Vektoren E1 und E2 definiert. Demnach hat E2, die globale Repräsentation der lokalen v-Achse, immer die Form (0,0,1). Logischerweise kann E1.z nur noch den Wert 0 annehmen. E1.x und E1.y beschreiben die Drehung der Schnittebene relativ zur z-Achse. Durch die Orientierung der u-Achse ergibt sich die „Linkslage“ der 2D-Koordinaten der Schnittkurve (Bild 22).

OV.z=0 gilt für alle Schnittebenen. Die Kröpfung der Werkzeuge wird durch die entsprechende Koordinatenabbildung auf der Ebene im 2D-Bereich erreicht.

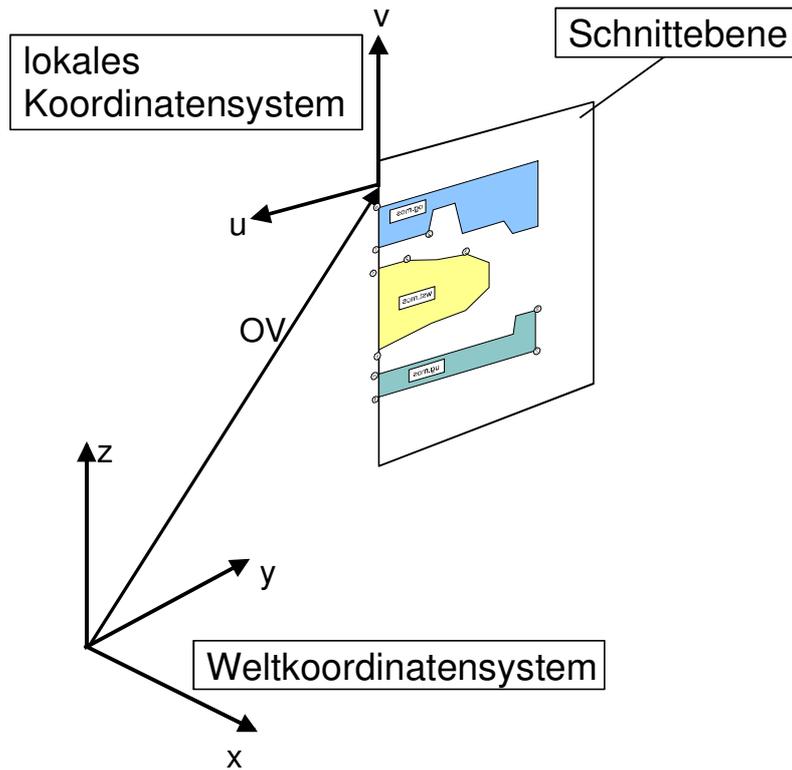


Bild 22: Aufspannung einer Schnittebene

Aus positiver z-Richtung in die x-y-Ebene betrachtet werden die ortsfesten Ebenen im Uhrzeigersinn über das Objekt gelegt. In dieser Reihenfolge werden die Dateien og.mos, ug.mos und wst.mos geschrieben. Der Beginn ist beliebig. Die Reihenfolge muss aber in allen 3 Dateien übereinstimmen (Bild 23).

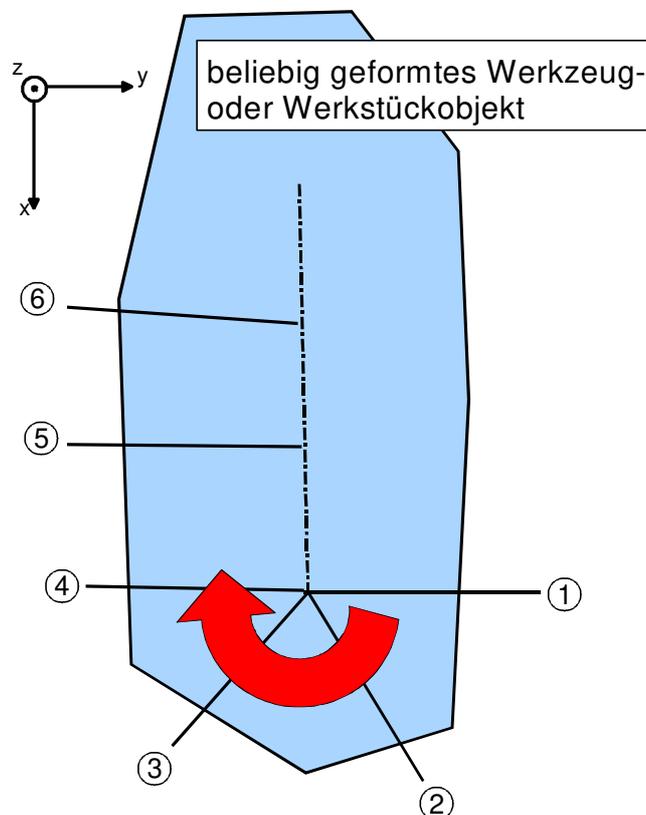


Bild 23: Anordnung der ortsfesten Schnittebenen im Raum.

Die Vorgehensweise beim Erzeugen der Schnittebenen und der Beschreibung der Oberflächen von Werkzeugen und Werkstück sind im *Kapitel 5 Aufbereitung der Geometriedaten* näher beschrieben.

### 4.3.2 Die interne Datenrepräsentation

Intern werden die Daten in doppelt verketteten Listen abgelegt. Die hierarchische Struktur zur Abbildung der beteiligten Objekte der Werkzeuge und des Werkstückes kann auf diese Weise am Besten dynamisch erfasst werden, so dass im Bedarfsfall der gesamte nutzbare Speicherraum des Computers zur Verfügung stehen kann.

Die äußere Hülle bildet auch hier wieder die Liste der Ebenen-Elemente. In jedes Ebenen-Element sind die Listen der Knotenpunkte mit den dazugehörigen Informationen eingebettet (Bild 24).

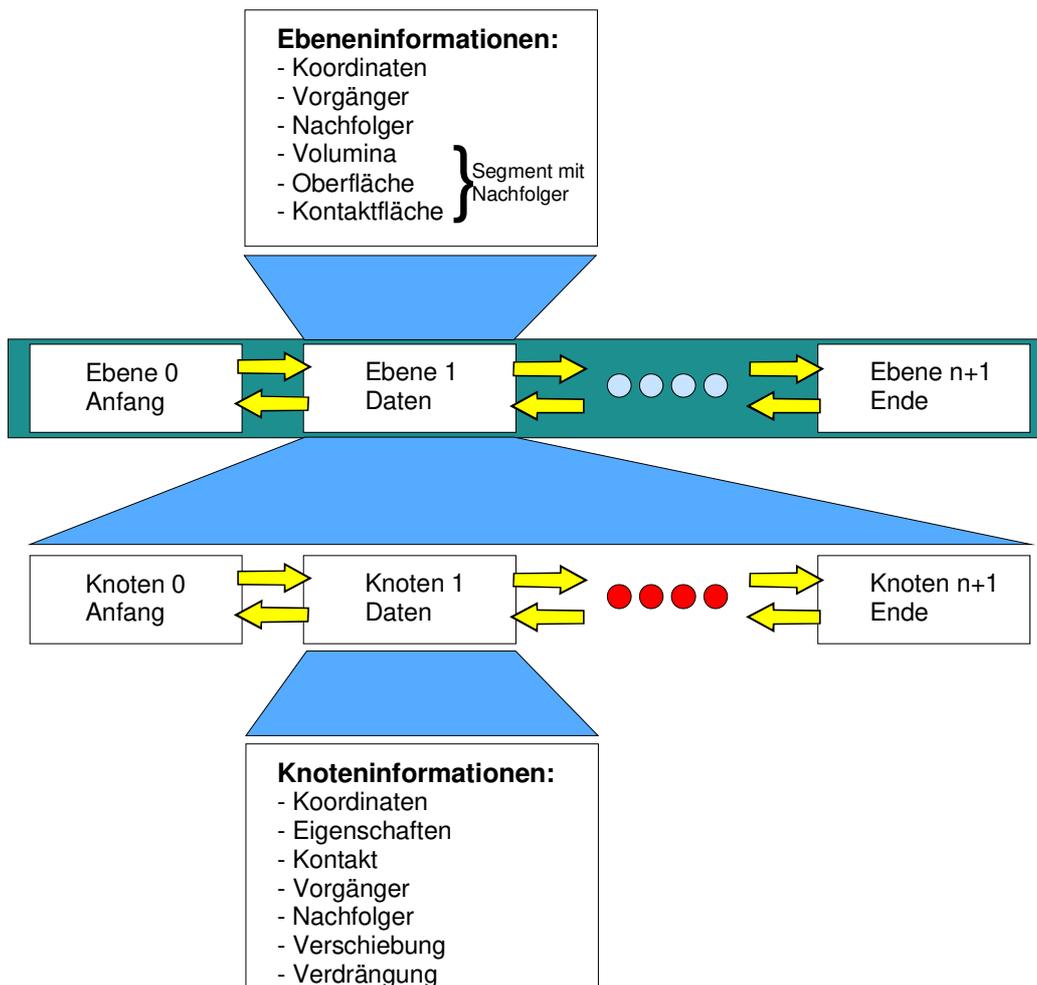


Bild 24: Interne Datenstruktur von PRINZ

Diese Form des Datenmanagements erlaubt einmal das Erzeugen von theoretisch unendlich großen Berechnungsdateien, zum anderen ist die einfache Erweiterbarkeit gegeben, wenn z.B. das Temperaturverhalten des Umformgutes mitberechnet werden soll und so in Zukunft den Knotenpunkten z.B. Wärmeübergangskoeffizienten zuzuschreiben sind.

## 4.4 Berechnung der Umformung

### 4.4.1 Das Werkstoffmodell

Das in Prinz implementierte universelle Stoffgesetz ist durch folgende Punkte charakterisiert:

- In der praktischen Anwendung können bei großen plastischen Verzerrungen häufig die elastischen Anteile vernachlässigt werden. Dies führt zur Anwendung eines starr-plastischen Werkstoffmodelles, in dem formal der Grenzübergang des Elastizitätsmodules auf  $E \rightarrow \infty$  durchgeführt wird. Dadurch wird  $\epsilon = 0$  für  $|\sigma| \leq k_f$ . Entlastungen erfolgen demnach ohne Verzerrungsänderungen.
- Fließbedingung:  $|\sigma| = k_f$ .
- Inkompressibilität, Querkontraktionszahl:  $\nu = 0.5$ .
- Die idealisierte Fließkurve hat einen linearen, horizontalen Verlauf, damit erfährt der Werkstoff keine Verfestigung und erhält keine Belastungsgeschichte während eines Simulationslaufes. Das schließt nicht aus, dass zwischen durchzuführenden Berechnungen die Fließspannung verändert werden muss, z.B. bei der Berechnung mehrerer Stufen eines Umformprozesses oder des mehrmaligen Schlagens mit einem Hammer.

Das Stoffgesetz wurde realisiert durch die Kombination von kinematischen, analytischen und empirischen Algorithmen, die in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

### 4.4.2 Das kinematische Fließgesetz

Im verwendeten Algorithmus erfolgt, basierend auf der Volumenkonstanz sowie den inneren geometrischen Fließwiderständen, eine Verteilung der beim Zusammenfahren der Gesenkhälften verdrängten Werkstoffmenge an mögliche Anlagerungsorte im Gesenk. Aussagen über den Spannungszustand im Werkstück sind mit dieser Methode nicht möglich, es kann aber mit ausreichender Genauigkeit die sich einstellende äußere Form des verformten Werkstücks zu jedem Zeitpunkt des Umformprozesses ermittelt werden. Der Betrachter erhält so ein kontinuierliches Bild von der im Realprozess verborgen ablaufenden Formgebung des Materials.

Zur Nachbildung des Umformvorganges wird bei diesem Verfahren der gleichzeitige Ablauf des Werkstoffverdrängens, des Werkstoffbewegens und des Werkstoffanlagerns im Realprozess durch einen diskreten Simulationsablauf ersetzt. Der Umformprozess wird dabei durch eine Vielzahl einzelner Schritte beschrieben. Jeder Schritt entspricht einer Verschiebung des Oberwerkzeugs in Richtung Unterwerkzeug. Die Größe der Schritte nimmt mit steigendem Füllgrad der Gravur ab, um das mit fortschreitender Werkzeugbewegung komplizierter werdende Fließgeschehen möglichst genau zu erfassen.

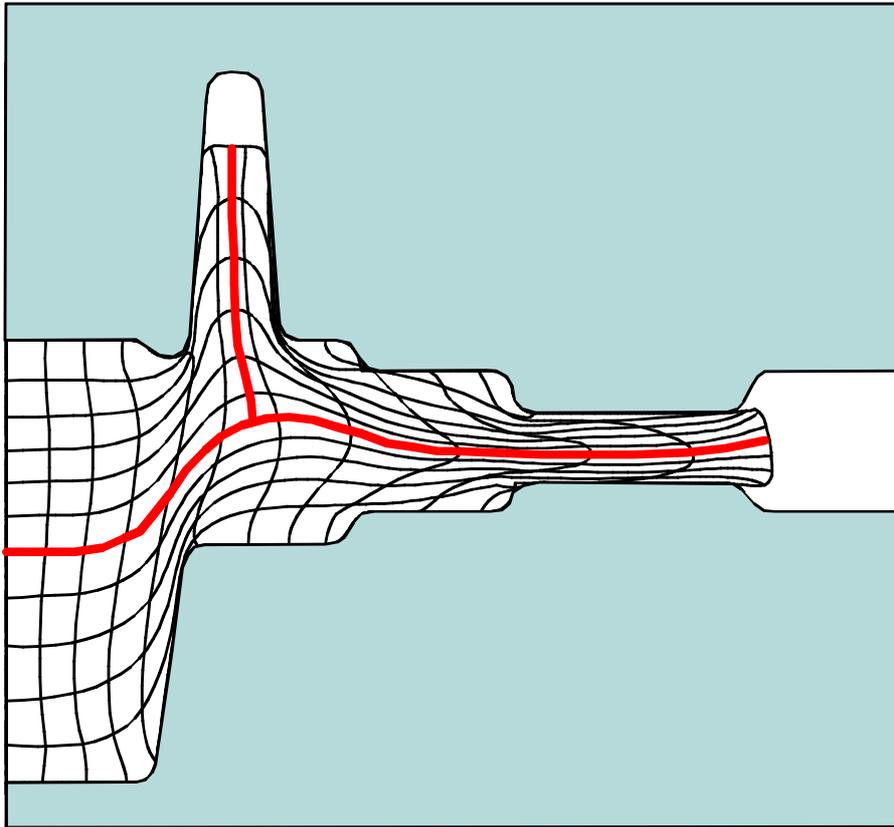


Bild 25: In der Lagrange-Darstellung eines 2D-FEM-Berechnungsergebnisses erkennbare Verdrängungsbahnen

Die Programmentwicklung fand unter der Annahme statt, dass die Bahnen, entlang derer eine Werkstoffverdrängung stattfindet, parallel zu den Längsachsen der Haupt- und Nebenformelemente verlaufen, wie es auch in der FEM-Simulation erkennbar ist (Bild 25). Die Berechnung solcher angenäherter Verdrängungsbahnen erfolgte bisher mittels einer Kugel, die ihren Radius, abhängig von ihrer Lage in der Gravur, so verändert, dass sie jeweils die maximal mögliche Größe einnimmt, ohne sich zu verformen [21]. Lässt man die Kugel innerhalb eines Werkzeugs sämtliche Positionen anfahren, so beschreibt ihr Mittelpunkt Bahnen, die als Verdrängungsbahnen angenommen werden. Die Berechnung dieser Bahnen wird dabei nur für die Bereiche durchgeführt, in denen Werkstoff vorhanden ist. In Bild 26 ist u.a. beispielhaft eine Kette von Verdrängungsbahnen gezeichnet.

Das beschriebene Rechenmodell zur Simulation des Werkstoffflusses beim Gesenkschmieden beruht im wesentlichen auf der Annahme, dass im Werkstück hydrostatischer Spannungszustand vorliegt. Lokale Einflüsse, wie sie z.B. bei erhöhter Werkstückauskühlung in dünnwandigen Rippen auftreten, die durch lokal erhöhte Fließspannungen zu modellieren sind, oder variierende Reibzustände in der Wirkfuge zwischen Werkstück und Werkzeug, die je nach verwendetem Reibgesetz durch Reibzahlen oder -faktoren zu beschreiben sind, werden in diesem geometriebasierten Modell nicht berücksichtigt.

Zur Berechnung der bereits erwähnten Verdrängungsbahnen, im weiteren *mediale Linien* bzw. *mediale Achsen* genannt, gibt es verschiedene Ansätze. Der bisherige Ansatz, das Kugelmodell, ist für die Anwendung im Dreidimensionalen auf Grund der hohen Anzahl von Rechenoperationen für das insbesondere auf Rechengeschwindigkeit optimierte Modell nicht geeignet.

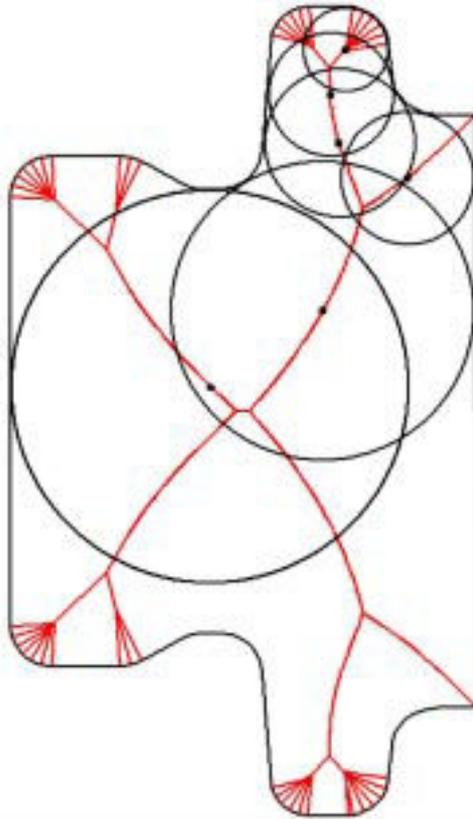


Bild 26: Mediale Linien einer Werkzeugkontur und Beispiele von durch die Linien berechenbaren Kugeln mit Mittelpunkten

Zur Lösung dieses Problems gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, welche sich in numerische und iterative Verfahren einteilen lassen. In dieser Arbeit wird näher auf die verwendete Methode zur Berechnung der medialen Linie mittels Voronoidiagrammen eingegangen. Die mediale Achse bildet dabei eine Untermenge des inneren Voronoidiagrammes eines Polygons. Die im Voronoidiagramm enthaltenen Pfade zu konkaven Ecken des Polygons entfallen bei Beschreibung der medialen Achse.

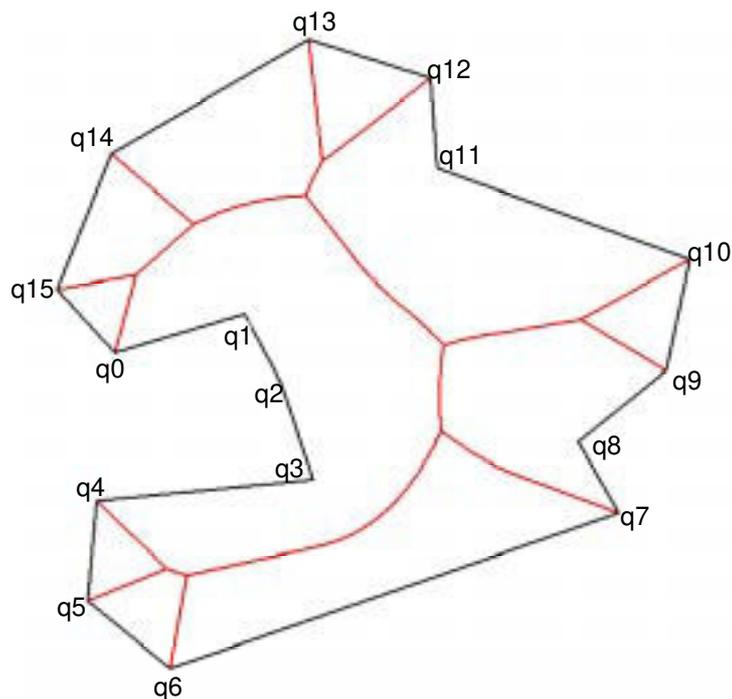


Bild 27: Beispiel eines inneren Voronoidiagrammes  $VOD(G)$  eines einfachen Polygons  $G$ .

Formal ist die mediale Achse wie folgt definiert: *Die mediale Achse  $M(G)$  eines gegebenen Objektes, hier das einfache Polygon  $G$ , ist die Menge von Punkten  $\{q\}$  innerhalb von  $G$ , so dass mindestens zwei Punkte des Objektrandes eine Äquidistante und den geringsten Abstand zu  $\{q\}$  haben /82/.*

Auf Grund ihrer Form wird die mediale Achse auch Skelett oder symmetrische Achse einer Figur genannt. Im Falle der Anwendung für die Berechnung des Werkstoffflusses ist diese Figur die Kontur der Werkzeuge. Verbunden mit der medialen Achse ist die Radiusfunktion  $R$ , welche für jeden Punkt auf der Achse den Abstand zum Objektrand definiert. Mit der medialen Achse und der Radiusfunktion kann die Figur rekonstruiert werden, indem alle Kreise, zentriert auf den Punkten, welche die Achse beschreiben, mit einem Radius der Radiusfunktion vereinigt werden.

Das einfache Polygon  $G$  (die geschlossene Kontur der Schmiedewerkzeuge) ist eine Kette mit  $N=m_E+m_R$  Elementen  $e_1, e_2, \dots, e_N$ , wobei  $m_R$  die Anzahl der Ränder und  $m_E$  die Anzahl der konkaven Ecken ist. Der verwendete Algorithmus basiert auf einer Divide-and-Conquer (Teile und Herrsche) Technik /82/. Das heißt, dass das Polygon  $G$  in zwei Hälften,  $G_1=(e_1, e_2, \dots, e_{\lfloor N/2 \rfloor})$  und  $G_2=(e_{\lfloor N/2 \rfloor + 1}, \dots, e_N)$  geteilt wird und dann rekursiv die Voronoidiagramme  $VOD(G_1)$  und  $VOD(G_2)$  berechnet werden. Danach werden  $VOD(G_1)$  und  $VOD(G_2)$  verschmolzen, um am Ende das Diagramm  $VOD(G)$  zu erhalten. Die Anwendung dieses Algorithmus benötigt nur die Rechenzeit von  $N \log N$ .

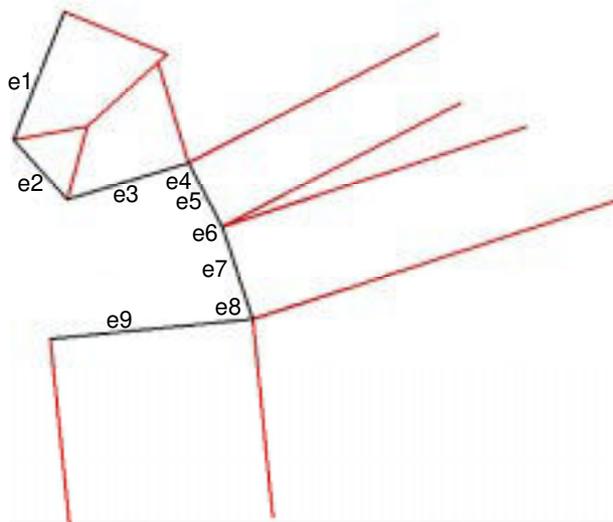


Bild 28: Voronoidiagramm  $VOD(G_1)$  der linken Seite des Beispiels aus Bild 27

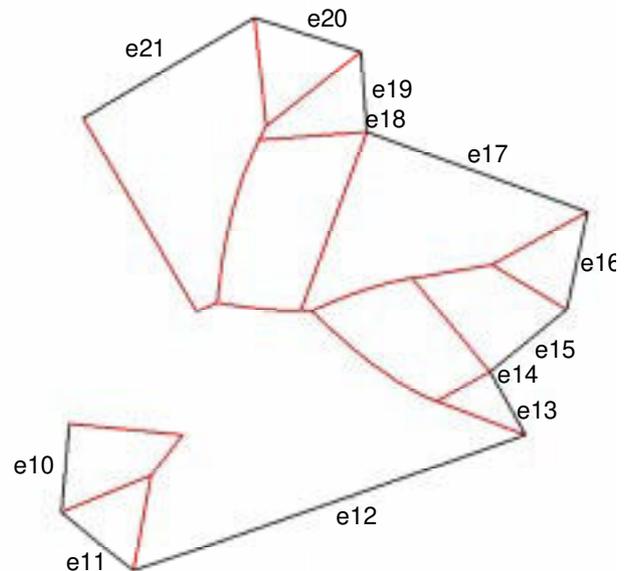


Bild 29: Voronoidiagramm  $VOD(G_2)$  der rechten Seite des Beispiels aus Bild 27

Da nur Interesse am Inneren des Diagramms von  $G$  besteht, beschränkt sich auch die Berechnung auf den inneren Teil von  $G$ . Um mit Sicherheit im inneren Teil von  $G$  zu liegen, wird vereinbart, dass  $G$  in einer gegen den Uhrzeigersinn gegebenen Reihenfolge vorgegeben ist, so dass das Innere von  $G$  immer auf der linken Seite liegt. Wird von einem Voronoidiagramm von Elementen gesprochen, dann ist nur der Teil, welcher links von der Kette der Elemente liegt, gemeint. Bild 28 zeigt das Voronoidiagramm von  $G_1=(e_1, e_2, \dots, e_{10})$  und Bild 29 das Diagramm von  $G_2=(e_{11}, e_{12}, \dots, e_{21})$ .  $G=(e_1, e_2, \dots, e_{21})$  bildet das Polygon aus Bild 27.

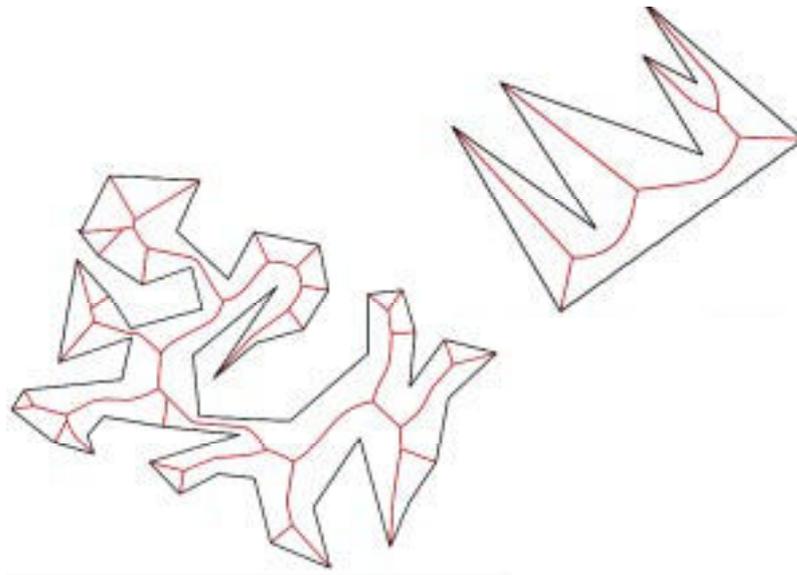


Bild 30: Berechnungsbeispiele für mediale Linien

In Bild 30 sind einige Beispiele für berechnete mediale Achsen von beliebig geformten Polygonzügen dargestellt. Der für den allgemeinen Fall gültige Algorithmus kann selbstverständlich dann für den speziellen Fall der Berechnung von Verdrängungsbahnen herangezogen werden.

## 4.5 Der nichtsymmetrische Werkstofffluss

Bei der Berechnung des Stoffflusses bereiteten bisher die komplex geformten Schmiedeteile große Schwierigkeiten, da bei ihnen auch der *nichtsymmetrische Werkstofffluss* eine wesentliche Rolle spielt. Im Verlaufe dieser Arbeit wird diejenige Fließrichtung des Werkstoffes als nichtsymmetrischer Werkstofffluss bzw. Querfluss bezeichnet, die nicht entlang der durch die Schnittkurven des PRINZ-internen Berechnungsmodelles vorgegebenen Orientierung folgen (vgl. auch Bild 33).

*Zur Vereinfachung der sprachlichen Beschreibung der Zerlegung von richtungsabhängigen Anteilen des Materialflusses wird von jetzt ab unterschieden zwischen Radialfluß und Querfluß des Werkstoffes. Radialfluß kennzeichnet den Werkstofffluss entlang der vom internen Berechnungsmodell vorgegebenen Querschnitte, der Begriff Querfluß wird für den Werkstofffluss gebraucht, der sich aus den Querschnittsebenen hinaus oder in die Querschnittsebenen hinein vollzieht.*

Augenblicks-Volumenströme, die aufgrund momentaner Umformbedingungen die Verschiebung von vielen infinitesimalen Volumenelementen darstellen, können im Koordinatenraum durch 3 Richtungsvektoren und die zugehörigen Verschiebungsbeträge repräsentiert werden. Der Querfluss ist demnach die dritte Dimension des Werkstoffflusses. In Bild 31 und Bild 32 ist das Problem dargestellt. Bisher wurde ein Werkstofffluss im Inneren des Schmiedeteiles nicht zugelassen. In /22/ wird deshalb darauf hingewiesen, dass die Berechnung des Werkstoffflusses bis zu dem damaligen Stand der Entwicklung nur auf scheibenförmige und gedrungene Schmiedestücke anzuwenden ist. Das entwickelte Modell deckte demnach nur den in Bild 31 dargestellten Spezialfall für achsensymmetrische Problemstellungen ab, da hier nur zwei von drei Fließrichtungen berücksichtigt werden mussten. Der sich einstellende Werkstofffluss bei symmetrischem Druck auf das Werkstück ist allein in radiale Richtung orientiert. Es war im Rahmen des für 2D-Fälle entwickelten *Prinzips des kleinsten Zwanges* zulässig, den Spezialfall rotationssymmetrischer Verhältnisse zu erweitern auf achsensymmetrische Problemstellungen

mit Nebenformelementen. Die Aufgabenstellung, das in /22/ entwickelte Modell auf Langteile auszudehnen, macht nun eine Weiterentwicklung des Ansatzes erforderlich. Dabei sollen die Vorteile, hohe Berechnungsgeschwindigkeiten und sichere Algorithmen, beibehalten werden. Der weiter entwickelte Ansatz muss die in Bild 32 dargestellten Verhältnisse bei unsymmetrischem Druck einschließen, bei dem sich neben dem bereits beschriebenen Radialfluß Querfluß einstellen kann.

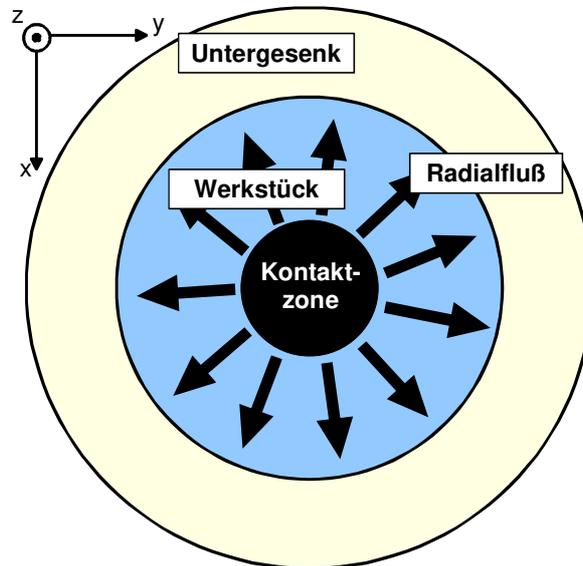


Bild 31: Spezialfall: Blick aus Richtung des Obergesenkes auf ein achsensymmetrisches Werkstück, welches mit einem symmetrischen Druck beaufschlagt wird.

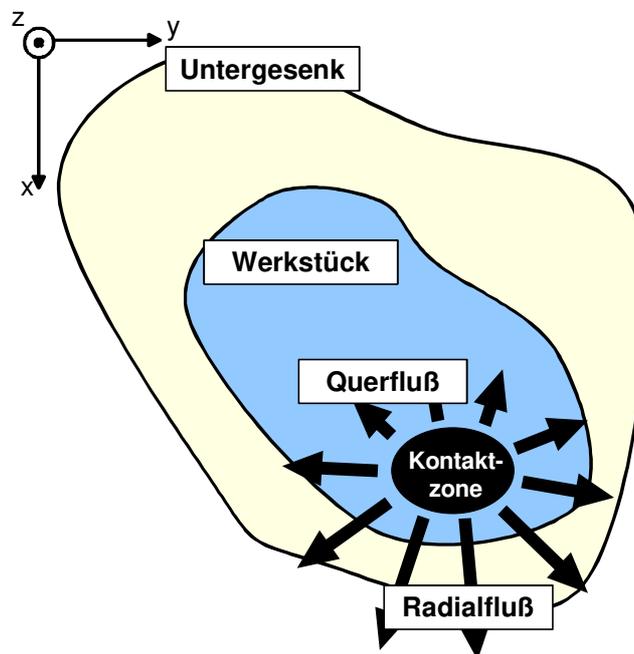


Bild 32: Allgemeiner Fall: Blick aus Richtung des Obergesenkes auf das allgemein geformte Werkstück.

Da sich für den Querfluss keine formelmäßigen Zusammenhänge herleiten lassen, bietet hier die Anwendung der Fuzzy-Logik eine interessante Alternative. Dazu wird das Schmiedeteil über die schon vorhandenen Schnittkurven in Segmente aufgeteilt und die sich aus unsymmetrischer Druck ergebenden Werkstoffvolumenströme durch einen Fuzzy-Controller gesteuert.

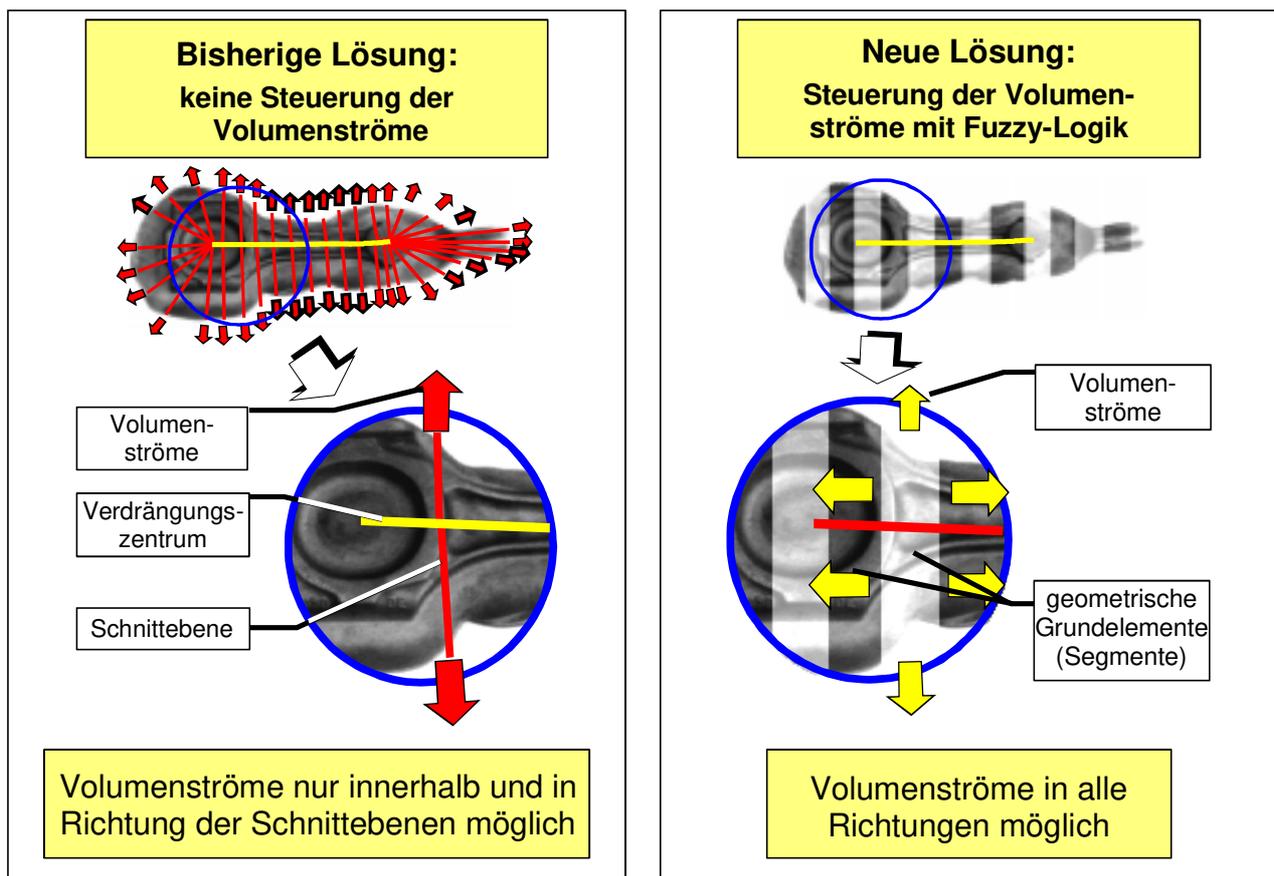


Bild 33: Steuerung der Volumenströme im Simulationssystem

Es wurde aus diesen Gründen notwendig, einen neuen Weg zur Simulation des Werkstoffflusses zu beschreiten. Das bei konsequenter Anwendung des MATHIEU'schen „Kugelmodells“ auf komplizierte 3D-Teile auftretende kombinatorische Explosionsproblem wird umgangen. Unter diesen Bedingungen entstanden die folgende Überlegungen:

- Die Berechnung des Werkstoffflusses nach dem „Prinzip des kleinsten Zwanges“ erfolgt in Segmenten der Werkstückgeometrie (vgl. Bild 34).
- Die Segmente müssen sich sowohl unterhalb als auch oberhalb der Teilung der Werkzeuge befinden.
- Es müssen sich im Verlaufe der Berechnung Kontaktverhältnisse im Obergesenk und Untergesenk herausbilden können.
- Die Geometrie ist so beschaffen, dass ein Fließen des Werkstoffes in den Grat erfolgen kann. Im geschlossenen Gesenk kann Stirngrat entstehen.
- Es handelt sich nicht um einen Freiformvorgang.

Die Verknüpfung der Segmente und damit die Berechnung der Volumenströme erfolgt mit der Fuzzy-Logik, welche in der Lage ist, verschiedenartigste Eingangsparameter zu verknüpfen und daraus eine oder mehrere gewünschte Ausgangsgrößen zu berechnen.

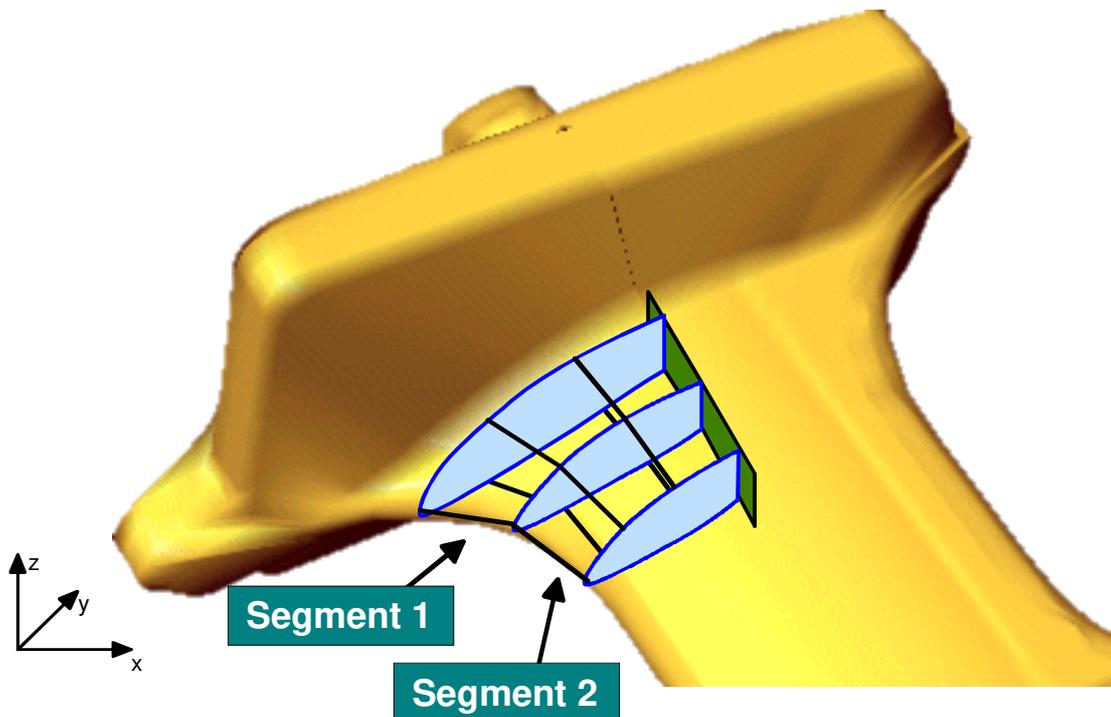


Bild 34: Nutzung der bei der Vernetzung erhaltenen Schnittkurvenbeschreibung des Werkstückes zur Aufteilung des Werkstückes in einzelne volumenbehaftete Segmente am Beispiel einer Turbinenschaufel

Die folgenden Gründe sprechen für die Anwendung der Fuzzy-Logik zur Berechnung des Querflusses:

- Komplexe Prozesse lassen sich durch herkömmliche mathematische Modelle nur mit großem Aufwand befriedigend beschreiben. Dagegen entsprechen Fuzzy-Regelungen der intuitiven Vorgehensweise des Prozessbedieners. Erfahrungen, Kenntnisse sowie das Gefühl für die Abläufe können berücksichtigt werden.
- Die beim Werkstofffluss ablaufenden Vorgänge sind nichtlinear dynamisch. Die aus der FEM bekannten, bei solchen Problemen auftretenden Gleichungssysteme lassen sich nicht in der für diese Arbeit vorgegebenen Berechnungszeit lösen.
- Es ist kein mathematisches Systemmodell erforderlich.
- Der Berechnungsaufwand für das Auswerten der Regeln ist vergleichsweise gering.
- Der Aufwand bei der Verwendung von Fuzzy-Logik im Vergleich zu konventioneller Regelungstechnik ist geringer. Der Aufwand bei konventioneller Regelungstechnik steigt mit der Komplexität des Systems exponentiell an. Dagegen wird der Aufwand für die Fuzzy-Logik mit steigender Komplexität geringer (logarithmisch).
- Regelungen unter Nutzung der Fuzzy-Logik können „Online“ optimiert werden. Das Hinzufügen von unscharfen Mengen erfolgt im Dialog über Fuzzy-Tools. Erfahrungen werden dabei einbezogen. Prozesse werden interaktiv eingestellt.
- Die Fuzzy-Logik verfügt über eine hohe Flexibilität.
- Die Verwendung von linguistischen Variablen (Prozesserscheinungen) ersetzt Prozesskenngrößen, deren Erfassung wesentlich aufwendiger ist.
- Fuzzy-Regelungen sind sehr robust.

## 4.5.1 Entwurf der Fuzzy-Logik für PRINZ

Die Aufgabe des Fuzzy-Controllers ist es, den Querfluss zu steuern. Dazu wird das Schmiedeteil auf der Basis der vorhandenen Schnittkurven in Segmente aufgeteilt. Diese sind durch jeweils zwei benachbarte Schnittkurven definiert, die schon bei der Modellbildung angelegt wurden. Nach jedem Umformschritt werden von PRINZ Daten zur Verfügung gestellt, aus denen die Eingangsgrößen für den Controller gewonnen werden. Ausgangsgröße soll das anzulagernde Volumen in jedem Segment sein.

Mit Hilfe einer Fuzzy-Logik werden Potentialunterschiede zur Aufnahme bzw. zur Abgabe von Werkstoff aus Segmenten identifiziert. Ausdruck dieser Gefälle sind nach Anwendung des Fuzzy-Controllers unterschiedliche Zuweisungen von Werkstoffmengen, die in den einzelnen Segmenten anzulagern sind. Die Unterschiede im Potential zwischen Segmenten resultierten aus deutlich unterschiedlichen Prozessbedingungen in den einzelnen Segmenten des Werkstückes.

Der Fuzzy-Controller wurde, entsprechend dem modularen Konzept des Gesamtsystems PRINZ, als eigenständige Applikation entworfen, die über eine Dateischnittstelle vom Kernprogramm aus mit Informationen versorgt wird. Der Fuzzy-Controller läuft vollständig im Hintergrund. Die Rückgabe der Werte über das anzulagernde Volumen erfolgt ebenso über eine Dateischnittstelle.

Wie in früheren PRINZ-Versionen wird jeder Umformschritt in die Teilschritte Verdrängung, Bewegung und Anlagerung unterteilt. In der Phase der Verdrängung bewegt sich das Oberwerkzeug auf das Unterwerkzeug zu, dabei wird das verdrängte Volumen aller Teilsegmente des Schmiedeteils berechnet (Bild 35).

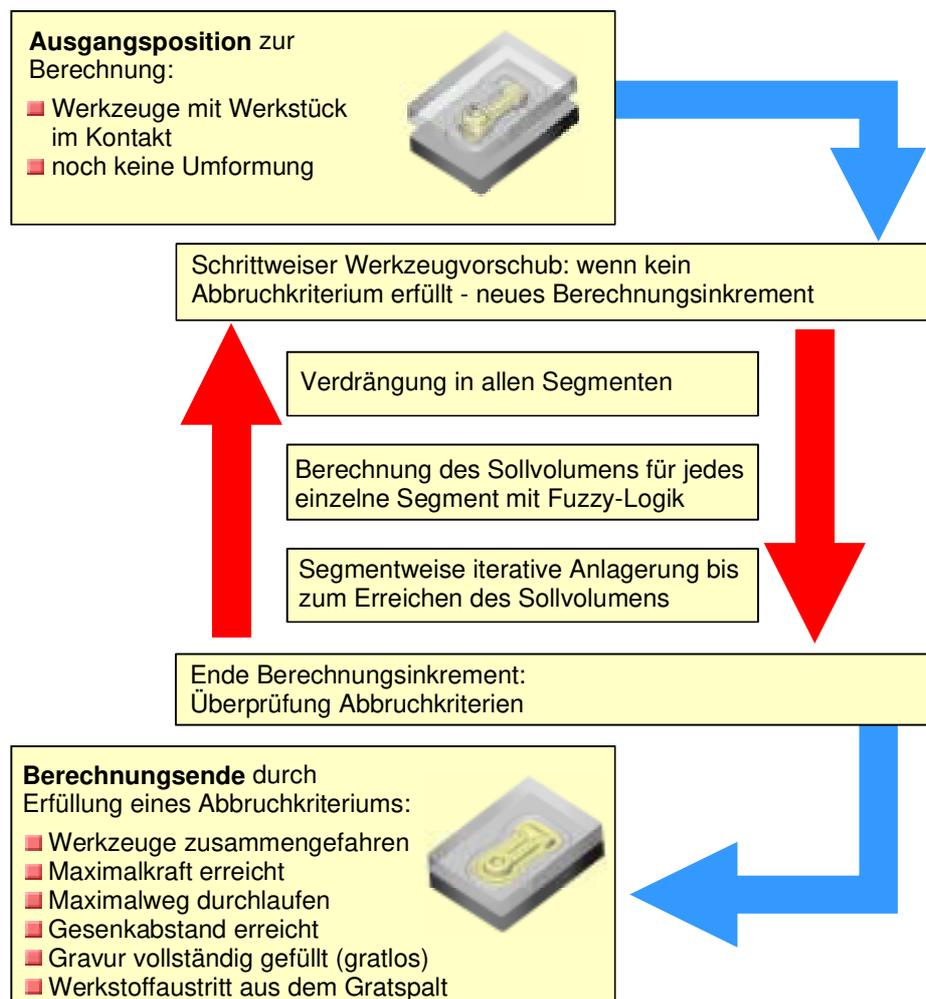


Bild 35: Ablauf der Berechnung mit PRINZ unter Nutzung des Fuzzy-Controllers

Die im Realprozess kontinuierlich ablaufende Bewegung der Werkzeuge wird durch das schrittweise Durchlaufen von Weginkrementen nachgebildet. Nach jedem Schritt wird ein bestimmtes Werkstoffvolumen verdrängt, welches anschließend nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten angelagert werden muss. Über den Fuzzy-Controller wurde eine Möglichkeit gefunden, die Gesetzmäßigkeiten der dreidimensionalen Anlagerung von Werkstoff in den Segmenten zu erfassen. Mit Hilfe des Fuzzy-Controllers werden Sollvolumina für jedes einzelne Segment bestimmt, die in der nachfolgenden Anlagerungsphase iterativ erreicht werden müssen, um Volumenkonstanz zu halten. Nach Abschluss der Anlagerungsphase werden die ins System implementierten Abbruchkriterien überprüft (siehe auch Bild 35). Wenn kein Abbruchkriterium greift, kann die Berechnung mit einer erneuten Werkzeugbewegung um ein Weginkrement fortgesetzt werden.

Die Berechnung des auf die Anlagerungsstellen zu verteilenden Werkstoffes erfolgt mit Hilfe des Fuzzy-Steuerungsalgorithmus. Dazu wird für jedes Segment (vgl. Bild 34 und Bild 36) eine Bewertungszahl berechnet, die auch die Ausgangsgröße des Controllers darstellt. In Abhängigkeit dieser Bewertungszahlen und der Volumina wird festgelegt, wie viel Werkstoff den einzelnen Teilsegmenten zugeordnet wird.

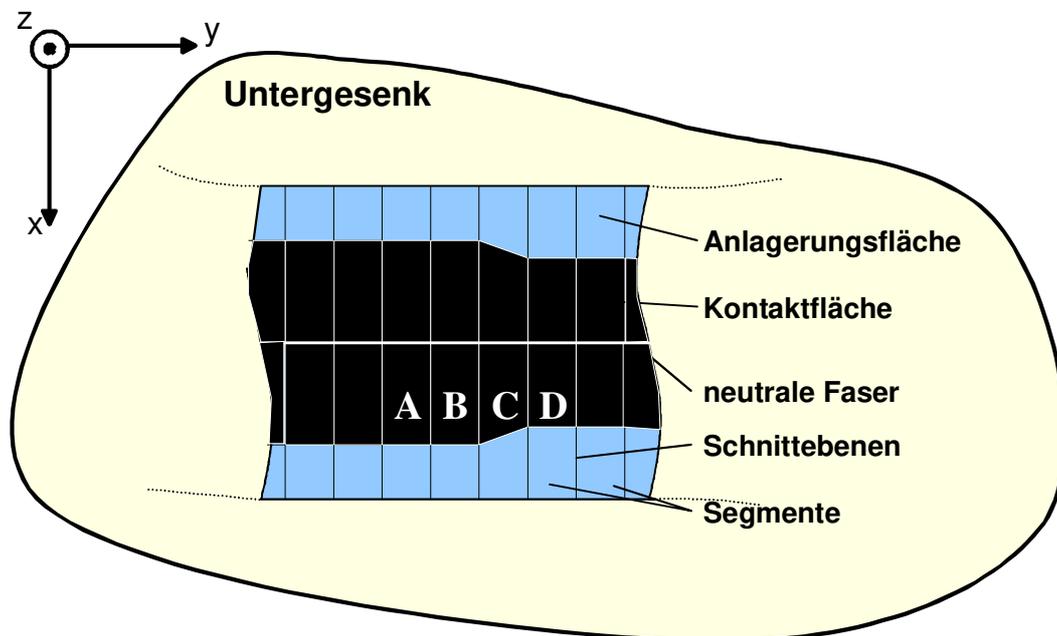


Bild 36: Sicht auf einen Ausschnitt des Werkstückes und auf das Untergesenk.

Die lokalen Verhältnisse konnten mit PRINZ bisher nur unzureichend simuliert werden, da die äußeren Punkte einer Schnittkurve in Abhängigkeit der Durchlaßwiderstände des gesamten Schmiedeteils verschoben wurden. Dabei wurden alle Durchlaßwiderstände gleich stark gewichtet, also unabhängig davon, an welchem Ort im Schmiedeteil sie wirkten.

Mögliche lokale Gegebenheiten sind in Bild 36 dargestellt. Das Werkstück ist in Segmente diskretisiert. In den Segmenten A, B, C und D herrschen unterschiedliche Bedingungen des Kontaktes. Die Segmentvolumen sind in A, B, C und D gleich. Die Verhältnisse in den Nachbarsegmenten bestimmen grundsätzlich ganz wesentlich das Fließverhalten. Daher werden die lokalen Gegebenheiten stärker berücksichtigt und für jede Eingangsgröße zwei scharfe Eingangswerte berechnet. Der lokale Wert setzt den entsprechenden Segmentwert ins Verhältnis zu den Werten der Nachbarsegmente, der globale setzt ihn ins Verhältnis zum arithmetischen Mittel aller Teilsegmente des Schmiedeteils.

Gleichzeitig mit der Entwicklung der für die Durchführung von Bewertungen mit Hilfe der Fuzzy-Logik notwendigen Programme hat der Aufbau und Test der für die Steuerung des Werkstoffflusses

verantwortlichen Logik zu erfolgen. Dafür wurde das Programm *Matlab 5.1* genutzt. Unter anderem steht eine Fuzzy-Toolbox zur Verfügung, mit der sich komfortabel Fuzzy-Controller für spezielle Problemstellungen entwerfen lassen.

Für die Steuerung des Werkstoffflusses wird ein Mamdani-Fuzzy-Inference-System (FIS) genutzt [67]. Dieses ist charakterisiert durch die Definition der Ausgangsgröße in Form eines Fuzzy-Sets. Hervorstechendes Merkmal ist die notwendige Defuzzifizierung am Ende eines Durchlaufes.

Für den Controller müssen geeignete Eingangsgrößen gefunden werden. Hierfür kommen sowohl physikalische als auch geometrische Größen in Frage. Mögliche geometrische Eingangsgrößen wären z.B.:

- Gesamtvolumen des Schmiedeteils,
- Volumen der Teilelemente,
- Verdrängtes Volumen in jedem Teilelement,
- Umformweg,
- Gesenkabstand,
- von PRINZ berechnete Kugeldurchmesser,
- Länge der Verdrängungsbahnen,
- Größe und Anzahl der Kontaktflächen des Werkstücks mit den Werkzeugen,
- Größe und Anzahl der Anlagerungsflächen in den Segmenten,

Als physikalische Eingangsgrößen kommen in Betracht:

- Fließkurve des Werkstückwerkstoffes unter gegebenen und berechneten Bedingungen,
- Art und Kinematik der Umformmaschine (weg-, kraft-, arbeitsgebunden) mit allen entsprechenden Einflussgrößen auf das Schmiedeergebnis,
- Umformgrad,
- Reibzahl,
- Temperatur von Werkstück und Werkzeug.

Da eine zu große Anzahl von Variablen die Anzahl der Regeln exponentiell ansteigen lassen würde, wurde die Anzahl der Eingangsgrößen für den Fuzzy-Controller beschränkt. Die Regelbasen sind überschaubar und das Kalibrieren, d.h. das durch Erfahrung und Intuition optimale Einstellen der Steuersoftware, ist ohne Schwierigkeiten möglich.

## 4.5.2 Das Steuerprogramm

Den Kern des Steuerprogramms *PFUZZY* bildet das in *Kapitel 4.5.3 Das Fuzzy-Inference-System (FIS) für PRINZ* konzipierte Fuzzy-Inference-System. Zusätzlich sind Funktionen für das Auf- bzw. Nachbereiten der Ein- und Ausgangsdaten implementiert. Mit ihrer Hilfe werden die Eingangsdaten des Controllers und die endgültige Form der Ausgangsgröße gewonnen.

Der Berechnungsablauf innerhalb des Kernprogramms PRINZ/WSF3D gliedert sich in zwei Hauptteile:

1. Nach jedem Verdrängungsschritt wird berechnet, wie viel Werkstoff verdrängt worden ist.
2. Eine äquivalente Menge Werkstoff wird auf die Anlagerungsstellen verteilt.

Wie in Bild 37 dargestellt, werden während eines jeden Umformschrittes und nach der Berechnung des verdrängten Volumens die vom Controller benötigten Daten in die Datei `fuzzy.dat` geschrieben. Danach wird das Unterprogramm `pfuzzy.exe` aufgerufen, das diese Daten einliest, um daraus die benötigten Eingangsgrößen des Controllers zu gewinnen. Mit den implementierten Regelalgorithmen wird das anzulagernde Volumen in jedem Teilelement des Werkstücks berechnet und die Ergebnisse in die Datei `fuzzyout.dat` geschrieben. Diese werden wiederum von PRINZ/WSF3D eingelesen und das Sollvolumen je Segment berechnet. Schließlich wird der nächste Deformationsschritt eingeleitet und das oben beschriebene Vorgehen solange wiederholt, bis sich Ober- und Untergesenk berühren oder der Umformprozess abgebrochen wird.

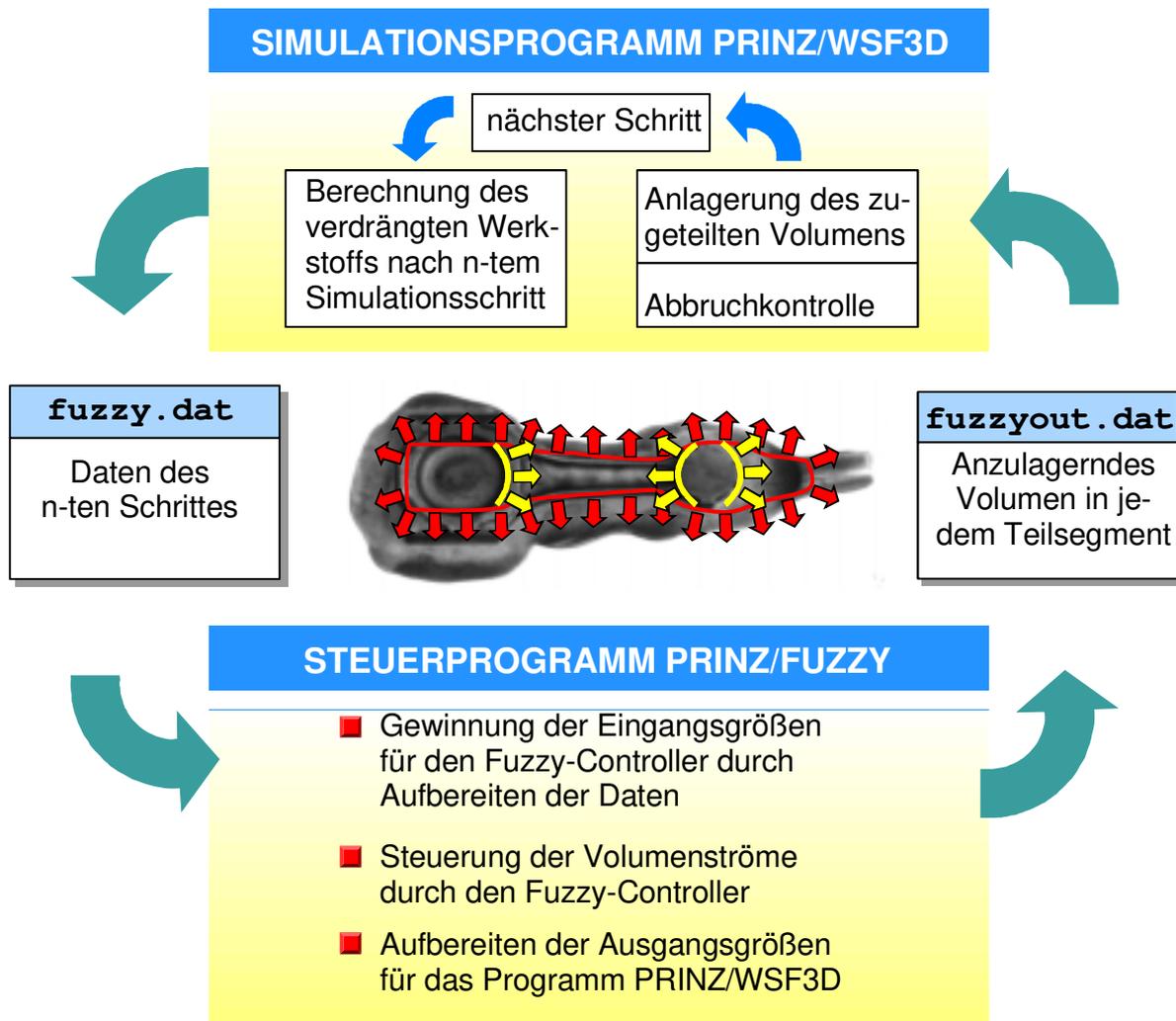


Bild 37: Zusammenwirken der Programme PRINZ/WSF3D und PRINZ/FUZZY

Der entwickelte Controller stellt zunächst nur einen Prototyp dar. Das Programm ist im Quellcode so flexibel gehalten, dass es leicht erweitert oder verändert werden kann. Das gilt ebenso für die Eingangsgrößen wie für die zugehörigen Regelbasen. Diese können beliebig definiert und verknüpft werden. Es entspricht dem Grundansatz der Fuzzy-Logik, dass neu gesammeltes Expertenwissen sowie Erfahrungen nach und nach einfließen können. Das Programm ermöglicht selbstverständlich auch das sogenannte "Chaining" von Regelbasen, womit Schlussfolgerungen einer Regelbasis als Input für eine weitere dienen können.

Die charakteristischen Module eines Fuzzy-Controllers wie Fuzzifizierer, Inferenzmaschine, Mengenoperatoren und Defuzzifizierer können bei Wartungsarbeiten als "black box" betrachtet werden.

Die Reihenfolge der Verknüpfung von Eingangsgrößen und Regelbasen kann im Hauptprogramm durch Aufruf der entsprechenden Funktionen in eine Liste eingetragen werden. Dazu werden für alle Ein- und Ausgangsgrößen zugehörige Felder, sogenannte *Arrays*, angelegt, die für den Regelalgorithmus benötigt werden.

### 4.5.3 Das Fuzzy-Inference-System (FIS) für PRINZ

Als geeignete Eingangsgrößen für die Steuerung des Fließverhaltens wurden identifiziert:

- das Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis des Segmentes  $i$ :  $A_{K,i}$
- das Vergleichsvolumen des Segmentes  $i$ :  $V_{K,i}$
- das Vergleichsverdrängungsvolumen des Segmentes  $i$ :  $V_{VK,i}$
- die Fließspannung  $k_f$ .

Ausgangsgröße ist die Volumenänderung pro Segment nach der Verdrängung, welche in Summe mit dem Segmentvolumen das Segmentsollvolumen ergibt.

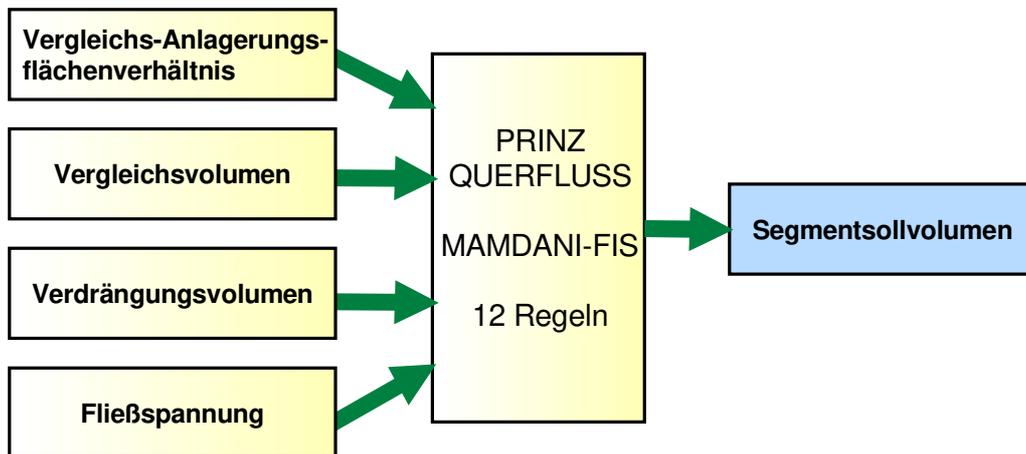


Bild 38: Aufbau des Mamdani-Fuzzy-Inference-Systemes (FIS) für die Steuerung des Werkstoffflusses durch die Ermittlung Sollvolumina für jedes Segment.

In Bild 38 ist das gesamte Regelsystem dargestellt. Die vier Eingangsgrößen (Variablen) haben die gewünschte sich wechselseitig beeinflussende Wirkung auf das Ergebnis (vgl. auch Bild 45 und Bild 46). Für den Aufbau des Inference-System des Fuzzy-Controllers wurden die Regeln von Mamdani genutzt /67/, als Ausgangsgröße wird die erforderliche Volumenänderung je Segment nach der Verdrängung des Werkstoffes berechnet. Die erforderliche Volumenänderung lässt sich nach Verdrängung mit dem momentanen Segmentvolumen zum Segmentsollvolumen zusammenführen.

#### 4.5.3.1 Das Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis

Das momentane Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis  $A_{K,i}$  von Anlagerungs- zu Kontaktfläche des Segmentes  $i$ , bezogen auf die gesamten Anlagerungs- und Kontaktflächen des Werkstückes, determiniert die Aufnahmefähigkeit von Werkstoff eines Segmentes. Große  $A_{K,i}$  eines Segmentes stellen überdurchschnittliche Anlagerungspotentiale dar und liefern somit einen geringeren Widerstand gegen die Verschiebung von Werkstoff in dieses Segment. Hier ist ein Zufluss von Werkstoff im Verlauf des globalen Stoffflusses zu erwarten. Analog bieten kleine  $A_{K,i}$  einen größeren Widerstand gegen das

Einfließen von Werkstoff in das Segment. Ein solches Segment wird bevorzugt Werkstoff in andere Segmente abgeben.

$A_{K,i}$  berechnet sich durch:

$$A_{K,i} = \frac{\frac{A_{AN,i}}{A_{Ko,i}}}{\frac{A_{AN,WS}}{A_{Ko,WS}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

|             |  |
|-------------|--|
| $A_{AN,i}$  | freie Anlagerungsfläche im Segment $i$   |
| $A_{Ko,i}$  | Teil der Segmentoberfläche des Segmentes $i$ , der im Kontakt zum Werkzeug steht |
| $A_{AN,WS}$ | Kontaktfreier Teil der gesamten Werkstückoberfläche                              |
| $A_{Ko,WS}$ | Teil der Oberfläche des Werkstückes, welcher Kontakt zum Werkzeug hat            |

Die Eingangsgröße wird beschrieben durch Zugehörigkeitsfunktionen in Form der Gaußschen Fehlerfunktion (Bild 39), die den Grad der Zugehörigkeit zu einem in Form von linguistischen Variablen beschriebenen Zustand definieren. Die Fehlerfunktion lässt sich leicht mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschreiben:

$$\phi(x) = e^{-\frac{(x-s)^2}{m}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Die mathematische Beschreibung macht das Abgreifen von Werten und die Berechnung des Flächeninhaltes und des Flächenschwerpunktes sehr einfach. Die Weite der Kurve wird durch die Festlegung von  $m$  determiniert, die Lage der Kurve durch  $s$ .

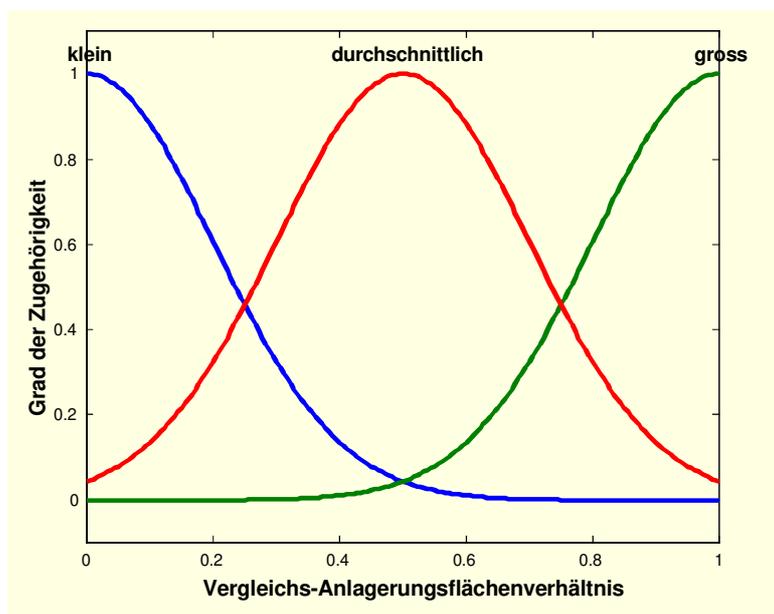


Bild 39: Zugehörigkeitsfunktionen für das Vergleichs-Anlagerungsverhältnis

Die Zugehörigkeitsfunktionen dienen der Übersetzung des scharfen Eingangswertes in den Fuzzy-Raum, also der Fuzzifizierung. Aus Bild 39 lässt sich ableiten, dass ein scharfer Wert von  $A_{K,i}=0.3$  ein schon durchschnittliches Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis darstellt. Die sich aus den Zugehörigkeitsfunktionen ergebenden Werte wurden durch drei einfache Regeln über die linguistischen Variablen mit der Ausgangsgröße verknüpft, die sich aus Erfahrungen ableiten:

1. Wenn ( $A_{K,i}$  = groß), dann (Volumenänderung = Zufluss).
2. Wenn ( $A_{K,i}$  = durchschnittlich), dann (Volumenänderung = konstant).
3. Wenn ( $A_{K,i}$  = klein), dann (Volumenänderung = Abfluss).

Alle dieser Eingangsgröße zugeordneten Regeln wurden maximal gewichtet.

### 4.5.3.2 Das Vergleichsvolumen

Mit Hilfe des Vergleichsvolumens  $V_{K,i}$  ist es möglich, den Füllgrad eines jeden Segmentes  $i$  im Vergleich zum Gesamtfüllgrad zu bestimmen. Er wird berechnet durch:

$$V_{K,i} = \frac{\frac{V_{WS,i}}{V_{WZ,i}}}{\frac{V_{WS}}{\sum_{j=1}^n V_{WZ,j}}} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit:

|            |  |
|------------|--|
| $V_{WS,i}$ | Volumen des Segmentes $i$ des Werkstückes        |
| $V_{WZ,i}$ | Hohlformvolumen des Segmentes $i$ des Werkzeuges |
| $V_{WS}$   | Einsatzvolumen des Werkstückes                   |

Dabei ist zu beachten, dass die Quotienten

$$\frac{V_{WS,i}}{V_{WZ,i}} \quad \text{und} \quad \frac{V_{WS}}{\sum_{j=1}^n V_{WZ,j}}$$

zu Null werden, wenn sich kein Werkstückvolumen im Segment befindet und Eins werden, wenn die Hohlform in diesem Segment vollständig gefüllt ist.

Ein überdurchschnittliches Vergleichsvolumen gibt an, dass das Segment schon einen hohen Füllgrad erreicht hat und demnach hier vorrangig ein Materialabfluss aus dem Segment heraus in umliegende Segmente zu erwarten ist. Analog verhält sich ein Segment mit unterdurchschnittlichem Vergleichsvolumen: es nimmt bevorzugt Werkstoffmaterial aus benachbarten Segmenten auf. Die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen sind in [Bild 40](#) dargestellt.

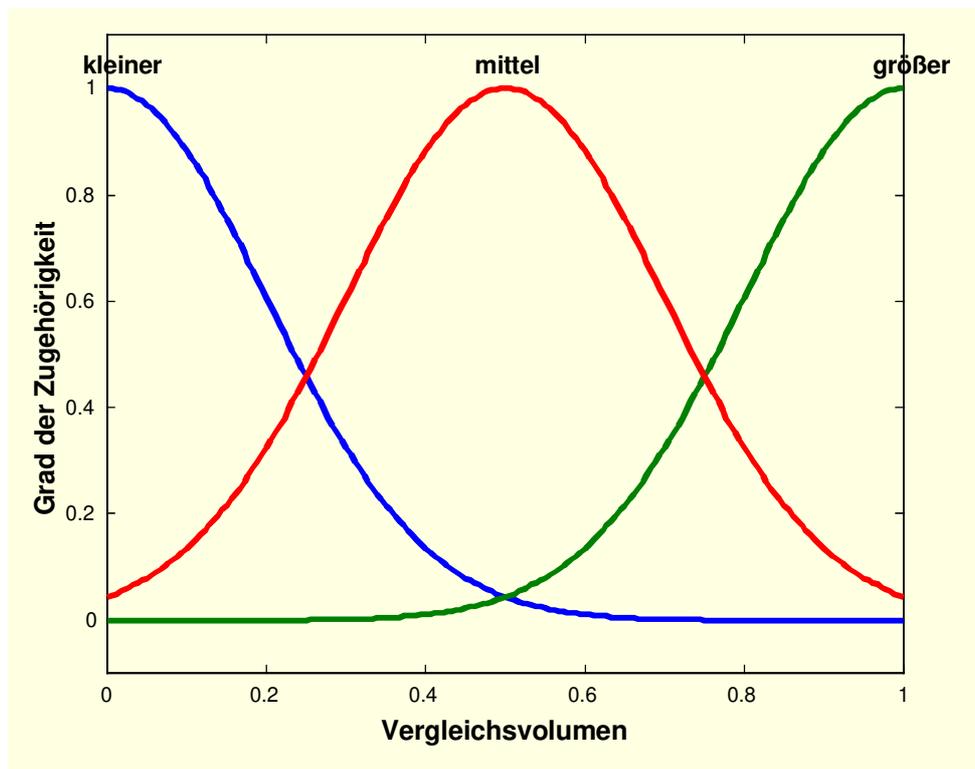


Bild 40: Zugehörigkeitsfunktionen des Vergleichsvolumens

Für die Beschreibung der Zugehörigkeit zu einem Zustand wurde die Gauß-Fehlerfunktion gewählt.

Dem Vergleichsvolumen wurden folgende Regeln mit maximaler Gewichtung zugeordnet:

1. Wenn (Vergleichsvolumen = kleiner), dann (Volumenänderung = Abfluss).
2. Wenn (Vergleichsvolumen = gleich), dann (Volumenänderung = konstant).
3. Wenn (Vergleichsvolumen = größer), dann (Volumenänderung = Zufluss).

### 4.5.3.3 Das Vergleichsverdrängungsvolumen

Das Vergleichsverdrängungsvolumen  $V_{VK,i}$  spiegelt den Anteil des im Segment  $i$  verdrängten Werkstoffes im Vergleich zum gesamten, im momentanen Berechnungsschritt verdrängten Werkstoff wieder (Bild 41). Hohe Werte zeigen, dass größere Mengen Werkstoff in diesem Segment verdrängt wurden und somit eine höhere Tendenz zu Querfluss vorliegt. Geringe Werte, verglichen mit dem gesamten verdrängten Volumen, zeigen, dass in diesem Segment geringe Werkstoffmengen verdrängt werden und somit größere Möglichkeiten bestehen, Werkstoff aus umliegenden Segmenten aufzunehmen.

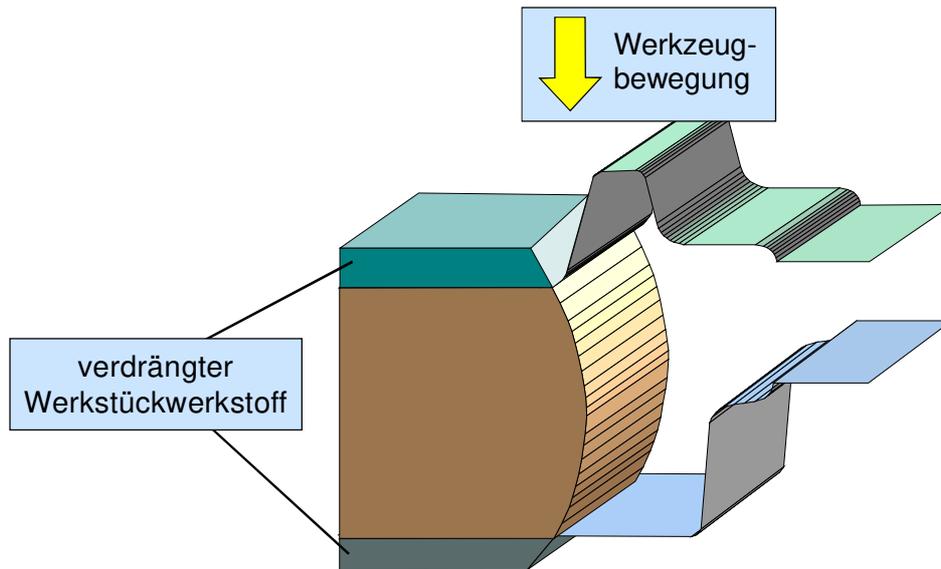


Bild 41: Verdrängung von Werkstoff durch Werkzeugbewegung in einem Segment während eines Berechnungsschrittes

Das Vergleichsverdrängungsvolumen  $V_{VK,i}$  berechnet sich durch:

$$V_{VK,i} = \frac{V_i(\tau - 1) - V_i(\tau)}{\sum_{j=1}^n (V_j(\tau - 1) - V_j(\tau))} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit:

|             |  |
|-------------|--|
| $V_{VK,i}$  | Vergleichsverdrängungsvolumen  |
| $V_i(\tau)$ | Volumen des betrachteten Werkstücksegmentes $i$ zum Berechnungsschritt $\tau$  |
| $\tau$      | Berechnungsschritt; wird anders als der diskrete Umformschritt $\sigma$ nach jeder Operation wie Anlagerung, Verdrängung usw. um ein Inkrement erhöht. |
| $n$         | Anzahl der Segmente  |

Die Zugehörigkeitsfunktionen für das Vergleichsverdrängungsvolumen  $V_{VK,i}$  sind in [Bild 42](#) dargestellt. Für die Beschreibung der Zugehörigkeit zu einem Zustand wurde in diesem Falle die einfache Dreiecksfunktion gewählt, die sich durch einen Vektor mit den Koordinaten der Nullstellen und des Scheitelpunktes darstellen lässt.

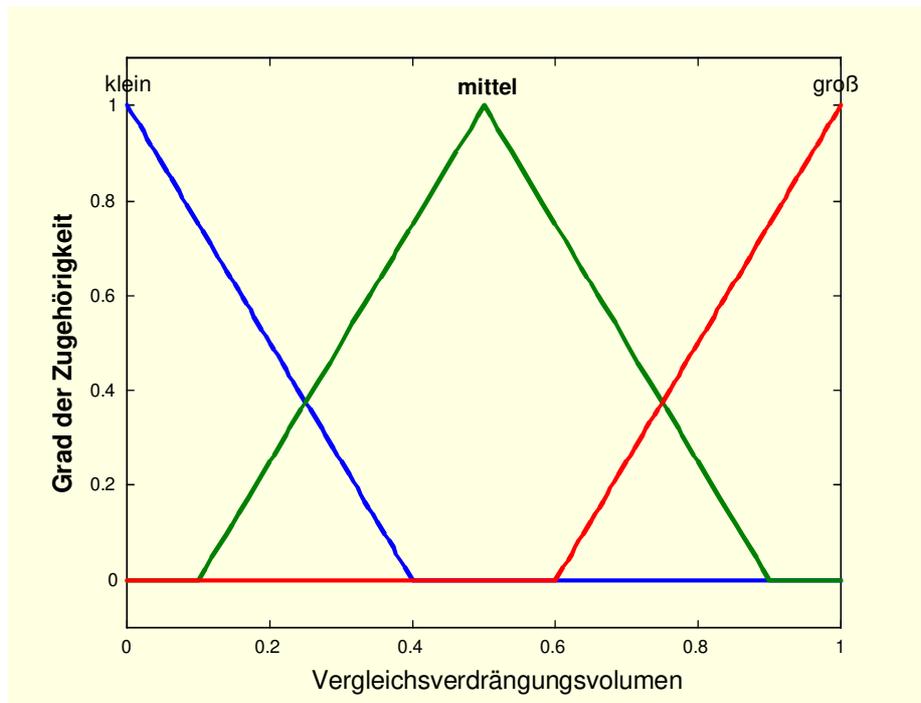


Bild 42: Dreiecksförmige Zugehörigkeitsfunktionen für das Vergleichsverdrängungsvolumen

Zur Verknüpfung mit der Ausgangsgröße wurden drei Regeln aufgestellt, die den oben genannten Effekten von  $V_{VK,i}$  auf die Ausgangsgröße gerecht werden:

1. Wenn ( $V_{VK,i} = \text{groß}$ ), dann (Volumenänderung = Abfluss).
2. Wenn ( $V_{VK,i} = \text{klein}$ ), dann (Volumenänderung = Zufluss).
3. Wenn ( $V_{VK,i} = \text{mittel}$ ), dann (Volumenänderung = konstant).

#### 4.5.3.4 Die Fließspannung

Ein Werkstück wird plastisch verformt, wenn die es angreifenden Spannungen eine bestimmte Größe erreichen. Die Fließspannung  $k_f$  ist die Spannung, die im einachsigen homogenen Spannungszustand Fließen des Werkstoffs einleitet bzw. aufrecht erhält /66/.

Wie in Kapitel 4.1 Voraussetzungen für die Modellierung des Schmiedeprozesses mit PRINZ auf Seite 29 bereits erläutert, wird die Fließspannung im Verlaufe der Berechnung des Werkstoffflusses mit PRINZ als konstant angesehen. Sie wird zu Beginn der Berechnung vom Benutzer festgelegt.

Da bei den in der Warmmassivumformung eingesetzten Werkstoffen die Temperatur des Schmiedestücks bereits sehr starken Einfluss auf die Fließspannung ausübt, wurde von einer zusätzlichen Berücksichtigung des Einflusses der Umformtemperatur auf den Querfluss abgesehen.

Die Fließspannung hat einen großen Einfluss auf das Fließgeschehen im Werkstück. Hohe Werte zeigen, dass der Werkstoff einen großen Widerstand gegen Verformung aufweist, niedrige Werte ermöglichen eine kraftärmere Umformung in vergleichbaren Zuständen. Entsprechend dieser Erfahrungswerte kann festgestellt werden, dass sich bei hohen Fließspannungswerten ein höherer Widerstand gegen das Fließen aus einem Segment heraus einstellt. Bei niedrigen Fließspannungswerten verhält sich der Werkstoff tendenziell „weicher“, er hat das Bestreben, in alle Richtungen zu fließen. Diese Formulierungen finden ihren Ausdruck in den in Bild 43 dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln.

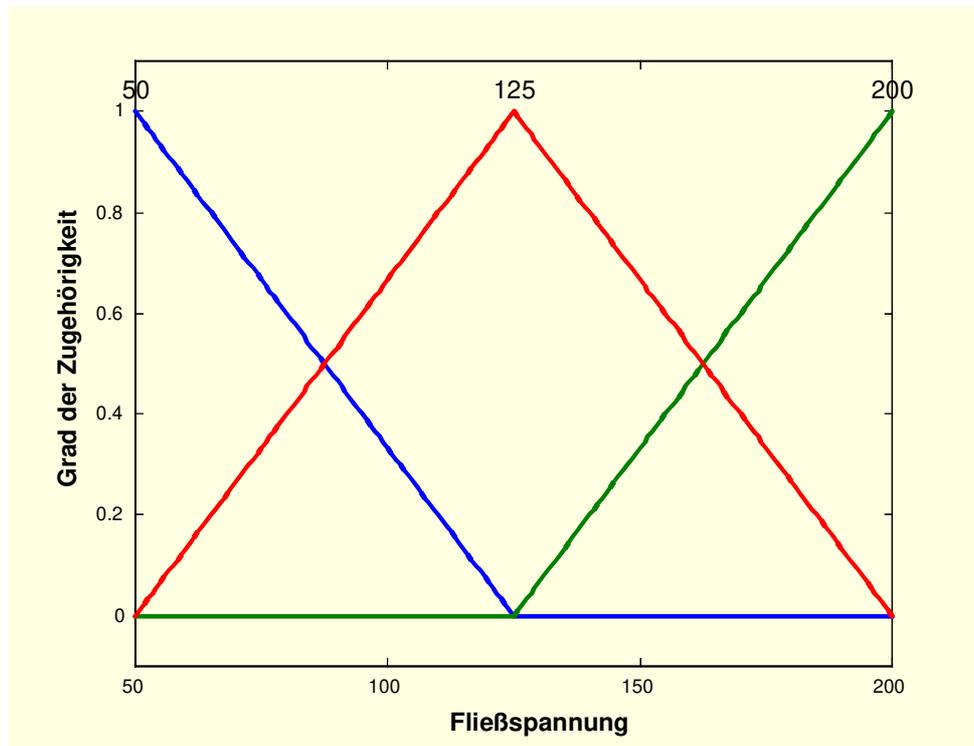


Bild 43: Zugehörigkeitsfunktionen zur Variablen „Fließspannung“

Die Regeln verknüpfen die Zugehörigkeitsfunktionen mit der Ausgangsgröße. Niedrige Fließspannungen bewirken tendenziell einen Abfluss aus dem betrachteten Segment, hohe Fließspannungen eher einen Zufluss:

1. Wenn ( $k_f = 50$ ), dann (Volumenänderung = Abfluss).
2. Wenn ( $k_f = 125$ ), dann (Volumenänderung = konstant).
3. Wenn ( $k_f = 200$ ), dann (Volumenänderung = Zufluss).

Da für alle Segmente die gleiche Fließspannung gilt, haben die zur Fließspannung gehörigen Zugehörigkeitsfunktionen einen globalen Einfluss auf das durch die anderen Funktionen hervorgerufene Regelverhalten des Fuzzy-Controllers. Die Einführung eines Fuzzy-Sets für die Fließspannung dient im PRINZ-Modell der Bestimmung des durch die Fließspannung charakterisierten Einflusses auf das Querfließverhalten des Werkstoffes.

#### 4.5.3.5 Die Ausgangsgröße

Das Ziel des Aufbaus eines Fuzzy-Controllers war die Regelung des Materialzu- und abflusses in und aus Werkstücksegmenten. Mit Hilfe des Fuzzy-Controllers wird immer jeweils ein einzelnes Segment untersucht. Die Ausgangsgröße muss demnach eine Bewertungszahl für jedes Segment sein, welche auf das diesem Segment zuzuteilende, anzulagernde Volumen nach dem Berechnungsschritt *Verdrängen* schließen lässt.

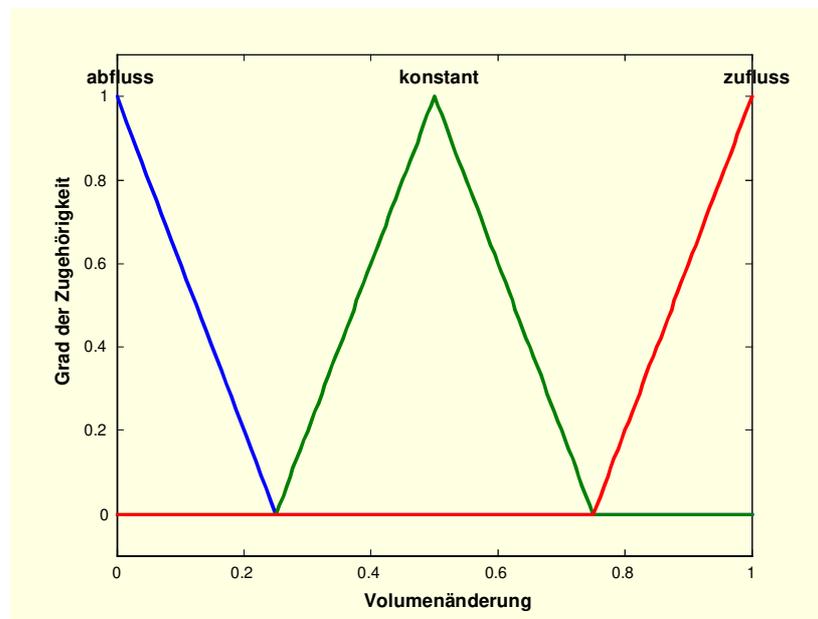


Bild 44: Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsgröße

Entsprechend des Mamdani-Ansatzes müssen auch für die Ausgangsgröße Zugehörigkeitsfunktionen formuliert werden, über die nach der Defuzzifizierung ein scharfer Wert ermittelt wird. Um die Ausgangsgröße optimal weiterverarbeiten zu können, wird ein Wert zwischen 0 und 1 abgefragt. Bei einer Bewertung von 0.5 tritt kein Querfluss in der Umgebung des betrachteten Segmentes auf.

Mit Hilfe des Fuzzy-Controllers wird für jedes Segment eine Bewertungszahl berechnet, die die Ausgangsgröße des Controllers darstellt. In Abhängigkeit dieser Bewertungszahlen und der Segmentvolumina wird festgelegt, wie viel Werkstoff den einzelnen Teilsegmenten zuzuordnen ist. Das anzulagernde Volumen im  $i$ -ten Segment  $V_{AN,i}$  berechnet sich dann nach der Formel:

$$V_{AN,i} = \frac{B_i \cdot V_i}{\sum_{j=1}^n (B_j \cdot V_j)} \times V_{AN,WS} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit:

|             |   |
|-------------|---|
| $B_i$       | Bewertungszahl des $i$ -ten Segmentes,        |
| $V_i$       | Volumen des $i$ -ten Segmentes,               |
| $V_{AN,i}$  | anzulagerndes Volumen im Segment $i$ ,        |
| $V_{AN,WS}$ | gesamtes, anzulagerndes Volumen am Werkstück. |

In Bild 45 sind die Effekte des Zusammenspiels von Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis und Vergleichsvolumen auf die Bewertungszahl zur Volumenänderung bei konstant gehaltener Fließspannung von  $125 \text{ N/mm}^2$  und konstantem Vergleichsverdrängungsvolumen von 0.5 im untersuchten Segment dargestellt. Zwei Einflussgrößen müssen konstant gehalten werden, da ein Plot über 5 Dimensionen leider nicht möglich ist. In Bild 45 ist sehr gut zu erkennen, dass vergleichsweise kleine Anlagerungsflächen im Segment geringe Bewertungszahlen für die Volumenänderung im betrachteten Segment hervorrufen, also logisch zu Abfließbewegungen des Werkstoffes führen. Beeinflusst wird das von den anderen Eingangsgrößen, in Bild 45 ist das das Vergleichsvolumen des Segmentes. Das kann dazu führen, dass kleine vorhandene Anlagerungsflächen für die Akkumulation von Werkstoffmaterial, verbunden mit einem großen Segmentvolumen, zu hohen Bewertungszahlen führen können und dann entweder das Materialvolumen im Segment konstant bleibt oder gar zunimmt.

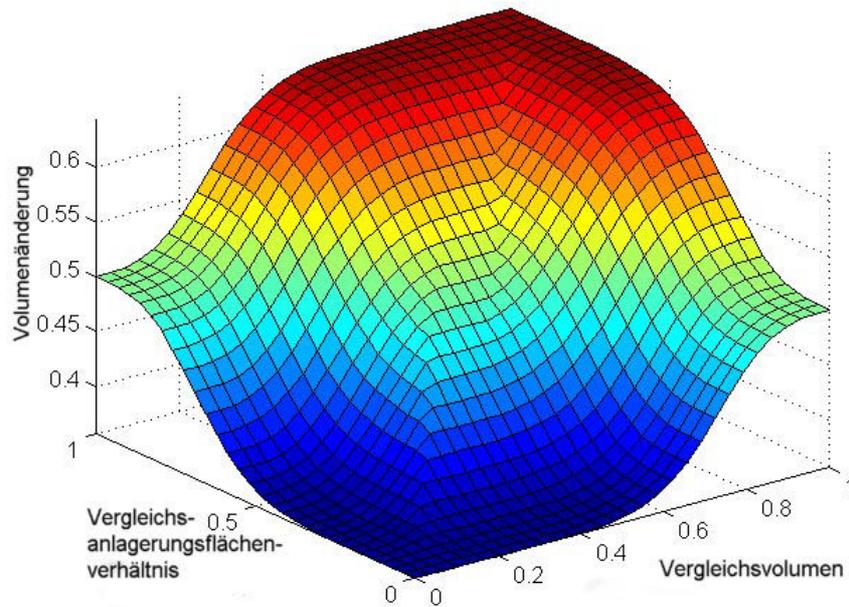


Bild 45: Kennfläche von Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis und Vergleichsvolumen mit  $k_f=125$  N/mm<sup>2</sup> und  $V_{VK,i}=0.5$ .

Die Wirkung von verschiedenen konstanten Fließspannungen auf die Bewertungszahl in Abhängigkeit vom Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis lässt sich sehr gut mit Hilfe eines X-Meshes verdeutlichen (Bild 46). Deutlich ist zu erkennen, dass niedrige Fließspannungswerte bei konstantem Vergleichsverdrängungsvolumen ( $V_{VK,i}=0.5$ ) und Vergleichsvolumen ( $V_{K,i}=0.5$ ) grundsätzlich niedrigere Bewertungszahlen für die Volumenänderung im Segment hervorrufen, hohe Fließspannungen im Bereich von 200 N/mm<sup>2</sup> oder höher aber hohe Bewertungszahlen und damit ein Einfließen von Werkstoff in das Segment bewirken. Leider lässt sich nicht gleichzeitig die Wirkung von veränderlichen Volumen und Verdrängungsvolumen darstellen, da hier der Einfluss der Fließspannung entweder verstärkt oder verringert werden kann.

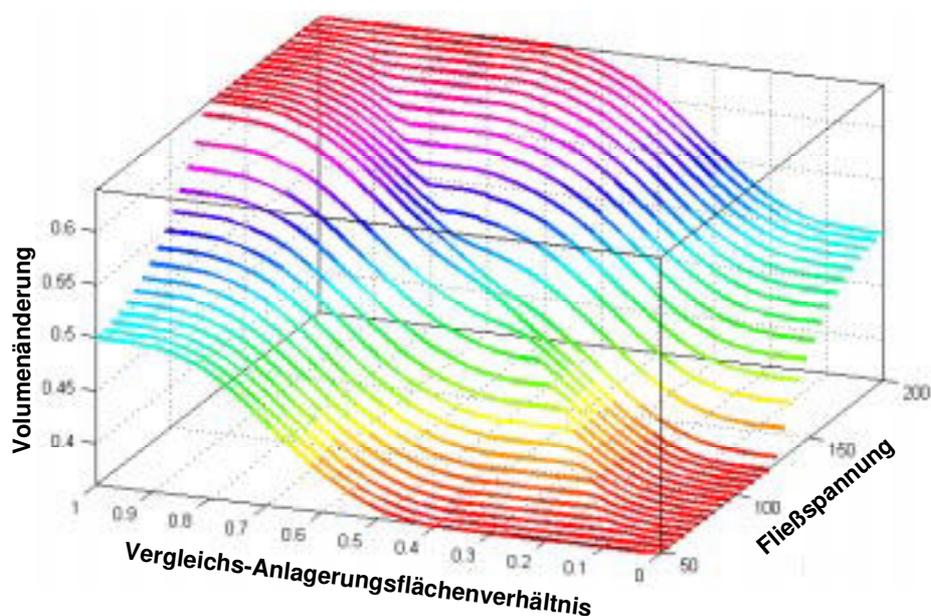


Bild 46: Abhängigkeit der Größe der Volumenänderung von Fließspannung und Vergleichs-Anlagerungsflächenverhältnis mit  $V_{VK,i}=0.5$  und  $V_{K,i}=0.5$ .

## 4.5.4 Einbindung in PRINZ

Für die Einbindung von Fuzzy in das Simulationssystem PRINZ waren Maßnahmen in den für die Verschiebung von Netzpunkten verantwortlichen Routinen innerhalb von PRINZ/WSF3D notwendig.

Die vom Fuzzy-Controller zurückzugebenden Daten kommen, genau wie dessen Eingangsdaten, über eine Dateischnittstelle. Der Fuzzy-Controller wird zur Berechnung des in den Segmenten anzulagernden Werkstoffes während eines jeden Weginkrements aufgerufen.

Der anzulagernde Werkstoff wird in einer weiteren, untergeordneten Iterationsschleife schrittweise den Anlagerungsstellen hinzugefügt. Die Akkumulation von Material auf den Anlagerungsflächen erfolgt dabei solange nacheinander, bis das Konvergenzkriterium, die Volumina aller Segmente entsprechen den Zielvolumina, erreicht wird. Die Zielvolumina der Segmente werden durch das Volumen des Werkstückes nach der Werkstoffverdrängung durch die Werkzeuge und die mit Hilfe des Controllers ermittelten Segment-Anlagerungsinformationen definiert. Diese werden in einer Datenbank abgelegt.

Bedingt durch den iterativen Charakter der Akkumulation von Werkstoff bis zu einem Zielwert wird je Segment ein leicht höherer Volumenwert erreicht als notwendig. Ohne Korrektur käme es im Berechnungsmodell zu einer stetigen Volumenzunahme. Deshalb muss im Vorfeld der Durchführung der Materialanlagerung eine Korrektur des durch die Iterationsschrittweite zuviel zugeteilten Volumens erfolgen, um nach jedem Weginkrement bzw. Umformschritt einen dem Sollvolumen  $V_{WS}$  des Werkstückes möglichst ähnlichen Volumenwert zu erhalten. Das Gesamtvolumen  $V_{Ziel,i}$  eines Segmentes  $i$  nach einem Umformschritt wird somit berechnet nach der Vorschrift:

$$V_{Ziel,i} = V_{AN,i} \cdot \frac{V_{WS}}{\sum_{j=1}^n V_{AN,j}} \quad (\text{Gl. 7})$$

wobei  $V_{AN,i}$  der mit Hilfe der Fuzzy-Logik ermittelte Volumenanteil zur Erreichung des bei Auftreten von dreidimensionalem Werkstofffluss gewünschten Segmentvolumens nach Abschluss eines Umformschrittes ist.

## 4.5.5 Ergebnisse

Das Ziel der Entwicklung des Fuzzy-Controllers, die Berücksichtigung des Querflusses in das Berechnungsmodell für dreidimensional geformte Werkstücke unter Beibehaltung der hohen Berechnungsgeschwindigkeit, wurde durch eine verbesserte Führung des Fließverhaltens während der Berechnung der schon erwähnten Langteile erreicht. Die Berechnungsgeschwindigkeit wurde nicht gravierend herabgesetzt, da entsprechend der Vorgaben der Fuzzy-Controller ein gutes Laufzeitverhalten aufweist. Die Anwendung der Fuzzy-Logik ermöglicht eine schlanke Regelung komplexer Vorgänge, die mit vergleichsweise geringen Datenmengen auskommt. Die Bereitstellung der für den Controller notwendigen Informationen sowie die neuen Berechnungsroutinen in PRINZ/WSF3D zur Weiterverarbeitung der von der Fuzzy-Logik ermittelten Volumenwerte führen zu keiner wesentlichen Verlangsamung und gleichzeitig zu besseren Berechnungsergebnissen (Tabelle 3). Ein Vergleich der Ergebnisse mit Schmiedeversuchen und FEM-Simulation ist in dieser Arbeit in Kapitel 6.1 *Experimentalteil* zu finden.

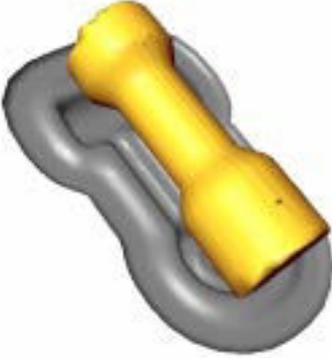
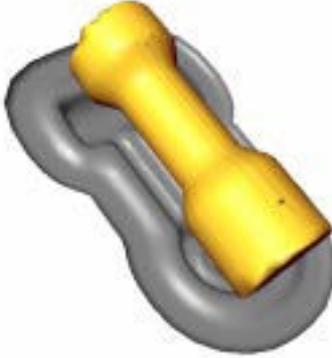
|                                    | <b>Berechnung mit PRINZ<br/>- Standard -</b>  | <b>Berechnung mit PRINZ<br/>- Fuzzy -</b>   |
|------------------------------------|---|---|
| <b>Rechner</b>                     | Pentium 133 MHz, 64 MB  | Pentium 133 MHz, 64 MB  |
| <b>Gesenkabstand zu Beginn</b>     | 26.5 mm   | 26.5 mm   |
| <b>Gesenkabstand am Ende</b>       | 1.5 mm  | 1.5 mm  |
| <b>Anzahl der Knoten zu Beginn</b> | 17901   | 17901   |
| <b>Anzahl der Knoten am Ende</b>   | 23452   | 24299   |
| <b>Knotenabstand</b>               | 0.2 mm  | 0.2 mm  |
| <b>Berechnungsschritte</b>         | 8   | 8   |
| <b>Rechenzeit</b>                  | 4.2 min   | 4.3 min   |
| <b>Ausgangszustand</b>             |   |   |
| <b>Ergebnisse</b>                  |  |  |

Tabelle 3: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit und ohne Verwendung von Fuzzy-Logik

In Tabelle 3 wird verdeutlicht, welche qualitativen Verbesserungen bei der Berechnung von Langteilen möglich sind, wenn ein Querfluss im Langteil zugelassen und geregelt wird. Für das oben gezeigte Beispiel wurden folgende Regeln genutzt:

1. Im Segment werden große Volumina akkumuliert, wenn sowohl das Segmentvolumen als auch die Anlagerungsflächen groß sind.
2. Im Segment verringert sich das zu akkumulierende Material, wenn ein kleines Anlagerungs-Kontaktflächenverhältnis vorherrscht.
3. Herrschen in einem der Nachbarsegmente günstigere Akkumulationszustände, so fließt der Werkstoff bevorzugt in ein Nachbarsegment ab.
4. Großer Radialflussanteil liegt bei annähernd rotationssymmetrischen Zuständen vor, d.h. die Kontakt-Anlagerungsverhältnisse der Oberfläche des Werkstückes sind denen der Nachbarn ähnlich, ebenso die Volumina der benachbarten Werkstück- und Werkzeugsegmente.
5. Hohe Schrittweiten in Verbindung mit kleinen freien Anlagerungsflächen im Segment sowie hohen Volumenabnahmen durch den Vorschub des Werkzeuges führen zu hohen Querflüssen.

Die Anwendung der Regeln haben das Ziel, die Segmente nach ihrer Werkstoffaufnahmefähigkeit zu bewerten. Die gefundenen Unterschiede im Fließpotential der einzelnen Segmente werden identifiziert und im weiteren Verlauf der Berechnung ausgeglichen.

Voraussetzung für die Anwendung der dargestellten Logik ist die Annahme homogener Temperatur- und Fließspannungszustände im Inneren des Werkstückes.

## 4.6 Netzoptimierung

Die Qualität einer Berechnung und die Rechengeschwindigkeit hängen in starkem Maße von einer optimalen Gestaltung des Oberflächennetzes ab. Neben der Auflösung der geometrischen Details hat das Oberflächennetz, welches über die Schnittebenen definiert wird, die Aufgabe, während des Rechenlaufes einerseits die für die Berechnung notwendige Informationstiefe über den Momentanzustand des fließenden Werkstückes zu bieten, andererseits darf aber damit die Rechengeschwindigkeit nicht stark beeinflusst werden. Es bestand die Aufgabe, Algorithmen zu finden und zu implementieren, die die Netzeigenschaften optimal an die zu lösende Simulationsaufgabe anpassen.

Vergleiche zwischen Versuchsberechnungen mit grobem und feinem Netz haben gezeigt, dass für gute Berechnungsergebnisse ein dichtes Netz und die damit verbundene hohe Informationsdichte notwendig ist, dass aber die Rechenzeit stark zunimmt (Tabelle 4). Tabelle 4 zeigt weiterhin, dass aufgrund der Nutzung einer adaptiven Netzoptimierung die Berechnungsergebnisse beider Varianten annähernd gleich sind.

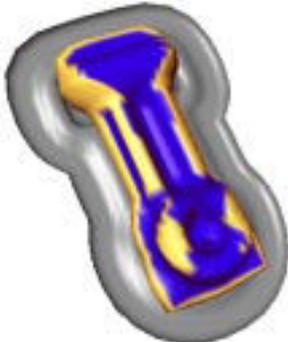
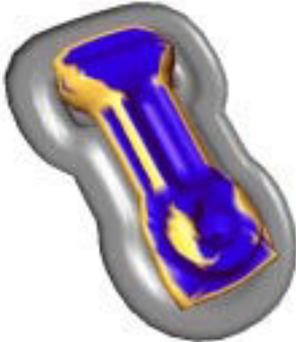
|                                    | Berechnung mit PRINZ<br>- grob -   | Berechnung mit PRINZ<br>- fein -   |
|------------------------------------|--|--|
| <b>Rechner</b>                     | Pentium 133 MHz, 64 MB   | Pentium 133 MHz, 64 MB   |
| <b>Gesenkabstand zu Beginn</b>     | 26.5 mm  | 26.5 mm  |
| <b>Gesenkabstand am Ende</b>       | 1.5 mm   | 1.5 mm   |
| <b>Anzahl der Knoten zu Beginn</b> | 7857   | 17901  |
| <b>Anzahl der Knoten am Ende</b>   | 8877   | 24299  |
| <b>Knotenabstand</b>               | 2 mm   | 0.2 mm   |
| <b>Berechnungsschritte</b>         | 8  | 8  |
| <b>Rechenzeit</b>                  | 1,7 min  | 4.3 min  |
| <b>Ergebnisse (Schritt 6)</b>      |  |  |

Tabelle 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse bei grober und feiner Vernetzung. Die Ergebnisse zeigen nur geringfügige Unterschiede bei gleichzeitig stark differierenden Berechnungszeiten.

Umformprozesse, besonders aber Schmiedeprozesse, sind durch hohe Umformgrade gekennzeichnet. Die auftretenden Formänderungen führen während der Simulation zu sich ständig verändernden Netzzuständen, die, wenn nicht kontrolliert, eine Simulationsrechnung unbrauchbar machen können (Bild 47).

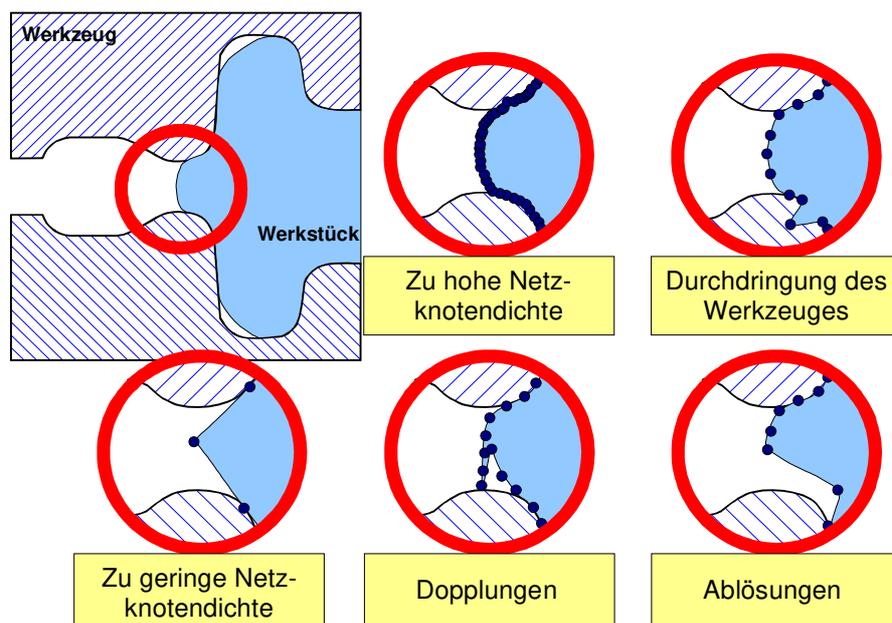


Bild 47: Mögliche Formen der Netzentartung

Um diesem Phänomen entgegen zu wirken, sind zwei Strategien denkbar. Durch gezielte und automatische Anpassung des Netzes an momentane Bedingungen kann das Netz zu jeder Zeit in einem guten Zustand gehalten werden. Es handelt sich hierbei um die in dieser Arbeit favorisierte adaptive Netzoptimierung. Eine andere Methode, das Netz an die momentanen Prozessbedingungen anzupassen, ist das auch aus der Finiten Elemente Methode bekannte *Remeshing*.

Beim Remeshing wird bis zu einem festgelegten Grade eine Degeneration des Netzes zugelassen. Wenn ein Grenzwert erreicht ist, wird das verzerrte Netz auf ein unverzerrtes Netz vollständig abgebildet. Eines der Hauptprobleme aller gängigen Remeshing-Algorithmen ist der mit diesem Vorgang verbundene Volumenverlust. Weiterhin ist das Remeshing ein sehr rechenzeitaufwendiger Prozess.

Verbunden mit dem Remeshing wie mit der für PRINZ entwickelten adaptiven Netzoptimierung ist das Rozoning, bei welchem Eigenschaften von Knoten durch Interpolation und Extrapolation auf das neue Netz übertragen werden.

## 4.6.1 Vorgehensweise

Die Netzoptimierung arbeitet mehrstufig. Zu Beginn eines jeden Umformschrittes wird die Netzintegrität geprüft. Alle Netzpunkte werden überprüft auf:

- Kontakt,
- Orientierung,
- Durchdringung der Werkzeuge durch das Werkstück ([Bild 48](#), [Bild 49](#)),
- Dopplungen ([Bild 50](#), [Bild 51](#)),
- Abstand zu den Nachbarn und Anzahl in den Anlagerungsbereichen ([Bild 52](#), [Bild 53](#)).

Die ermittelten Werte werden überprüft anhand der vorhandenen Informationen über die Volumina in den Segmenten und im gesamten Werkstück, die Anlagerungs- und Kontaktflächen sowie der Historie der Umformung. Inkonsistenzen werden erkannt und korrigiert. Wenn notwendig, werden Netzknoten eingefügt bzw. entfernt, die notwendigen Knotenwerte werden interpoliert. Dopplungen sowie Durchdringungen der Werkzeuge und des Werkstückes werden zurückgezogen.

Während der Berechnung erfolgt eine weitere Kontrolle der Netzintegrität der zu verschiebenden und verschobenen Netzbereiche. Verschiebungen über die Werkzeuggrenzen hinaus werden vor der Ausführung identifiziert und entsprechend korrigiert. Die dennoch bei den Verschiebungen stattgefundenen Übertritte in die Werkzeuggebiete werden automatisch zurückgenommen und die durch das Verfahren der Werkzeuge resultierende Reduzierung des Abstandes zwischen den Werkzeugen wird, wenn notwendig, auf die Netzdichte übertragen. Änderungen im Kontaktzustand des Werkstückes werden identifiziert und in die Netzknoten geschrieben.

Nach der Berechnung wird der Datenbestand nochmals auf Inkonsistenzen überprüft, wobei sowohl die Rücknahme von Werkzeug-Werkstück-Durchdringungen als auch des sich daraufhin einstellenden Volumenverlustes durch eine Ausgleichs-Verschiebung korrigiert wird.

## 4.6.2 Durchdringungen

Durchdringungen von Werkzeug und Werkstück ergeben sich

1. bei Verschiebungen über die Werkzeuggrenzen hinaus ([Bild 48](#)) oder
2. bei der Überlagerung von Gravurbereichen durch Verbindungslinien zwischen den Knoten ([Bild 49](#)).

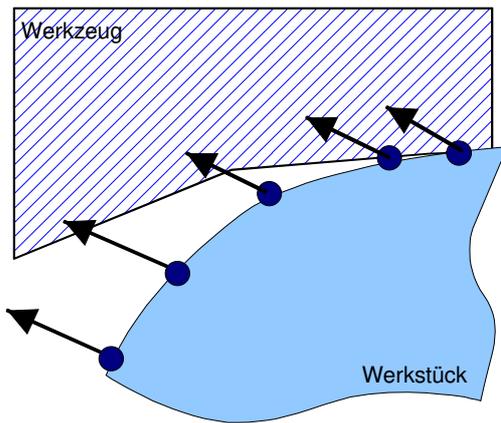


Bild 48: Durch Verschiebung von Knotenpunkten über die Werkzeuggrenzen hinaus entstehende Durchdringung des Werkzeuges

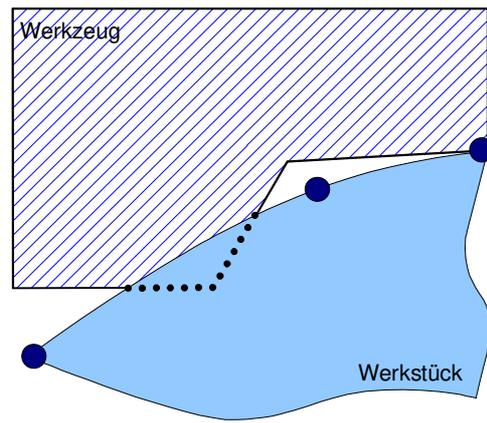


Bild 49: Durchdringen der Oberfläche des Werkzeuges durch zu geringe Netzknotendichte

Fall 1 tritt nur im Verlaufe von Verschiebungen auf. Hier ist es erforderlich, die Verschiebung selbst auf Übertritte zu kontrollieren und die Durchdringung auf diese Weise nicht zuzulassen. Zur Korrektur der Durchdringung wird ein Algorithmus genutzt, der im wesentlichen das Enthaltensein eines Punktes in einem Polygon prüft. Das Werkzeug wird in diesem Falle als geschlossener Konturzug betrachtet. Aufgabe ist es, einen Netzknoten zu identifizieren, der sich innerhalb dieses Polygons befindet. Die Lösung ist, abgesehen von wenigen Sonderfällen, sehr einfach: man zeichnet, ausgehend vom zu identifizierenden Knotenpunkt, eine Verbindungslinie zu einem Punkt, der sich garantiert außerhalb des geschlossenen Polygons des Werkzeuges befindet. Wird das Polygon mit einer ungeraden Anzahl geschnitten, so liegt der Punkt innerhalb des Polygons, wird es mit einer geraden Anzahl geschnitten, so liegt es außerhalb des Polygons.

Fall 2 lässt sich auf einfache Weise auflösen. Die Netzknotendichte im Bereich der Durchdringung wird erhöht, damit ergibt sich ein klar zu identifizierendes Gebiet von Durchdringungen, das wie in Fall 1 behandelt wird.

### 4.6.3 Dopplungen

Dopplungen dürfen nicht verwechselt werden mit Überlappungen, die zu Eigenkontakt führen auf Grund aufeinander zufließender Werkstofffronten. Es handelt sich hier um eine Form der Netzentartung, die in numerischen Problemen bei der Berechnung des Werkstoffflusses ihren Ursprung haben ([Bild 50](#) und [Bild 51](#)). Dopplungen können die Integrität des Werkstückmodells stören und zu unerwünschten Ausprägungen im Verlaufe der Simulation führen.

Dopplungen können korrigiert werden durch:

1. Eingliedern der Knotenpunkte,
2. Löschen von Knotenpunkten.

Um der wichtigen Vorgabe bei der Entwicklung der Software, möglichst kurze Rechenzeiten, gerecht zu werden, wurde nach einer Lösung dieses Problems gesucht, welche nicht auf dem Prüfen des Abstandes eines jeden Knotenpunktes voneinander beruht. Dieses Verfahren führt zu einer  $N^2$ -proportionalen Laufzeit ( $N$ ...Anzahl der Knotenpunkte), was für eine reaktionsschnelle Simulation nicht akzeptabel ist. Die statt dessen verwendete Methode beruht auf dem aus der Literatur bekannten „Mergesort“-Verfahren /57/, mit

welchem man mehrere sortierte Dateien zu einer sortierten zusammenfügen kann. Im wesentlichen besteht Mergesort aus zwei rekursiven Aufrufen, denen eine Mischprozedur folgt. Der verwendete Algorithmus kommt mit einer Laufzeit von  $N \log N$  im ungünstigsten Falle aus. Da es sich bei den zu untersuchenden Konturzügen um vorsortierte Punktwolken handelt, ist ein noch wesentlich besseres Laufzeitverhalten erreicht worden.

Die in Bild 50 dargestellten Dopplungen in der Anlagerungszone können nur dann durch Löschen von Knotenpunkten beseitigt werden, wenn gleichzeitig die den Knotenpunkten zugeordneten Eigenschaften den die weitere Konturkurve bildenden Knotenpunkten übertragen werden. Die Normalenvektoren müssen neu berechnet werden, da sich ein anderer Verlauf der Kontur ergibt. In einem solchen Bereich empfiehlt sich die Eingliederung der Knotenpunkte, indem die in der internen Datenstruktur abgelegten Verknüpfungen mit Vorgänger und Nachfolger umorganisiert werden.

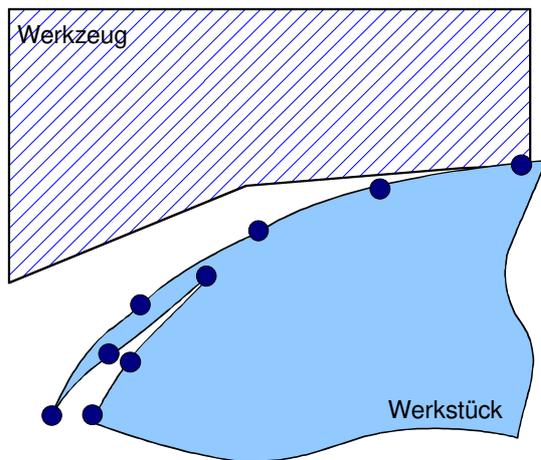


Bild 50: Dopplung in der Anlagerungszone des Werkstückes

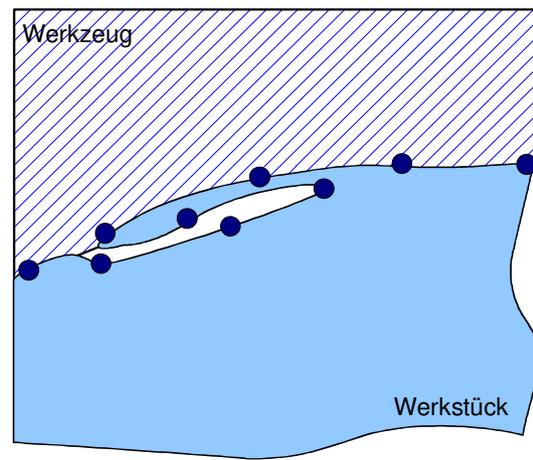


Bild 51: Dopplung in der Kontaktzone von Werkstück und Werkzeug

In bestimmten Situationen ist es zulässig, die die Dopplung bildenden Knotenpunkte zu entfernen, so z.B. die in Bild 51 dargestellte Dopplung in der Kontaktzone von Werkstück und Werkzeug. Dies kann geschehen, wenn bei ausreichender Netzdichte die Dopplung parallel zur Oberfläche von solch hoher relativer Nähe ist, dass durch die Entfernung keine Volumen- und Formabweichung zu erwarten ist. Die Knoten werden so entfernt, dass es zu keiner Eigenschaftsänderung des Werkstückes kommt. Für den in Bild 51 dargestellten Fall gilt demnach, dass die inneren Knotenpunkte der Dopplung entfernt werden können, die äußeren Netzknoten bleiben, einschließlich ihrer Eigenschaft, Kontakt zum Werkzeug aufzuweisen, stehen.

#### 4.6.4 Netzdichte

Zu geringe Netzdichte führt zu fehlerhaften Ausprägungen der für das Gesenkschmieden typischen Details beim Fließen und weiterhin zu Durchdringungen sowie Fehlstellen in der Kontaktzone zum Werkzeug (Bild 52). Das sich einstellende Simulationsergebnis wird durch eine zu gering gewählte Netzdichte beeinträchtigt. Der Minimalabstand der Knotenpunkte kann vom Benutzer eingestellt werden. Um bei Falscheingaben die Berechnungsgenauigkeit nicht zu gefährden, wird durch einen Prüfalgorithmus, der den Abstand der Knotenpunkte von seinen Nachbarn kontrolliert, jeder Bereich identifiziert, der eine zu geringe Netzdichte aufweist. Diese Bereiche werden entsprechend mit Knoten aufgefüllt, die notwendig zuzuordnenden Eigenschaften jedes Punktes werden interpoliert.

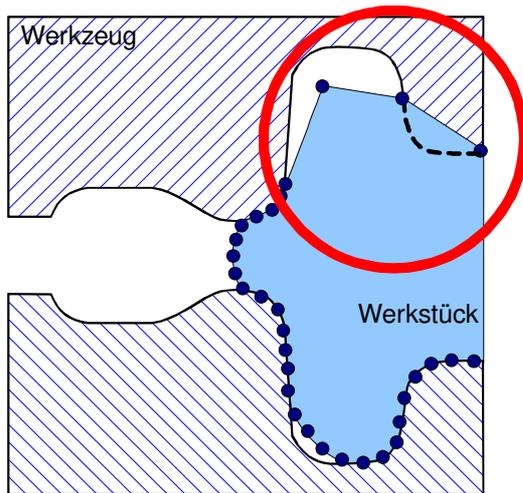


Bild 52: Lokale Verknappung an Netzknotten mit den Erscheinungsformen Durchdringung und mangelnde Geometrieausprägung

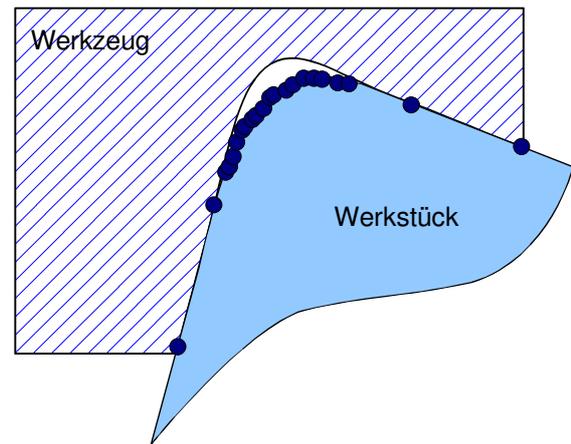


Bild 53: Zu hohe Knotendichte durch hohen Fließwiderstand in konkaven Werkzeugbereichen

Ein zu dichtes Netz erhöht die notwendige Rechenzeit, ohne die in diesem Falle zu erwartende Genauigkeitssteigerung herbeizuführen. Die hohe Anzahl von Knotenpunkten führt zu sehr geringen Unterschieden zu den jeweiligen Nachbarn, die sich, resultierend aus der begrenzten Genauigkeit von Fließkommazahlen, in numerischen Fehlern wie Unstetigkeiten und Dopplungen niederschlagen können. Sobald sich eine solche Entwicklung abzeichnet, sind Knoten zu entfernen.

## 4.7 Umformkraftberechnung

Zur Auswahl eines geeigneten Umformaggregates ist die Kenntnis der zur Herstellung des Schmiedeteils benötigten Umformkraft bzw. Umformarbeit erforderlich. Da der Berechnungsansatz zur Simulation des Werkstoffflusses nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges keine Informationen hierüber liefert, sind andere Verfahren zu deren Ermittlung notwendig.

Bisher durchgeführte Untersuchungen /69, 70, 71, 72, 73, 75, 76 u.a./ zur Bestimmung der Umformkraft auf empirischem oder analytischem Wege, also abseits der Finiten-Elemente-Methode und der elementaren Plastizitätstheorie, unterliegen der kritischen Analyse:

- häufig beschränkte man sich auf die Ermittlung von Formeln zur Bestimmung der Endkraft bzw. der Maximalkraft,
- die auf der Basis umfangreicher Mess- und Versuchsreihen aufgestellten empirischen Formeln sind in der Praxis z.T. erheblichen Abweichungen unterworfen,
- die ermittelten Formeln sind nur begrenzt auf die Allgemeinheit zu übertragen, da empirische Untersuchungen auf eine begrenzte Zahl definierter Zustände beschränkt sind, abhängig von der zumeist durchgeführten statistischen Versuchsplanung,
- die Formeln wurden zu einer Zeit aufgestellt, als Simulation noch nicht Stand der Forschung und Technik war, zu ihrer Aufstellung wurde diese Technologie nicht genutzt,

- empirische Formeln und Vorgehensweisen wurden nicht für den Einsatz in schnellen, auf kinematischen Werkstoffflussmodellen basierenden Umformsimulationssystemen konzipiert, wie es PRINZ darstellt,
- das Nichtvorhandensein von genauen geometrischen Verhältnissen zu jedem Zeitpunkt der Umformung, wie sie PRINZ liefert, in einer Phase, in der die Kraftabschätzung notwendig ist, stellte einen erheblichen Nachteil dar.

In PRINZ implementiert wurde ein Berechnungsmodul zur Ermittlung von Umformkraft, das unterschiedliche Modellansätze beinhaltet und diese miteinander kombiniert. Die zur Herstellung beliebig geformter Schmiedestücke notwendigen Kräfte sind mit den Modellen berechenbar, das Ergebnis stellt aber nur einen Näherungswert dar. Alternativen sind Berechnungsverfahren unter Nutzung der Plastizitätstheorie und der Finiten-Elemente-Methode. Die FEM spielte bei den Überlegungen zur Konzeption der Berechnungsalgorithmen keine Rolle. Von einer Lösung für nicht-rotationssymmetrische Problemstellungen unter Nutzung der Modelle der Elementaren Plastizitätstheorie wurde abgesehen aus folgenden Gründen:

- Das für den Anwendungsfall des Gesenkschmiedens in Frage kommende Röhrenmodell ist nur für rotationssymmetrische Umformvorgänge zwischen annähernd parallelen Stauchbahnen gültig. Dieser einfache Sonderfall tritt in der Praxis sehr selten auf.
- Das Stäbchenmodell /6/ ist nur in der Lage, symmetrische Fließvorgänge mit mindestens zwei Symmetrieebenen abzubilden. Das Steigen des Werkstoffes in Gravurelemente wie Rippen ist nicht möglich.
- Die Modelle der elementaren Plastizitätstheorie lassen keine lokal veränderlichen Fließbedingungen zu, so wie sie unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Temperaturen auftreten.
- Die mit den gewählten Methoden erzielten Berechnungsergebnisse sind jedoch als Auswahlkriterium für das zu verwendende Umformaggregat hinreichend genau.

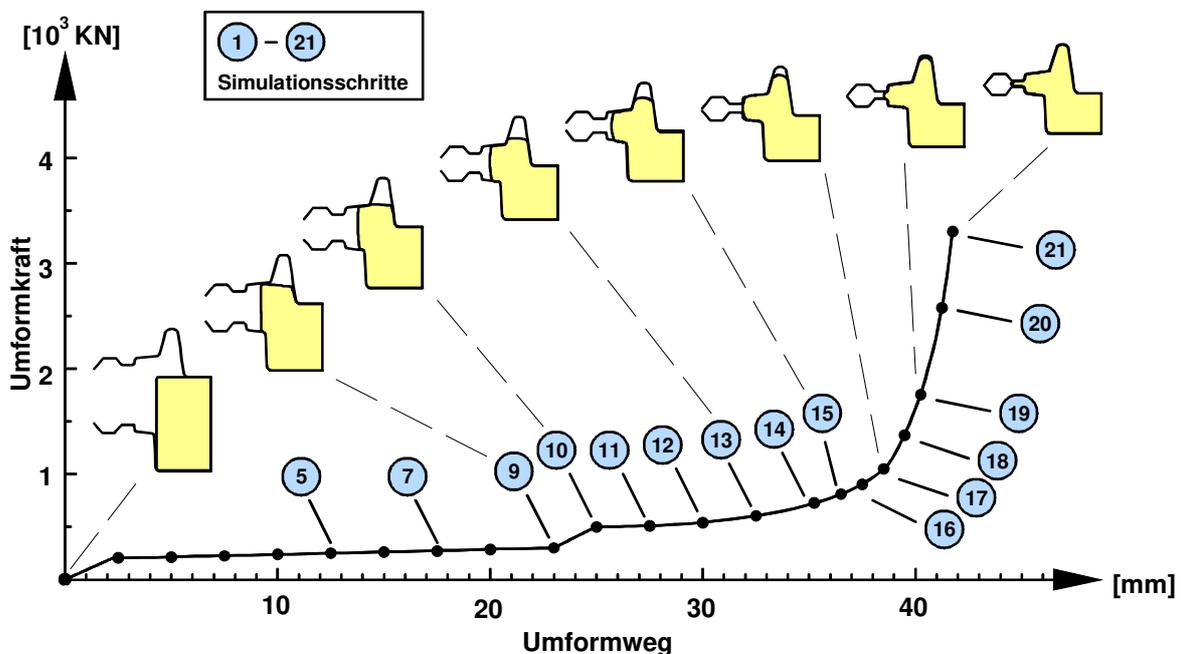


Bild 54: Kraft-Weg-Verlauf eines rotationssymmetrischen Flansches, berechnet mit Hilfe des in die 2D-Version integrierten Röhrenmodells der elementaren Plastizitätstheorie /21, 22/

Bisher realisierte Algorithmen erlauben lediglich die Berechnung des Kraft-Weg-Verlaufes für rotationssymmetrische Vorgänge [21, 22]. Die geometrische Datenbasis für die Berechnung der auftretenden Spannungen, Kräfte und Umformarbeiten liefert die im jeweiligen Berechnungsschritt zuvor durchgeführte Simulation des Werkstoffflusses. Die während des Simulationslaufes gespeicherten Geometriedaten von Werkzeug und Werkstück werden herangezogen, um das Berechnungsmodell automatisch aufzubauen. Die Ergebnisdaten werden so abgelegt, dass beispielsweise die Kräfte als Kraft-Weg-Verlauf beim Schmieden dargestellt werden können (Bild 54).

Die größte Umformkraft tritt in der Regel am Ende des Umformvorganges auf, da beim Schmieden mit Grat die Gravur zu diesem Zeitpunkt bereits fast vollständig gefüllt ist. Das Werkstück wird hier nur noch gestaucht, wobei das überschüssige Werkstoffvolumen aus der Gravur heraus in den Gratspalt verdrängt wird. Nur noch ein Teil des Werkstückes wird plastisch umgeformt, wie Bild 55 einer FEM-Berechnung eines Flansches unter Darstellung der Geschwindigkeitsfelder zeigt. In dieser letzten Phase der Umformung erkaltet der Werkstoff durch den großflächigen Kontakt zum Werkzeug sehr stark, so dass es zu einem weiteren, thermisch induzierten Kraftanstieg kommt.

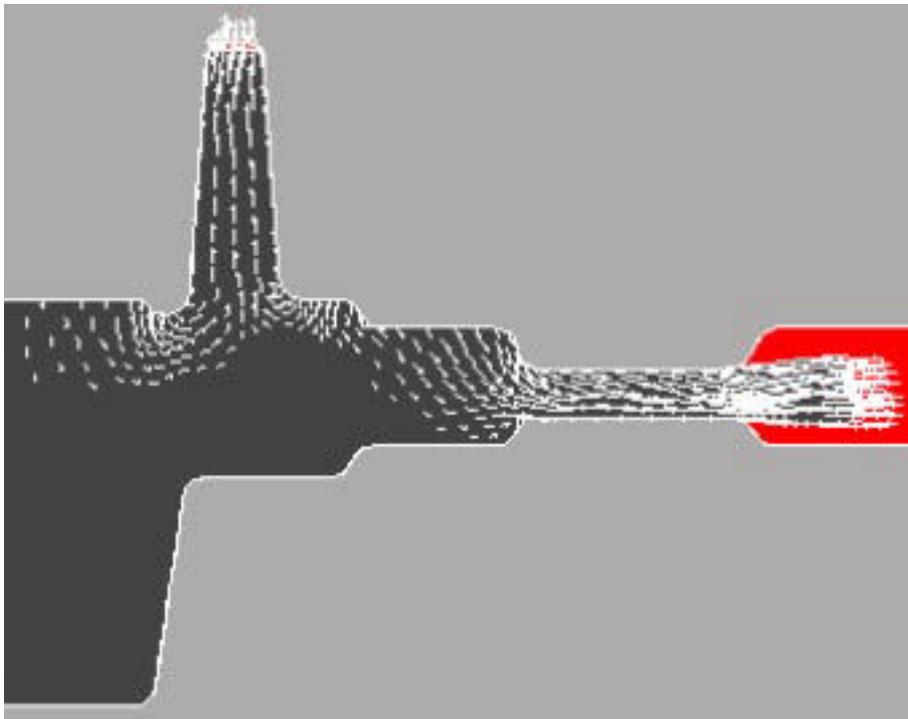


Bild 55: Geschwindigkeitsfelder bei 94.2 % der Umformung eines Flansches.

Die bekannten, von der Finiten-Elemente-Methode abweichenden Methoden, zielen auf die Ermittlung der Kraftgrößtwerte, da diese für die Auslegung des Umformprozesses am interessantesten sind. Zudem sind die Schwierigkeiten enorm groß, Zwischenzustände beim Schmieden exakt zu fixieren, ohne Simulationswerkzeuge zur Verfügung zu haben.

Zur Auswahl eines geeigneten Umformaggregates ist die Kenntnis der zur Herstellung des Schmiedeteils benötigten Umformkraft bzw. Umformarbeit erforderlich. Da der in dieser Arbeit beschriebene Ansatz zur Simulation des Werkstoffflusses keine Informationen hierüber liefert, sind andere Verfahren zu deren Ermittlung notwendig.

Um die Abschätzung der Umformkraft mit Hilfe von PRINZ unter Beibehaltung der Anforderungen an die zu entwickelnden Algorithmen möglich zu machen, wurden eine Reihe von theoretischen, empirischen und halbempirischen Berechnungsverfahren implementiert. Den theoretischen Methoden liegt die Plastizitätstheorie zu Grunde, während bei den empirischen Verfahren Richtwerte für Umformkräfte beim

Formpressen mit Grat allein auf Grund von Kraftmessungen gewonnen wurden. Die halbempirischen Berechnungsverfahren wurden zwar mit Hilfe der Plastizitätstheorie hergeleitet, berücksichtigen aber entweder schon in den Ansätzen oder durch Korrekturglieder in den Gleichungen das Formpressen mit Grat von Stahl bei Warmumformtemperaturen /69/.

Der Grund für die Implementierung mehrerer Verfahren liegt in den Schwierigkeiten, die die einzelnen Verfahren haben, mit hoher Genauigkeit die Maximalkraft oder gar den Kraft-Weg-Verlauf zu berechnen. Da es sich beim Gesenkschmieden um einen hochgradig nichtlinearen Prozess handelt, haben alle bekannten empirischen und elementaren Verfahren ihre Grenzen bei der Berücksichtigung realer Prozessbedingungen, so dass sich schnell große Fehler einstellen.

Die in PRINZ implementierten Verfahren sind:

**für Langteile:**

- Kraftberechnung nach dem Prinzip der oberen Schranke unter Nutzung des TRESCA'schen Fließkriteriums,
- Kraftberechnung nach dem Prinzip der oberen Schranke unter Nutzung des VON MISES'schen Fließkriteriums,
- Berechnung der Umformkraft als untere Schranke,
- Berechnung der Umformkraft mit Hilfe modifizierter Gleichungen für das Stauchen nach SIEBEL,

**für rotationssymmetrische Teile:**

- Ermittlung der Umformkraft auf der Basis des Röhrenmodells der elementaren Plastizitätstheorie.

Alle Verfahren zeigen mehr oder weniger große Abweichungen von den für den Vergleich mit Realdaten herangezogenen Referenzdaten. Sehr häufig ist allerdings auch im Realversuch die Feststellung der genauen Umformkraft mit großen Fehlern verbunden. Bei der Produktion von Schmiedeteilen wird fast immer vollständig auf das Messen der Kraft verzichtet, so dass in diesem Falle nur über die Belastung der Maschinen ermittelte, abgeschätzte Werte zur Verfügung stehen.

## 4.7.1 Problemstellung: Rotationssymmetrie

In früheren Arbeiten wurde ein Berechnungsmodul zur Ermittlung von Umformkraft und Umformarbeit rotationssymmetrischer und ebener Prozesse entworfen, das auf den Arbeiten von MARQUARDT /60/ basiert /21, 22/. Eingesetzt wurden das Röhren- und das Streifenmodell der Elementaren Plastizitätstheorie. Die zur Herstellung beliebig geformter Schmiedestücke notwendigen Kräfte sind mit diesen Modellen nicht ganzheitlich berechenbar.

Das Ergebnis stellt einen Näherungswert dar, da die Modelle der Elementaren Plastizitätstheorie streng genommen nur zwischen annähernd parallelen Stauchbahnen gültig sind und dieser einfache Sonderfall in der Praxis nur selten auftritt. Die Berechnungsergebnisse sind jedoch als Auswahlkriterium für das zu verwendende Umformaggregat hinreichend genau.

Die geometrische Datenbasis für die Berechnung der auftretenden Spannungen, Kräfte und Umformarbeiten in rotationssymmetrischen und ebenen Bereichen der Umformung liefert eine zuvor durchgeführte Simulation des Werkstoffflusses, da das Berechnungsmodul als eigenständiges Programm konzipiert wurde. Dafür werden die während des Simulationslaufes gespeicherten Schnittkurvendaten des rotationssymmetrischen Werkzeuges und Werkstückes herangezogen. Für jeden durchgeführten

Simulationsschritt wird die durch Konturkurven beschriebene Werkstückgeometrie mit Röhrenelementen gefüllt und eine Kraftberechnung mittels Röhrenmodell durchgeführt. Die über dem Umformweg aufgetragenen Kräfte stellen den Kraft-Weg-Verlauf dar, wie er in Bild 54 zu sehen ist. Durch Integration der berechneten Kräfte über dem Umformweg wird die erforderliche Umformarbeit berechnet.

## 4.7.2 Problemstellung: Langteile

Langteile lassen eine geschlossene Lösung nach der elementaren Plastizitätstheorie nicht zu. Die Aufteilung in Elemente, die eine solche Berechnung erlauben, ist kaum möglich. Auch empirische Ansätze sind in den meisten Fällen nicht anwendbar, da wichtige Informationen wie Projektionsflächen oder die mittlere Drucknormalspannung über der Projektionsfläche nicht oder nur teilweise zur Verfügung stehen.

Durch PRINZ kann die Berechnung der Umformkraft auf der Basis empirischer und halbempirischer Methoden erfolgen. Alle wichtigen Informationen des Umformprozesses wie Projektionsflächen, Drucknormalspannungen, Gratspaltdicke und -breite stehen in jeder Phase direkt oder nach zusätzlichen Berechnungen zur Verfügung. Neue Ansätze können überprüft werden, da geometrische Informationen in jeder Phase der Berechnung abgefragt werden können.

Im weiteren werden die vier in PRINZ implementierten Ansätze zur Umformkraftberechnung beschrieben. Die Ergebnisse aller Ansätze werden miteinander verglichen, um dann eine realistische Kraftabschätzung durchführen zu können.

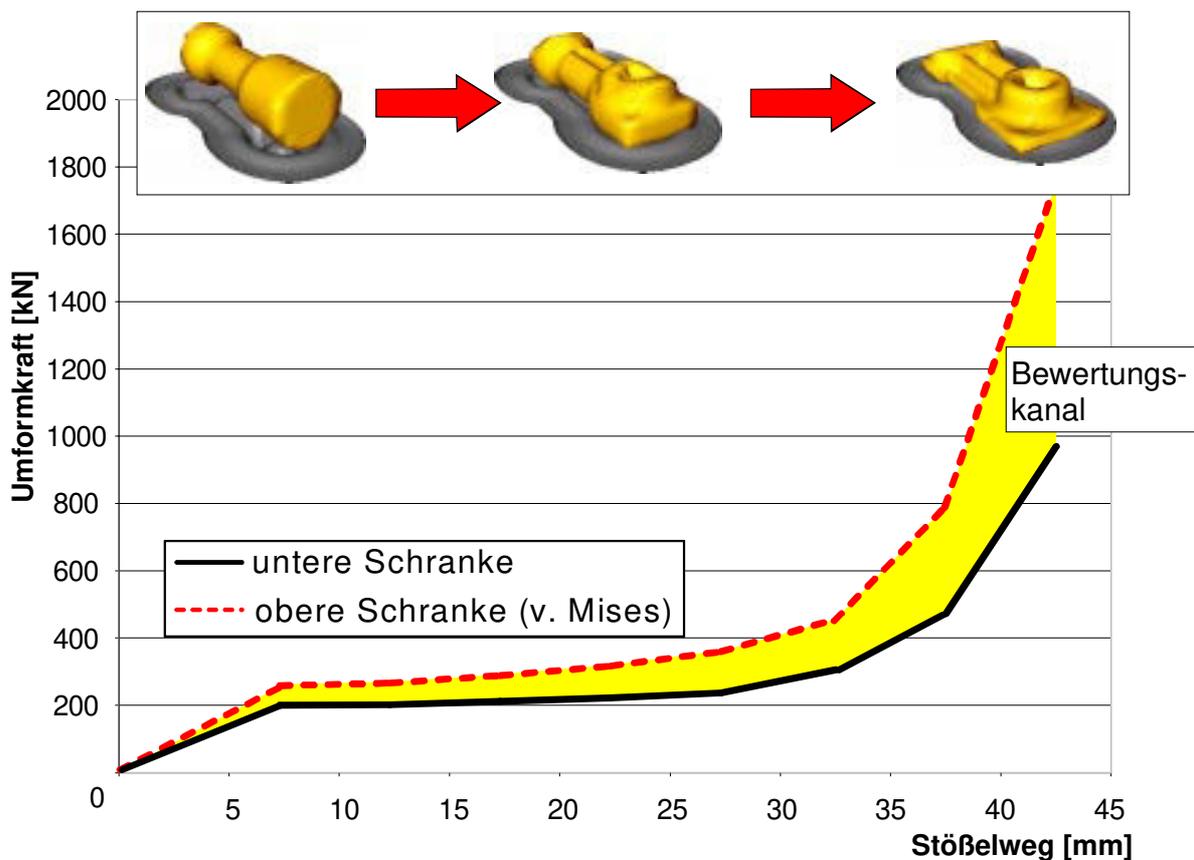


Bild 56: Bewertung durch die implementierten unteren und oberen Schranken.

Neben der PRINZ-Umformkraft werden eine untere und zwei obere Schranken ermittelt, um in einem Bewertungskanal die Qualität der berechneten Umformkraft zu kontrollieren (Bild 56). Zur Bestimmung

der oberen Schranke wird ein Verfahren unter Nutzung der Fließkriterien nach v. MISES und TRESCA genutzt.

#### 4.7.2.1 Berechnung der unteren Schranke

Zur Berechnung der maximalen Umformkraft lautet nach /37/ die einfachste empirische Beziehung:

$$F_{\max} = A_p k_{w1} \quad (\text{Gl. 8})$$

mit:

|            |   |
|------------|---|
| $F_{\max}$ | Maximale Umformkraft  |
| $A_p$      | Projektionsfläche des Werkstückes am Ende der Umformung (einschließlich Grat) |
| $k_{w1}$   | Umformwiderstand am Ende des Vorgangs   |

Der Wert von  $k_{w1}$  beträgt ein Vielfaches der Fließspannung zu Beginn des Umformprozesses  $k_{f0}$ . Er lässt sich für bestimmte Werkstückformen und Maschinen nur unter Schwierigkeiten ermitteln. In /69/ wurde gezeigt, dass der Umformwiderstand, der die mittlere Normalspannung  $\sigma_{zm}$ , über Gravur und Gratfläche gemittelt, repräsentiert, bei der Nutzung von Kurbelpressen in gewisser Weise mit der mittleren Höhe und der Feingliedrigkeit des Werkstückes korreliert (Bild 57).

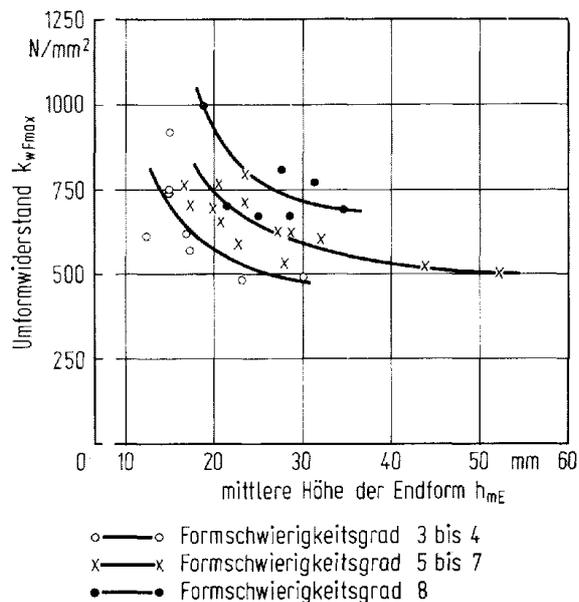


Bild 57: Abhängigkeit des Umformwiderstandes  $k_{w1}$  von der mittleren Höhe der Schmiedeteilendform für unlegierte und niedriglegierte Stähle bei Temperaturen von 930 bis 1030°C nach /69/.

Bei derartigen empirischen Methoden bereitet das Aufbereiten der für die Berechnung notwendigen Eingangsdaten die größten Schwierigkeiten. Die mittlere Höhe, definiert aus einem Quotienten von Masse, Projektionsfläche und Dichte, ist ebenso wenig eine exakte Größe zur Bewertung des Umformvorganges wie die Feingliedrigkeit  $S$  als Quotient aus der Masse des Schmiedestückes und der Masse des mit dessen größten Maßen gebildeten Hüllkörpers. Annähernd richtige Maximalkräfte sind bei Anwendung eines solchen Verfahrens nur für bekannte Schmiedeprozesse zu erwarten, bei denen die Einschätzung von  $k_{w1}$  durch Erfahrung verbessert wird.

In Anlehnung an Gleichung 8 wird die untere Schranke für PRINZ berechnet. Dabei wird die folgende Berechnungsvorschrift zur Berechnung von  $F_{uS}$  verwendet:

$$F_{uS} = 2 A_p k_f \quad (\text{Gl. 9})$$

Die Umformkraft der unteren Schranke des Bewertungskanals ergibt sich somit aus dem Produkt des zweifachen der Projektionsfläche des Schmiedeteiles und der Fließspannung des Werkstoffes. Durch die zweifache Projektionsfläche kann die Wirkzone als Scheibe angesehen werden, die sowohl durch die obere als auch die untere Seite Umformenergie aufnimmt und die beim Durchlaufen des Umformweges mindestens die Kraft  $F_{uS}$  notwendig macht. Die Fließspannung kann über den Prozess der Warmumformung hinweg als konstant angesehen werden.

Die Betrachtung mit Hilfe dieser Methode lässt zum Ende der Umformung hin einen wachsenden Fehler erwarten. Entsprechende Untersuchungen zeigten, dass am Ende einer Umformung Umformwiderstände, die ein Mehrfaches der Fließspannung  $k_f$  betragen, zu erwarten sind (Bild 57) /69/. In Kenntnis dieses Sachverhaltes ist es zulässig, die erhaltenen Werte  $F_{uS}$  als untere Schranke für den weiteren Verlauf der Berechnung anzunehmen.

#### 4.7.2.2 Berechnung der oberen Schranke

Die obere Schranke für den zu bestimmenden Bewertungskanal wird auf der Basis des Prinzips der oberen Schranke durchgeführt /2, 71/. Es wird davon ausgegangen, dass die Stoffbewegung in einer „Scheibe“ von der Grattendicke  $s$  stattfindet. Zwischen dieser Scheibe und dem restlichen, starren Werkstoff herrscht Haftreibung, während im Gratspalt Gleiten angenommen wird. Es ergeben sich somit die drei Anteile Umformleistung, Scherleistung und Reibleistung (Bild 58). Für die Berechnungen nach dieser Methode ist die Gravurform von untergeordnetem Interesse.

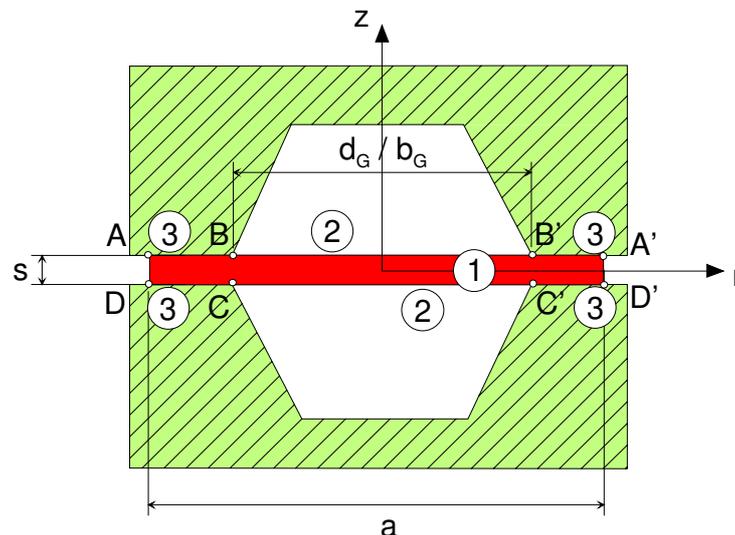


Bild 58: Angenommener Gravurquerschnitt für die Kraftberechnung nach dem Verfahren der oberen Schranke nach /37/. ① Umformleistung, ② Scherleistung, ③ Reibleistung.

Für die Ermittlung der Umformkraft bietet sich die Nutzung des PRINZ-internen, auf Segmenten basierenden Datenformates an. Die verwendeten Segmente lassen sich unterscheiden durch ihre Grundform, die entweder lange Objekte oder Teile von rotationssymmetrischen Objekten darstellen. Dementsprechend lässt sich eine Aufteilung in *ebene* und *Kreis-sektor*-Segmente vornehmen (Bild 59).

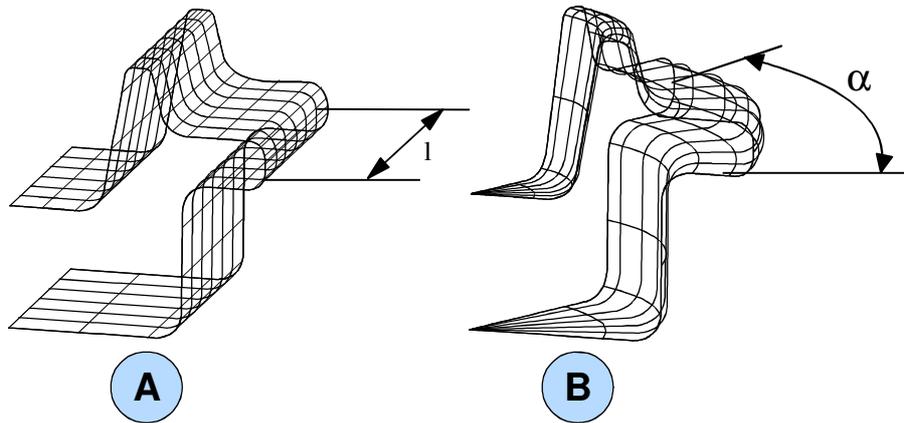


Bild 59: Einteilung in ebene und rotationssymmetrische Segmente zur Berechnung der größten Umformkraft. A ... ebenes Segment; B ... Kreissektor-Segment

Für den ebenen Formänderungszustand ergibt sich bei  $l \gg b_G$  nach /72/ unter Verwendung des v. MISES'schen Fließkriteriums für die obere Schranke:

$$F_{\max} = k_{f1} l \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} a + \frac{b_G^2}{2\sqrt{3}s} + \frac{\mu}{2s} (a^2 - b_G^2) \right] \quad (\text{Gl. 10})$$

mit:

|       |  |
|-------|--|
| $l$   | Länge eines Segmentes, vgl. Bild 59                        |
| $b_G$ | Breite der Gravur (ohne Grat), vgl. Bild 58                |
| $a$   | Breite des Werkstückes (einschließlich Grat), vgl. Bild 58 |
| $s$   | Gratdicke, vgl. Bild 58                                    |

Die Gleichung lässt sich für die Anforderungen in PRINZ abwandeln, indem für die Fließspannung am Ende der Umformung  $k_{f1}$  die momentane Fließspannung  $k_f$  gesetzt und die Breite an die interne Segmentform angepasst wird. Die berechneten Maximalkräfte der ebenen Segmente lassen sich aufsummieren:

$$F_{oSMe} = \sum_{i=1}^{n_e} \left\{ k_f l_i \left[ \frac{a_i}{\sqrt{3}} + \frac{b_{Gi}^2}{8\sqrt{3}s_i} + \frac{\mu}{8s_i} (a_i^2 - b_{Gi}^2) \right] \right\} \quad (\text{Gl. 11})$$

Bei Verwendung des TRESCAschen Fließkriteriums ergibt sich nach den notwendigen Anpassungen analog:

$$F_{oSTe} = \sum_{i=1}^{n_e} \left\{ k_f l_i \left[ \frac{a_i}{2} + \frac{b_{Gi}^2}{16s_i} + \frac{\mu}{8s_i} (a_i^2 - b_{Gi}^2) \right] \right\} \quad (\text{Gl. 12})$$

Rotationssymmetrische Verhältnisse in der Umformzone führen bei Berechnung der Maximalkraft unter Nutzung des VON MISES'schen Fließkriteriums ebenfalls nach /72/ zur folgenden Gleichung:

$$F_{\max} = k_{f1} \pi \left[ \frac{1}{4} a^2 + \frac{d_G^3}{12\sqrt{3}s} + \frac{2\mu}{3} \left( \frac{a^3 - d_G^3}{8s} \right) \right] \quad (\text{Gl. 13})$$

mit:

- $\alpha$             Bogen des Kreissektors, vgl. Bild 59
- $d_G$             Durchmesser der Gravur (ohne Grat), vgl. Bild 58
- $a$               Durchmesser des Werkstückes (einschließlich Grat), vgl. Bild 58

Bei Nutzung dieses Ansatzes muss Berücksichtigung finden, dass es sich innerhalb des Simulationssystems nicht um voll-rotationssymmetrische Segmente sondern um Kreissektor-Segmente handelt. Der in /72/ beschriebene Ansatz berücksichtigt bei den Anteilen Umformen, Scheren und Reiben voll-rotationssymmetrische Werkstücke, also kreis- bzw. ringförmige Einflußzonen, so dass sich die Gleichung nach der für die PRINZ-Segmente notwendigen Anpassung und der Aufaddierung der Kraftwerte in dieser Form liest:

$$F_{oSMr} = \sum_{i=1}^{n_r} k_f \alpha_i \left[ \frac{1}{8} a_i^2 + \frac{d_{Gi}^3}{24\sqrt{3}s_i} + \frac{\mu}{24} \left( \frac{a_i^3 - d_{Gi}^3}{s_i} \right) \right] \quad (\text{Gl. 14})$$

Unter Nutzung des Fließkriteriums nach TRESCA nach Durchführung der PRINZ-spezifischen Anpassungen erhält man die Gleichung:

$$F_{oSTr} = \sum_{i=1}^{n_r} k_f \alpha_i \left[ \frac{a_i^2}{8} + \frac{d_{Gi}^3}{48s_i} + \frac{\mu(a_i^3 - d_{Gi}^3)}{24s_i} \right] \quad (\text{Gl. 15})$$

Die Maximalkräfte der ergeben sich zu:

$$F_{oSM} = F_{oSMe} + F_{oSMr} \quad (\text{Gl. 16})$$

bzw. zu:

$$F_{oST} = F_{oSTe} + F_{oSTr} \quad (\text{Gl. 17})$$

Die Gratbahndicke  $s$ , die Gravurbreite  $b_G$  sowie der Abstand zwischen den Gratbahnaußenkanten  $a$  wird den geometrischen Zuständen der Werkzeuge während des Simulationslaufes entnommen und muss nicht durch empirische Gleichungen berechnet werden. Die Reibzahl  $\mu$  wird durch den Benutzer vor Durchführung des Simulationslaufes bestimmt. Sie wird für Stahlpaarungen unter Berücksichtigung der Schmierung in den meisten Fällen zwischen  $0.2 < \mu < 0.25$  und darüber liegen /37/.

Berechnungen der Umformkraft mit dieser Methode erlauben die Aufnahme eines Kraft-Weg-Verlaufes, der sich immer oberhalb der realen Kraftmaxima befindet. Damit ist die Anforderung zur Schaffung einer Berechnungsmethode zur Bestimmung einer oberen Schranke erfüllt. Das Verfahren lässt sich nicht nutzen für die Berechnung der Umformkraft in geschlossenen Gesenken ohne Grat. Unendlich kleine Gratbahndicken am Ende der Umformung führen zu unendlich großen Kraftmaxima, was theoretisch den Gegebenheiten entspricht, aber in der Praxis nicht erreicht wird.

Beide Verfahren der Berechnung der Maximalkraft mit Hilfe des Prinzips der oberen Schranke unter Verwendung der Fließkriterien von v. MISES bzw. von TRESCA liefern in unterschiedlichen Umformzuständen abweichende Werte, die sich aus den Abweichungen der Hypothesen, der Gestaltänderungs-Energiehypothese nach v. MISES /11/ und der Schubspannungshypothese nach TRESCA /74/ ergeben. Hier können sich Abweichungen von bis zu 15% einstellen, die sich auch in den ermittelten Kraftmaxima niederschlagen.

Voraussetzung für die Anwendung dieser Berechnungsmethode ist die Verwendung eines im Verlaufe der Berechnung konstanten Wertes für die Gratbahndicke  $s$ , die sich aber vor Beginn des Simulationslaufes durch ein internes Zusammenfahren der Werkzeuge ermitteln lässt. Die Gratbahndicke  $s$  wird in der Praxis in starkem Maße zur Steuerung des Werkstoffflusses beim Gesenkschmieden genutzt. Aus diesem Grund sind, über den Umfang der Hohlform verteilt, unterschiedliche Gratbahndicken möglich und sinnvoll. Indem vor Beginn des Simulationslaufes die Gratbahndicke jedes Segmentes ermittelt wird, werden veränderliche Gratbahndicken der gesamten Werkzeuge vollständig erfasst und im Modell abgebildet.

### 4.7.2.3 PRINZ - Kraftberechnung

Grundlage für die Berechnung der Umformkraft sind Gleichungen nach SIEBEL für den Stauchvorgang von runden und rechteckigen Stauchproben /15, 76/. Modifikationen, die die Berechnungsgenauigkeit erhöhen, wurden möglich, da während der Berechnung des Werkstoffflusses, wie auch schon in *Kapitel 4.5* beschrieben, weitere geometrische Informationen zur Verfügung stehen bzw. berechnet werden können. Bei diesen Informationen handelt es sich vor allem um die Oberfläche und Volumina von Werkstück und Werkzeugen sowie Segmenten.

Nach SIEBEL /15/ kann wie in Bild 60 abgebildet die Umformkraft für den Stauchvorgang rechteckiger und runder Stauchproben mit Reibung berechnet werden durch

$$F_{Siebel} = \int_A \sigma_Z dA . \quad (\text{Gl. 18})$$

Bei Nutzung des Fließkriteriums nach TRESCA gilt nach Reihenentwicklung für rechteckige Stauchflächen:

$$\sigma_Z = -k_f \left[ 1 + 2\mu \left( \frac{x}{h} \right) \right] \quad (\text{Gl. 19})$$

und

$$F_{Siebel,R} = -A k_f \left[ 1 + \frac{b_m}{2h} \mu \right]. \quad (\text{Gl. 20})$$

Analog gilt für kreisförmige Stauchflächen:

$$F_{\text{Siebel,K}} = -A k_f \left[ 1 + \frac{d}{3h} \mu \right]. \quad (\text{Gl. 21})$$

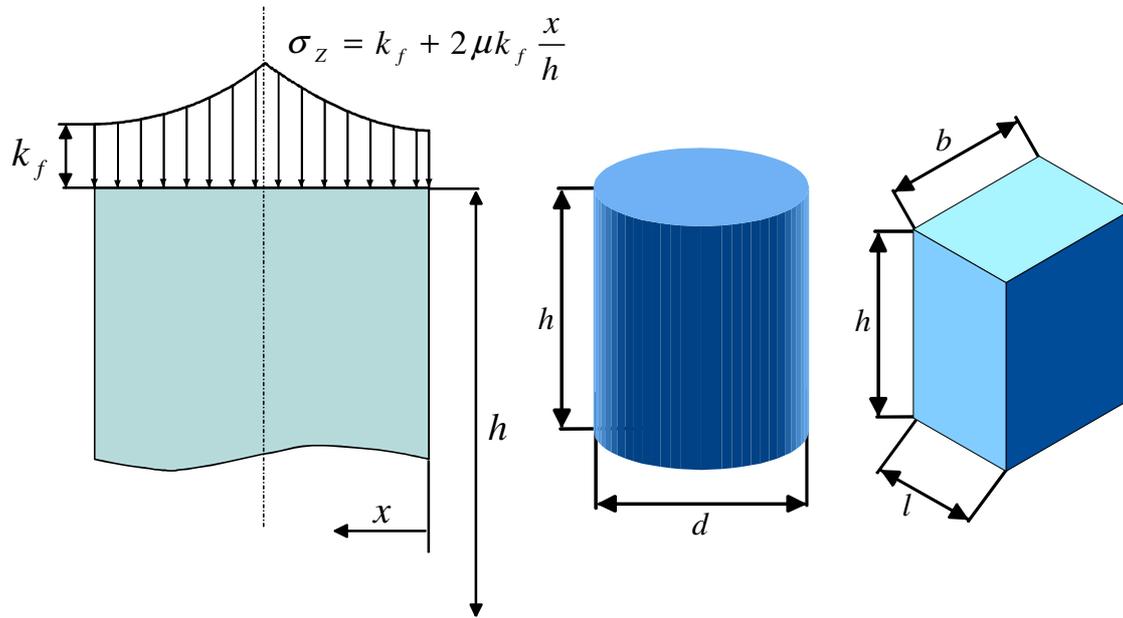


Bild 60: Berechnung der Normalspannung auf der Stirnfläche eines Zylinders bzw. eines Quaders beim Stauchvorgang mit konstanter Reibung bei großem Durchmesser-Höhen-Verhältnis /15/<sup>1</sup>.

Das Berechnungsverfahren ist mit einigen Modifikationen auch für die Anwendung in PRINZ geeignet. Die notwendigen Modifikationen sind:

1. Für Kreissegmente muss die Integration statt über eine vollständige Kreisfläche über eine Kreissektorfläche erfolgen.
2. Das Durchmesser-Höhe-Verhältnis muss von einer allgemein geformten Kontur auf die ideale Form eines rechteckigen oder kreisförmigen Ersatzstauchkörpers projiziert werden (vgl. Bild 61 und Bild 62).
3. Statt einer Stirnfläche (siehe Bild 61 bzw. Bild 62), wie in den Gleichungen von SIEBEL vorgesehen, wird für die Anwendung beim Gesenkschmieden die gesamte, meist etwas größere Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und den Werkzeugen genutzt, da mit Hilfe von Gleichung 18 häufig zu geringe Werte ermittelt werden /77/. Die Werkstückflächen, die im Kontakt zum Werkzeug stehen, haben einen großen Einfluss auf die Umformkraft, denn über sie werden die aufgebrachten Kräfte von der Maschine über das Werkzeug in das Werkstück übertragen, was zur Umformung des Schmiedestückes führt.
4. Auf Grund häufig die Fließspannung übersteigenden Normalspannungen und des damit verbundenen starken hyperbolischen Abfalls der Reibzahl  $\mu$  wird das Reibfaktormodell mit  $0 \leq m \leq 1$  verwendet.

<sup>1</sup> Es sind weitere Normalspannungsverteilungen bekannt, insbesondere bei kleinen Durchmesser-Höhe-Verhältnissen /78, 79/. Für die hier vorgestellte Berechnungsmethode hat sich die dargestellte Verteilung als am geeignetsten erwiesen.

Bei Kreissegmenten (Bild 61) ergibt sich nunmehr:

$$F_{\text{Siebel},K} = 2\alpha \int_0^{d/2} r \sigma_z dr \quad (\text{Gl. 22})$$

und

$$F_{\text{Siebel},K} = -\alpha r^2 k_f \left[ 1 + \frac{d}{3h} m \right]. \quad (\text{Gl. 23})$$

Die Gleichung für die Berechnung von Rechtecksegmenten verändert sich damit zu:

$$F_{\text{Siebel},R} = -2A k_f \left[ 1 + \frac{b}{2h} m \right]. \quad (\text{Gl. 24})$$

Zur der Ermittlung des geeigneten Durchmesser-Höhen-Verhältnisses wurde davon ausgegangen, dass der Ersatzstauchkörper sowohl das bekannte Volumen wie auch die bekannte Schmiedeteiloberfläche des realen Segmentes behält.

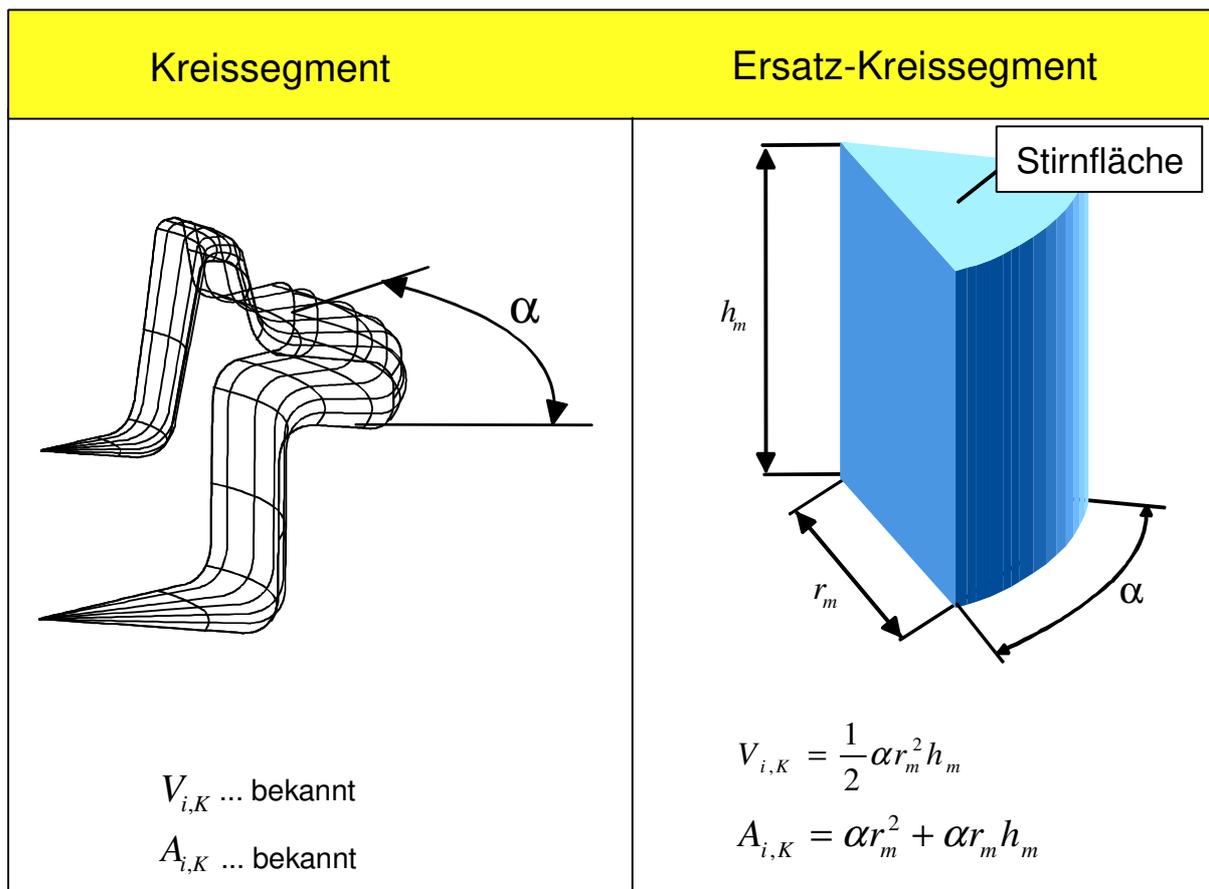


Bild 61: Überführung des beliebig geformten Kreissegments in ein Ersatz-Kreissegment zur Berechnung der Umformkraft nach SIEBEL

Für ein Kreissegment ergibt sich zur Berechnung von Durchmesser und Höhe bei Ansatz der Volumen- und Oberflächengleichungen für ein Segment i

$$V_i = \frac{1}{2} \alpha r^2 h \quad \text{und} \quad (\text{Gl. 25})$$

$$A_i = \alpha r^2 + \alpha r h \quad (\text{Gl. 26})$$

eine kubische Gleichung

$$0 = \alpha r^3 - A_i r + 2V_i, \quad (\text{Gl. 27})$$

die 3 reelle Lösungen hat. Die Lösungen werden auf Plausibilität geprüft, wobei die Höhe des Segmentes entsprechend des bereits im Verlaufe der Simulation durchlaufenen Weges langsam verkleinern muss. Damit werden zwei Lösungen ausgeschlossen.

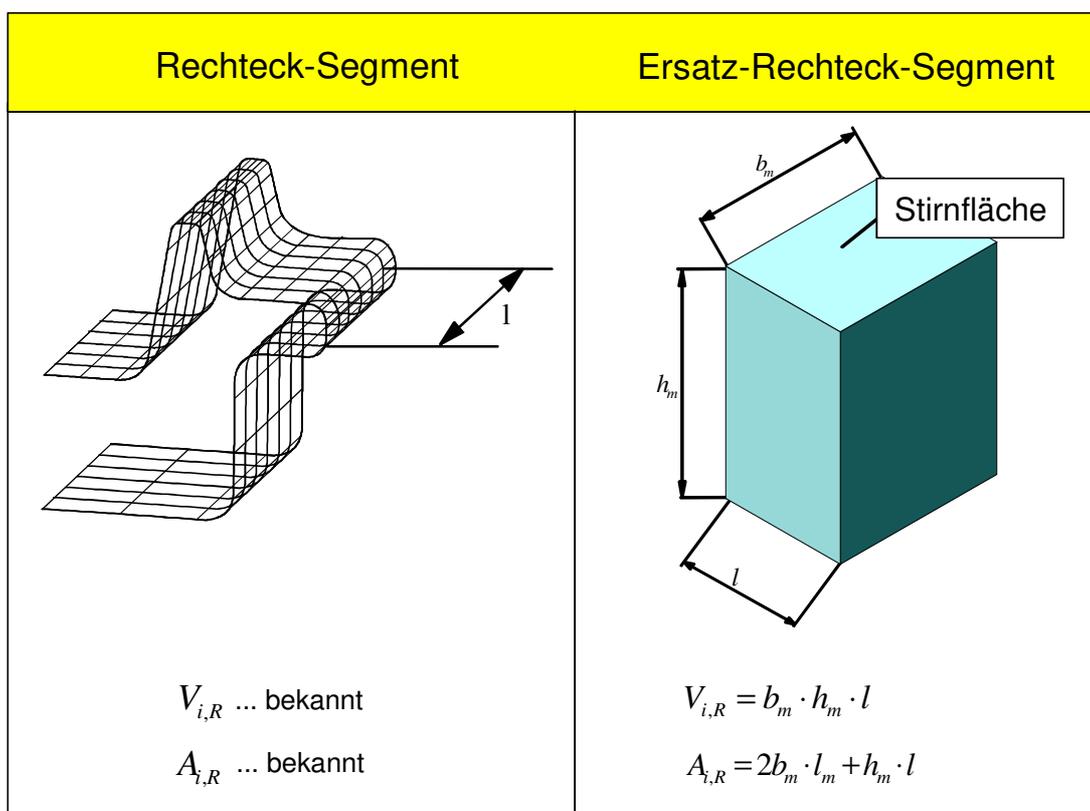


Bild 62: Überführung eines Rechtecksegmentes in das zugehörige Ersatz-Rechtecksegment bei Beibehaltung des Volumens und der Oberfläche

Rechtecksegmente (Bild 62) ergeben zur Berechnung des Höhe-Breite-Verhältnisses bei Ansatz der Volumen- und Oberflächengleichungen quadratische Gleichungen, die sich leichter lösen lassen. Die beiden Lösungen der Gleichung

$$0 = h^2 - Ah + 2V \quad (\text{Gl. 28})$$

werden ähnlich dem Vorgehen bei Kreissegmenten auf Plausibilität überprüft und eine Lösung ausgewählt.

Mit Hilfe der Ersatzstauchkörper lassen sich nun die notwendigen Umformkräfte für die einzelnen Segmente in jedem Umformschritt bestimmen. Durch die notwendige Überprüfung der Plausibilität der

berechneten Höhenwerte für die Ersatzsegmente muss die Berechnung beim Durchlaufen jedes Weginkrements der Werkstoffflußsimulation ausgeführt werden.

Die Kraftberechnung nach diesem Verfahren erfolgt in jedem Segment; am Ende der Berechnung werden die Kraftanteile jedes Segmentes aufsummiert:

$$|F_P| = \sum_{i=1}^n A_{Koi} k_f \left( \frac{1}{2} + \frac{d_m}{6h_m} m \right) + \sum_{i=1}^o A_{Koi} k_f \left( 2 + \frac{b_m}{h_m} m \right) \quad (\text{Gl. 29})$$

mit:

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| $F_P$     | PRINZ-Umformkraft                     |
| $A_{Koi}$ | Kontaktfläche des Segmentes i         |
| $d_m$     | Durchmesser des Ersatz-Kreissegmentes |
| $b_m$     | Breite des Ersatz-Rechtecksegmentes   |
| $h_m$     | Höhe des Ersatzsegmentes              |
| $n$       | Anzahl der Kreissegmente im Modell    |
| $o$       | Anzahl der Rechtecksegmente im Modell |

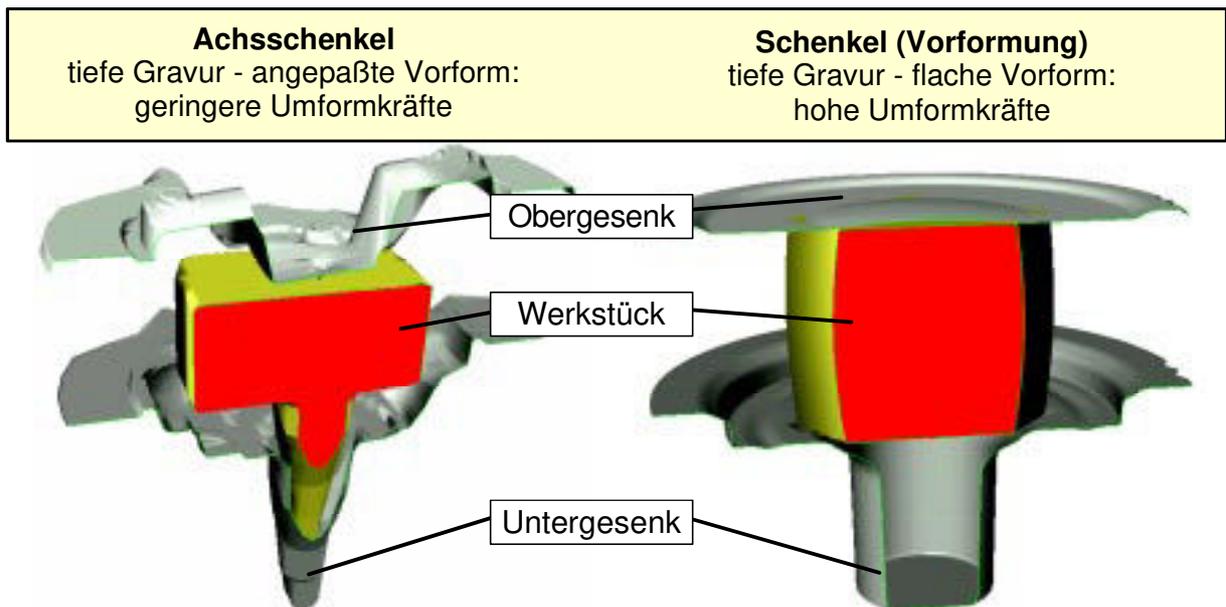


Bild 63: Einfluss der Ausprägung von Formelementen auf die Umformkraft

Die durchgeführten Berechnungen mit Gleichung 29 zeigten, dass sie mit hoher Genauigkeit auf Problemstellungen, bei denen die Höhe des Werkstückes die Tiefe der Gravur weitestgehend entspricht (Bild 63 – Achsschenkel), anwendbar ist. Das trifft in aller Regel auf Langteile und gut vorgeformte Werkstücke in tiefen Gravuren zu. Flache Werkstücke in tiefen Gravuren (z.B. Bild 63 – Schenkel) benötigen zur Ausprägung der Geometrie höhere Kräfte, als sie von Gleichung 29 wiedergegeben werden. Gleichung 29 wurde deshalb zur Berücksichtigung dieser Verhältnisse auf folgende Weise modifiziert:

$$|F_P| = \left( \sum_{i=1}^n A_{Koi} k_f \left( \frac{1}{2} + \frac{d_m}{6h_m} m \right) + \sum_{i=1}^o A_{Koi} k_f \left( 2 + \frac{b_m}{h_m} m \right) \right) \cdot \left( 1 + 0.15 \frac{t_{WZ}}{h_{WS}} \right) \quad (\text{Gl. 30})$$

mit:

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| $t_{WZ}$ | Tiefe der Werkzeuggravur   |
| $h_{WS}$ | Gesamthöhe des Werkstückes |

Ungünstige Verhältnisse von Werkzeugtiefe und Werkstückhöhe, wie in Bild 63 bei der Vorformung eines Schenkels gezeigt, erhöhen die berechnete Umformkraft und finden in Gleichung 30 ihre Berücksichtigung.

Dieses einfache und schnelle Berechnungsverfahren für die Umformkraft hat folgende Vorteile:

- die berechneten Werte stimmen am besten mit den für die Arbeit zur Verfügung stehenden Referenzwerten überein,
- es lassen sich über den gesamten Berechnungsverlauf Kraftwerte berechnen, die sich in einem Kraft-Weg-Verlauf darstellen lassen (Bild 64),
- die Berechnungsmethode lässt sich innerhalb von PRINZ sowohl für Präzisionsschmiede- wie auch für konventionelle Schmiedevorgänge einsetzen, da keine speziellen geometrischen Elemente wie Gratdicke oder –breite explizit Eingang in die Gleichung fanden.

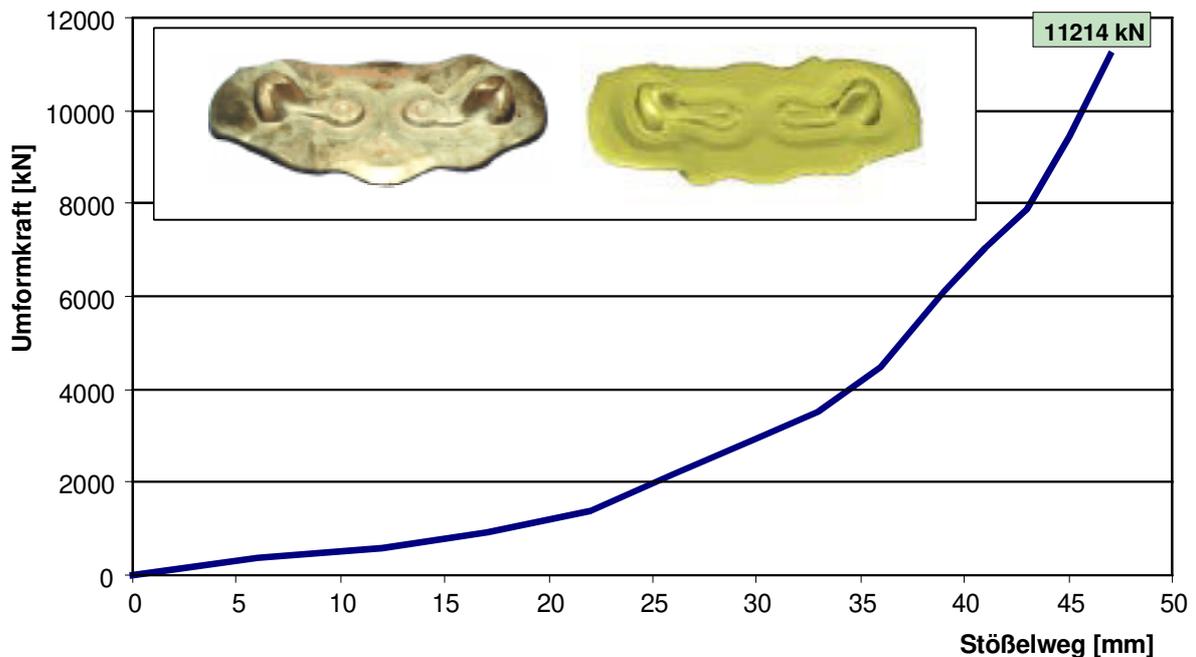


Bild 64: Berechneter Kraft-Weg-Verlauf eines Traggelenk-Doppelstückes der DaimlerChrysler AG mit PRINZ

Es handelt sich um eine für überschlägige Berechnungen geeignete Formel, die Anhaltswerte über die Dimensionierung des Realprozesses gibt. Die Formel lässt sich nicht außerhalb von PRINZ für Umformvorgänge mit Grat anwenden, da die im Kontakt befindliche Oberfläche des Grates sich nicht vom CAD-System berechnen lässt und die Ersatzkörper sich nur bei Kenntnis von Volumen und Oberfläche der Segmente ermitteln lassen.

### 4.7.3 Ergebnisse

In Bild 64 ist der Kraft-Weg-Verlauf eines Tragelenk-Doppelstückes, berechnet nach der PRINZ-Methode, dargestellt. Dieser Kraft-Weg-Verlauf wurde in Bild 65 zur Bewertung mit den Verläufen der gleichzeitig nach *Kapitel 4.7.2.1* und *4.7.2.2* berechneten oberen und unteren Schranken unterlegt.

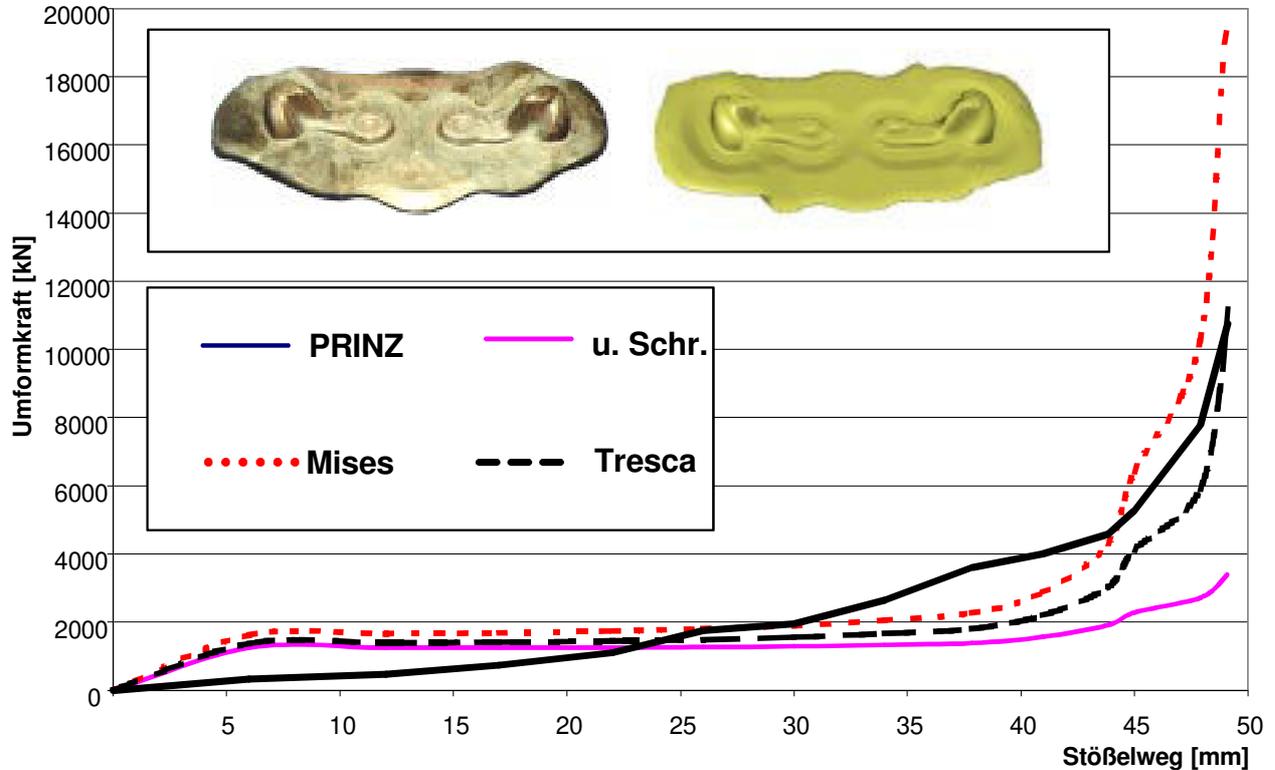


Bild 65: Umformkraft sowie obere Schranken (v. Mises und Tresca) und untere Schranke für ein Tragelenk-Doppelstück

Bild 65 zeigt, dass die in PRINZ implementierten Modelle für obere und untere Schranken der Umformkraft einen sehr gleichmäßigen Verlauf über den gesamten Umformweg haben. Nachdem sich im Bereich des Stößelweges von 0 bis ca. 23 mm die PRINZ-Umformkraft noch unterhalb von unterer und oberer Schranke bewegt, steigt die berechnete Kraft bei 23 mm Stößelweg sogar über die obere Schranke hinaus. Erst bei einem Stößelweg von 45 mm erhöhen sich die oberen Schranken, unterschieden nach den angewandten Fließkriterien von TRESCA und von v. MISES, so stark, dass sie am Ende der Umformung über der berechneten Umformkraft von 11214 kN liegen. Durch die enorm hohen, nach dem Prinzip der oberen Schranke und mit Hilfe des Fließkriteriums nach v. MISES berechneten Kräfte von bis zu 19340 kN, erscheint die berechnete Kurve ungewöhnlich flach. Hier sei auf Bild 64 verwiesen, dort ist der Kraft-Weg-Verlauf dieses Schmiedeprozesses ohne die den Maßstab verändernde Mises-Kurve dargestellt.

Die tatsächliche, in der Produktion gemessene Umformkraft für diesen Prozess liegt bei etwa 10.000 kN.

Die berechneten Endkräfte nach der PRINZ-Methode wurden mit Hilfe von Experimenten belegt. Dazu wurden sieben unterschiedliche Werkstücke herangezogen.

| Nr. | Bezeichnung                  | Bild  | Werkstoff | $k_f \text{ in } \frac{N}{\text{mm}^2}$ | $m$  | $\vartheta \text{ in } ^\circ\text{C}$ | Bemerkungen  |
|-----|------------------------------|---|-----------|---|------|--|--|
| 1   | Experimentalteil             |    | Ck 35     | 80                                      | 0.4  | 1180                                   | Schlagspindelpresse<br>2500 kN   |
| 2   | Gleichlaufgelenk             |    | Cf 53     | 150                                     | 0.4  | 1150                                   | Schlagspindelpresse;<br>geschmiedet im<br>geschlossenen Gesenk                                       |
| 3   | Gurtscheibe                  |    | 16 MnCr 5 | 100                                     | 0.3  | 1220                                   | Kurbelpresse;<br>Fertigschmieden;<br>wegen<br>Achsensymmetrie<br>erfolgte Berechnung<br>einer Hälfte |
| 4   | Achsschenkel                 |  | C 15      | 75                                      | 0.3  | 1200                                   | Kurbelpresse 40.000<br>kN; Ausgangsform<br>für Versuchszwecke<br>gefertigt.                          |
| 5   | Schenkel<br>(Vorformung)     |  | 50 CrMo 4 | 125                                     | 0.4  | 1250                                   | Kurbelpresse;<br>Vorschmieden  |
| 6   | Schenkel<br>(Fertigschmiede) |  | 50 CrMo 4 | 125                                     | 0.4  | 1110                                   | Kurbelpresse;<br>Fertigschmieden   |
| 7   | Traggelenk-<br>Doppelstück   |  | 16 MnCr 5 | 100                                     | 0.35 | 1130                                   | Kurbelpresse;<br>Fertigschmieden   |

Tabelle 5: Berechnungsbeispiele

Im nachfolgenden Bild 66 sind experimentell ermittelte Endkräfte der Umformung und die dazugehörigen Berechnungswerte gegenübergestellt.

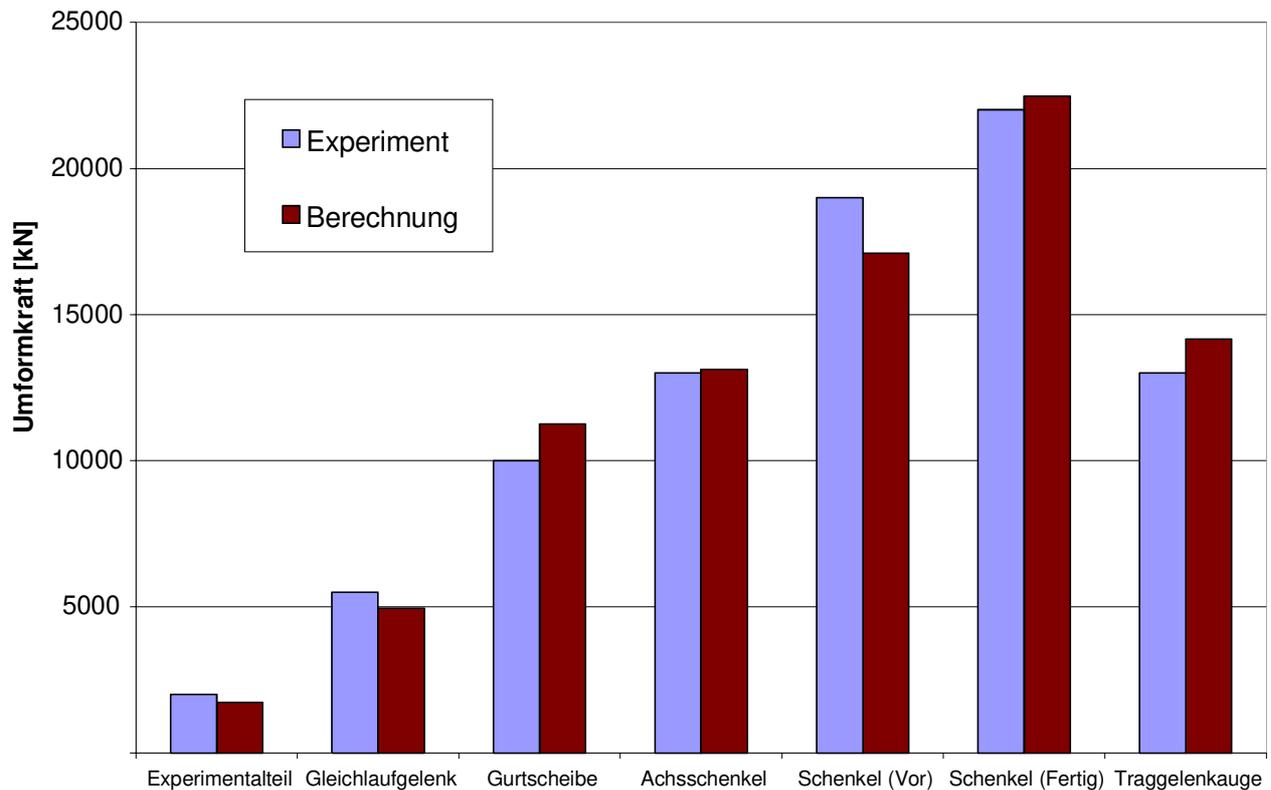


Bild 66: Vergleich berechneter und experimentell ermittelter Kraftwerte

Die Auswertung ergab, dass die Berechnung nach der neuen Methode zufriedenstellende Ergebnisse für flache Teile liefert. Die Genauigkeit nimmt aber etwas ab, sobald die Gravur tief wird, wie an den Beispielen Schenkel (Vorformen) und Gleichlaufgelenk zu erkennen ist. Eine hohe Genauigkeit der Berechnung ist auch für Kalibriervorgänge tiefer Werkstücke zu erwarten, so z.B. für den Schenkel beim Fertigformen und den Achsschenkel, dessen Vorform zu Experimentierzwecken angefertigt wurde (vgl. auch Bild 63 – linke Seite).

Für die genaue Berechnung der Umformkraft ist die möglichst korrekte Vorgabe des Reibfaktors und der Fließspannung wichtig. Die in [Tabelle 6](#) dokumentierten Berechnungen am Experimentalteil zeigen, dass Schwankungen in den Werten der Reibfaktoren bzw. der Fließspannung zu erheblichen Ausschlägen der berechneten Kraftwerte führen.

|  | Reibfaktor m | Fließspannung       | Endkraft in kN |
|---|--------------|---------------------|----------------|
|   |              | in $\frac{N}{mm^2}$ |                |
| Berechnung 1  | 0.4          | 80                  | 2726.60        |
| Berechnung 2  | 0.25         | 80                  | 2541.61        |
| Berechnung 3  | 0.4          | 120                 | 3589.90        |
| Berechnung 4  | 0.25         | 120                 | 3139.98        |

Tabelle 6: Vergleich der berechneten Endkräfte für ein Experimentalteil bei Vorgabe unterschiedlicher Reib- und Fließspannungswerte.

## 4.8 Visualisierung und Auswertung

Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurde das Programm PRINZ/DAT – Prinz Daten-Analysetool entwickelt. Folgende Vorgaben galt es zu erfüllen:

1. einfache Bedienbarkeit,
2. plastische Visualisierung des Fließgeschehens in 3D-Darstellung,
3. Weitergabe aller Berechnungsergebnisse an den Benutzer, ohne ihn mit internen Datenrepräsentationen zu konfrontieren,
4. kurze Antwortzeiten auf Benutzereingaben,
5. Visualisierung aller durch das Modul PRINZ/WSF3D neben dem reinen Werkstofffluss berechneter Ergebnisse,
6. Anwendung verschiedener Detaillierungsebenen,
7. Integration in das Gesamtsystem PRINZ,
8. weitestgehende Internetintegration der Auswertung,
9. STL-Exportfunktion zur Weitergabe der berechneten Geometrie.

In [Bild 67](#) ist die Benutzerschnittstelle PRINZ/DAT dargestellt. PRINZ/DAT kommt deshalb eine wichtige Funktion im Gesamtsystem PRINZ zu, da vom Benutzer über die Graphik, Benutzerführung, Funktionalität und die Antwortzeiten auf die Qualität aller Module von PRINZ geschlossen wird.

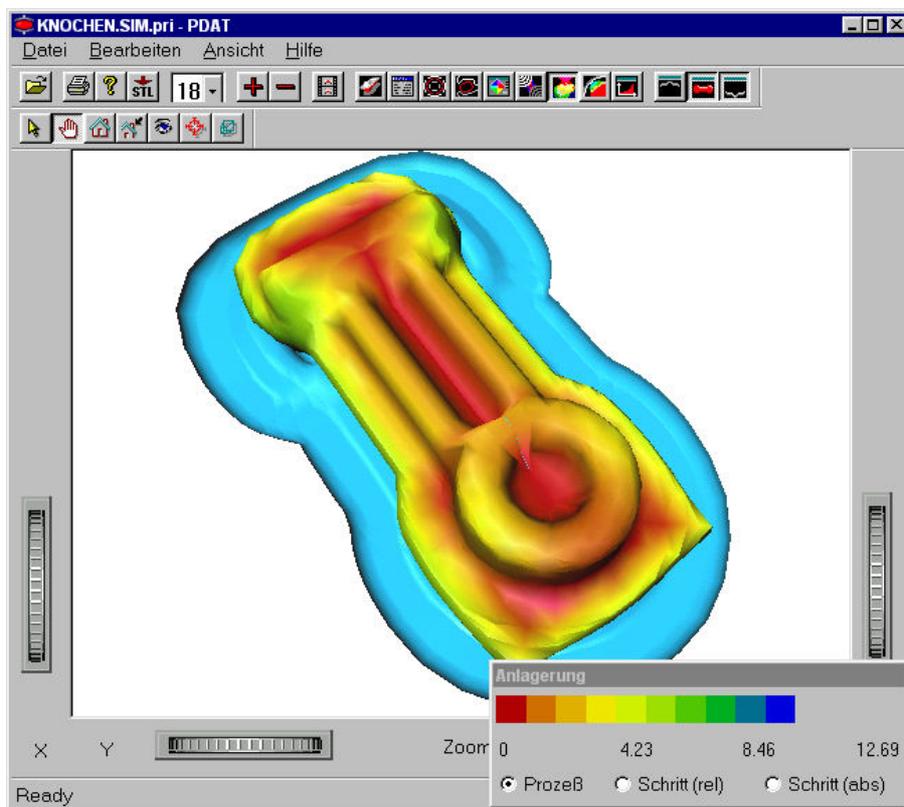


Bild 67: Benutzeroberfläche von PRINZ/DAT

Die Analysefunktionen von PRINZ/DAT sind über eine Funktionsleiste wählbar. Sie erlauben über die Beobachtung des Fließgeschehens im 3D-Fenster hinaus die Untersuchung des Kontaktverhaltens sowie

die Darstellung von Anlagerungs- und Verdrängungsverteilung. Anlagerung und Verdrängung werden in Bezug auf den gesamten Umformprozess bis zum aktuellen Berechnungsschritt sowie entweder absolut und relativ für den gegenwärtigen Berechnungsschritt berechnet.

Zur relativen schrittweisen Darstellung der Anlagerung bzw. der Verdrängung werden die Minima und Maxima des gesamten Prozesses für den Maßstab der Darstellung genutzt. Damit ist es möglich, starke bzw. schwache Werkstoffbewegungen im Umformschritt, verglichen mit dem Gesamtprozess, auszumachen. Die absolute schrittweise Darstellung der Anlagerung bzw. der Verdrängung im Umformschritt nutzt dagegen die Spitzen des gegenwärtigen Umformschrittes. Damit lassen sich die Fließgrade in den einzelnen Bereichen des Werkstückes unterscheiden.



Bild 68: Analysefunktionen von PRINZ/DAT

Bild 68 zeigt die Analysefunktionen von PRINZ/DAT. Neben diesen Funktionen bietet die Software noch komfortable Funktionen zum Verschieben und Drehen der dargestellten Objekte. Sie können aus- und eingeblendet oder transparent geschaltet werden.

Insbesondere zur Unterstützung der für PRINZ notwendigen Fähigkeit, mehrere Stufen einer Stadienfolge berechnen zu können, ist PRINZ/DAT in der Lage, zu jedem beliebigen Zeitpunkt der dargestellten Umformung das Werkstück als Flächenmodell in eine STL-Datei zu exportieren. Bei Vorhandensein von dazu passenden Importfiltern können diese Dateien in CAD-Systeme zurück gelesen werden. Das Volumenmodell kann aber mit Hilfe von PRINZ/STL mit neuen Werkzeugen kombiniert werden, um den Umformprozess in die nächste Stufe zu führen.

Für die effektive Auswertung der Berechnungsergebnisse ist einmal der Plot von 2D-Konturen und zum anderen die Fähigkeit notwendig, 3D-Bilder zu erzeugen. In der wählbaren 2D-Darstellung kann eine Vektorgrafik des gesamten Umformprozesses der gewählten Kontur erzeugt werden.

In der 3D-Darstellung des Prozesses kann ein Abbild der gesamten Umformung automatisch in „Animated GIF“ erfolgen, welche mit Hilfe eines Internet-Browsers betrachtet werden können. Damit ist die Austauschbarkeit der Ergebnisse ohne aufwendige Softwareinstallation möglich. Die Ergebnis-Dateien sind so kompakt, dass sie ohne Informationsverlust über das Internet übertragen werden können.

### 4.8.1 Kontaktanalyse

Eine der wichtigsten Funktionen der Werkstoffflussanalyse mit PRINZ/DAT ist die Kontaktanalyse, da erst auf diese Weise der Grad der Formfüllung der Gravur überprüft werden kann (Bild 69).

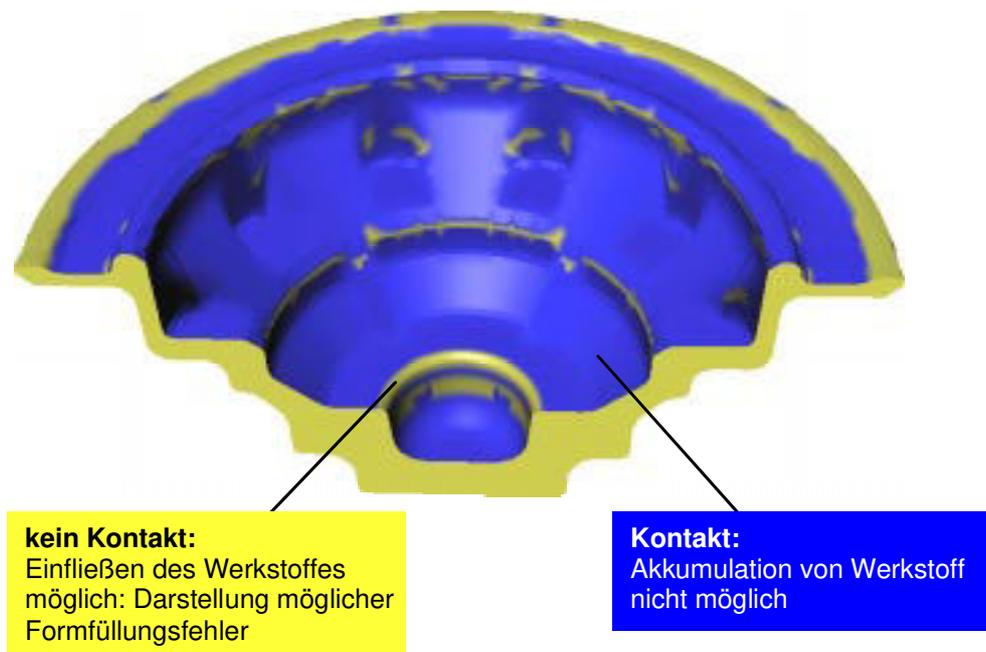


Bild 69: Kontaktanalyse mit PRINZ/DAT

Die zweifarbige Darstellung der Kontaktzustände der Oberfläche des Werkstückes ermöglicht das Erkennen von Formfüllungsfehlern sowie der Entwicklung möglicher Überlappungen. Dabei werden die Teile der Oberfläche dunkel dargestellt, die im Kontakt zu einem der Werkzeuge stehen.

## 4.8.2 Verdrängungsverteilung

PRINZ/DAT stellt neben der Kontaktanalyse die Darstellung der Verdrängungsverteilung zur Verfügung. Berechnet wird sie mit PRINZ durch die Aufaddierung der im Verlauf der Berechnung durch die Werkzeugbewegung auftretenden Werkstoffverdrängung. Die Verteilung wird über der Oberfläche des Schmiedeteiles als Verdrängungsgradient farblich unterschiedlich markiert (Bild 70).

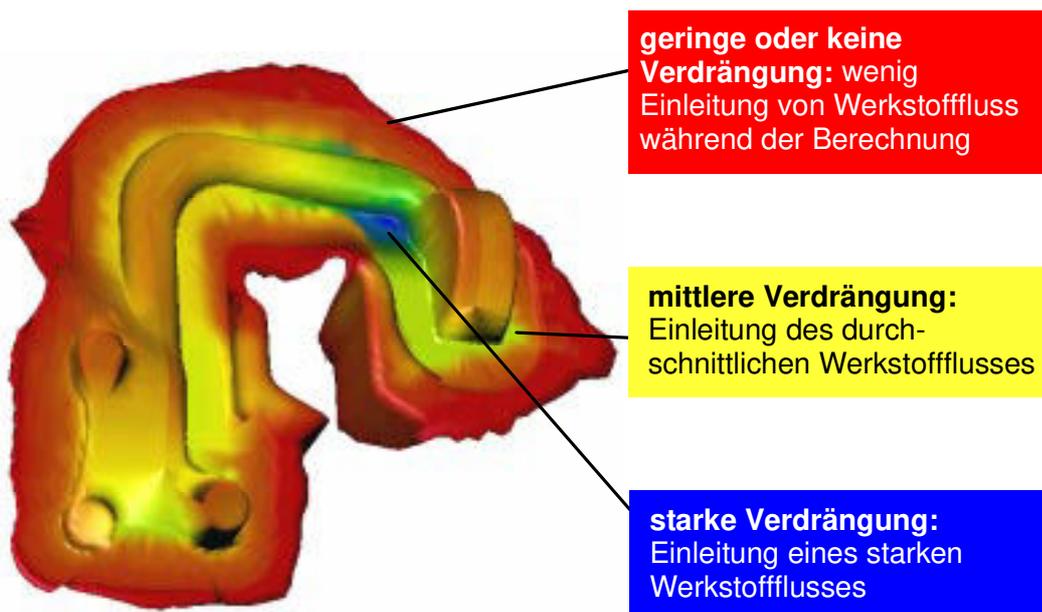


Bild 70: Verdrängungsverteilung auf der Oberfläche eines berechneten Schmiedeteiles

Die Verdrängung kann analysiert werden über:

- den Gesamtumformprozess,
- den Berechnungsschritt (absolut),
- den Berechnungsschritt (relativ).

Die Verdrängung kann bei der Analyse Informationen über die Einleitung von Werkstofffluss im Schmiedestück liefern. Bereiche hoher Verdrängung lassen auf hohe Fließgeschwindigkeiten, eine starke Belastung der Gesenke in diesem Bereich sowie eine ungünstige Massenverteilung in diesem Bereich schließen. Die Analyse der Verdrängung in den einzelnen Berechnungsschritten lässt Aufschluss über den Zeitpunkt sowie den Ort der größten Verdrängungen zu, so dass der Konstrukteur durch gestalterische Maßnahmen an der Einlegeform hier Abhilfe schaffen kann.

### 4.8.3 Anlagerungsverteilung

Die Darstellung der Anlagerungsverteilung ermöglicht die Untersuchung der Bereiche großer Werkstoffanlagerungen an der Oberfläche des Schmiedeteiles. Lokal starke Anlagerung lässt dabei auf große Werkstoffbewegungen in diesen Bereich schließen.

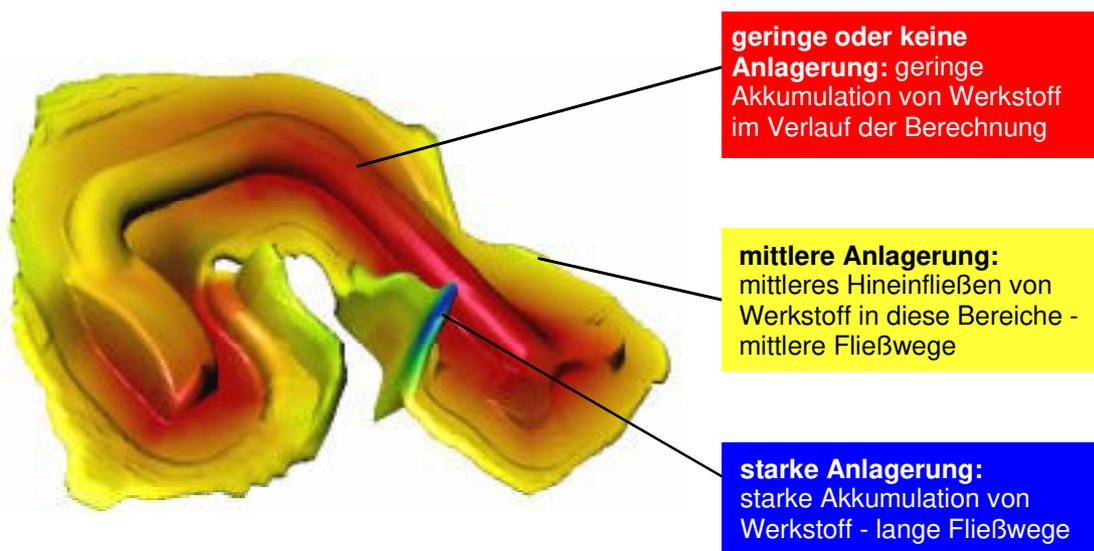


Bild 71: Anlagerungsverteilung auf der Oberfläche eines Schmiedeteiles

Ähnlich der Verdrängungsverteilung kann die Anlagerung über den gesamten Umformprozess sowie absolut und relativ über ausgewählte Berechnungsschritte dargestellt werden.

### 4.8.4 Grafikberechnung in PRINZ/DAT

Die graphische Darstellung von dreidimensionalen Objekten nahm bei der Entwicklung von PRINZ/DAT großen Raum ein. Ziel war es, die durch die Simulation errechneten Verhältnisse so detailgenau wie nur möglich auf dem Bildschirm abzubilden. Die Grafik muss die darzustellenden Objekte in einer Weise bildlich darstellen, dass Schmiedefehlern immer erkannt werden können, d.h. die Verwechslungsgefahr von Grafikproblemen mit technologischen Problemen muss minimiert sein.

Für die Darstellung schattierter Objekte wurde die Grafikkbibliothek „Open Inventor“ der Firma Templates Graphics genutzt, welche wiederum auf dem sich bereits zum Industriestandard entwickelten OpenGL (Silicon Graphics) basiert. Diese Bibliothek stellt viele für die Darstellung von 3D-Objekten auf dem Bildschirm notwendige Funktionen zur Verfügung. Die Open-Inventor-Funktionen benötigen zur Darstellung der Schattierung Dreiecke auf der Oberfläche der Objekte. Um eine optimale Darstellung zu erreichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Triangulationsmethode entwickelt, welche es möglich macht, Profilflächen, welche sich über Profilkurven aufspannen, so zu berechnen, dass sich beliebige Änderungen der Form und Länge der Kurven nicht negativ in der grafischen Darstellung bemerkbar machen. Diese Aufgabe hatte insofern zentrale Bedeutung, da eine fehlerhafte graphische Darstellung die Interpretationsfähigkeit der Ergebnisse negativ beeinflusst sowie der Eindruck einer fehlerhaften Berechnung des Werkstoffflusses entstehen kann.

In PRINZ/DAT werden jeweils zwei Profillinien miteinander durch ein Oberflächenband aus Dreiecken verbunden. Die Ebenen, in denen die beiden Profile liegen, müssen nicht parallel zueinander liegen, sie können sogar senkrecht aufeinander stehen. PRINZ/DAT nimmt jedoch die Parallellage als Normalfall an; schiefe Profile werden - wie die einzelnen Falten einer Ziehharmonika - dennoch sinnvoll verbunden.

Die Oberfläche wird in zwei Schritten erstellt: Unterteilen der Profile mit möglichst repräsentativen Punkten, dann Triangulation zweier Profile über ihre Punktrepräsentationen.

## 5 Aufbereitung der Geometriedaten

Das Vorhandensein genauer Geometriedaten von Umformwerkzeugen und Einlegeform ist für die Berechnung des Werkstoffflusses von großer Wichtigkeit. Ist es in zweidimensional orientierten Berechnungsprogrammen noch vertretbar, die Konturen der Werkzeuge und des Werkstückes mit Hilfe von in das System integrierten Zeichenwerkzeugen in akzeptabler Geschwindigkeit zu entwerfen, ist eine solche Vorgehensweise im Dreidimensionalen nicht möglich. Effiziente Software für die Modellierung und Manipulation von 3D-Objekten ist hochkomplex und bietet vielfältige Möglichkeiten für die Modellerstellung. Eine Voraussetzung für die Anwendung von PRINZ ist demnach das Vorhandensein und die Nutzung geeigneter rechnerunterstützter Konstruktionssoftware (CAD). Die schnelle Berechnung des Werkstoffflusses kann erst dann in der CA-Entwicklungskette (Bild 72) für Schmiedeteile und –werkzeuge effizient zur Reduzierung von Iterationsschleifen und Optimierung der Stadienfolge genutzt werden. In konsequenter Umsetzung des Gedankens der Interaktivität und Intuitivität der entwickelten Software wäre eine vollständige Integration des Berechnungsprogramms in die CAD-Umgebung zwingend notwendig. Leider steht dem die heterogene Welt der CAD-Systeme entgegen, was sich in der hohen Anzahl der unterschiedlichen installierten Systeme in der deutschen Schmiedeindustrie widerspiegelt (Euklid, Pro/ENGINEER, CADDs, Unigraphics, etc.).

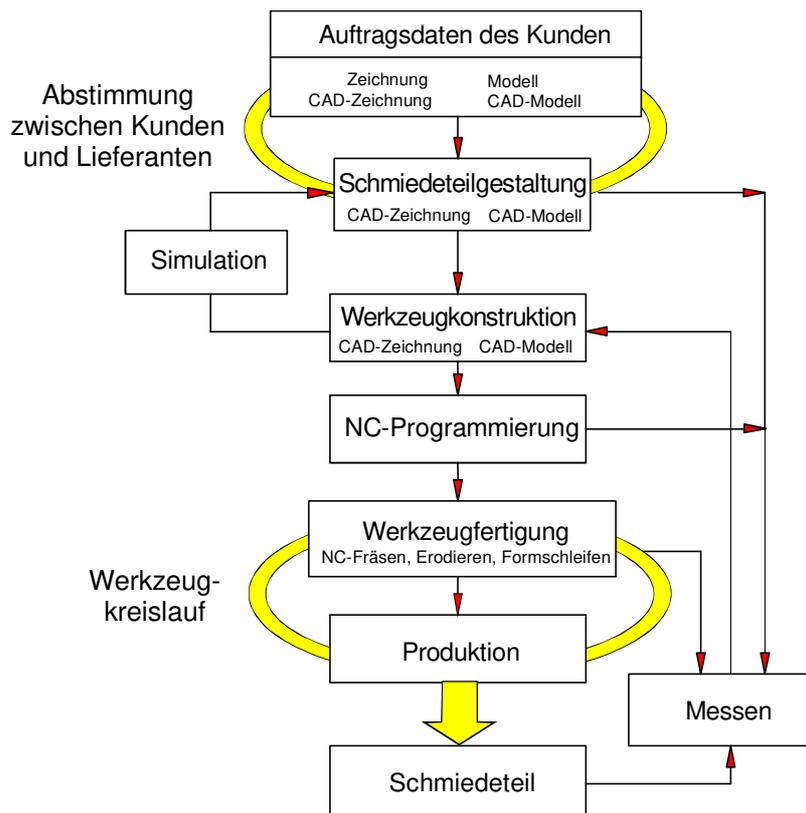


Bild 72: CA-Entwicklungskette für Schmiedeteile nach /24/

Um sowohl dem Gedanken der vollständigen Integration in ein CAD-System beispielhaft Rechnung zu tragen als auch dem Bedarf anderer möglicher Anwender des Simulationssystems PRINZ zu entsprechen, wurden zwei Strategien der Anbindung an CAD-Systeme verfolgt: die Entwicklung eines Datentransfermoduls für Pro/ENGINEER (ProPRINZ) und die Schaffung einer unabhängigen, universellen Schnittstelle, die grundsätzlich mit jedem 3D-CAD-System nutzbar ist (PRINZ/STL).

Das Kernproblem der Integration von CAD und Simulation besteht jedoch nicht nur in der Übertragung, sondern mehr noch in der Umwandlung von Geometrieinformation. Während die Geometriedaten von CAD-Volumenmodellen komplex strukturiert sind und mit einem hohen Informationsgehalt vorliegen, wird für die PRINZ – Modelle eine im Vergleich dazu einfache Geometriebeschreibung aus Punkten und Schnittkurven verwendet.

## 5.1 RUSCHKO

Das System RUSCHKO unterstützt die Entwicklung von Schmiedeteilen und Schmiedewerkzeugen. Ausgehend von der Geometrie des Fertigteils können mit diesem System die verfahrensgerechte Konstruktion des Schmiedeteils und die Auslegung der Stadienfolge durchgeführt werden /24, 29/.

Für die konstruktionsbegleitende Simulation des Umformprozesses ist das Vorhandensein von optimal angepassten Schnittstellen unabdingbar, die einen schnellen Datentransfer ohne Verluste ermöglichen. Diese Schnittstelle wurde bei der Realisierung des Gesamtsystems von Anfang an vorgesehen und implementiert /24/.

Als schneidendes Element der sternförmig angeordneten Schnittkurven wird eine ebene Bézier-Fläche verwendet. Eine Ebene im rein mathematischen Sinne, etwa definiert durch einen Punkt und einen Normalenvektor, darf nicht verwendet werden, da diese eine unendliche Ausdehnung besitzt. Die schneidende Fläche muss sich definitionsgemäß in der xz-Ebene befinden, und eine Kante der Fläche muss kollinear zur z-Achse sein. Zweites Element ist ein interaktiv einzugebender Polygonzug, der die Verteilung der Schnittkurven bestimmt. Vor der Positionierung der Schnittkurven wird der Polygonzug innerhalb von RUSCHKO in einen Bézier-Spline umgewandelt. Die Anzahl der Schnitte wird über zwei Parameter gesteuert. Der erste steht für die Anzahl der Schnittkurven entlang des Splines, der zweite für die Anzahl in den Wendepunkten.

Die Eingangsdaten für die Simulation werden in externe Dateien geschrieben, wobei die x- und y-Koordinaten und pro Schnitt ein Orts- und zwei Richtungsvektoren gespeichert werden. Sie ermöglichen es, die 2D-Daten in die ursprüngliche Lage zurückzutransformieren. Die Daten werden jeweils einzeln für Ober- und Unterwerkzeug sowie für die Einlegeform ermittelt, dies erleichtert die spätere Variation der Einlegegeometrien.

## 5.2 ProPRINZ

ProPRINZ ist eine direkte Geometriedatenschnittstelle zwischen Pro/ENGINEER der Firma Parametric Technology Inc. und PRINZ. ProPRINZ führt das Vernetzen der Oberflächen der Werkzeuge wie auch des Werkstückes im CAD-System sowie den Export der sich daraus ergebenden Oberflächendaten im PRINZ-eigenen Datenformat durch. Das Zusatzprogramm zu Pro/ENGINEER wurde geschaffen, um den Datenaustausch zwischen dem auch in der Schmiedeindustrie zunehmend verbreiteten CAD-System Pro/ENGINEER und PRINZ zu vereinfachen. Mit dieser Schnittstelle wird dem Entwickler bzw. Konstrukteur im Schmiedeunternehmen die Möglichkeit gegeben, auf die ihm gewohnte Art und Weise mit dem Simulationsprogramm PRINZ zu kommunizieren und alle Analyse-Möglichkeiten auszuschöpfen. So bietet ProPRINZ die Flexibilität, auch komplizierte Vernetzungsoperationen durch Veränderung von Parametern zu beeinflussen. Aber auch die Standardeinstellung für wiederholte und einfache Vernetzungsoperationen sind nutzbar und bieten einen einfachen Einstieg in die Problematik.

ProPRINZ unterstützt lediglich den Export von Geometriedaten in das PRINZ-Format. Da gewöhnlich die gesamte Stadienplanung im CAD-System erfolgt, ist es nicht notwendig, Simulationsergebnisse in das CAD-System zurückzuholen. Die Simulation dient lediglich der Überprüfung des im CAD-System entwickelten Modelles. Sich aus der Analyse des Simulationsprozesses ergebende notwendige Änderungen werden an der im CAD-System vorhandenen Einlegeform oder den Werkzeugen durchgeführt. Die Ableitung der Vorformwerkzeuge erfolgt auch von der im CAD-System vorhandenen, bereits mit Hilfe von PRINZ optimierten Vorformgeometrie und wird von der Simulationssoftware demnach in diesem Schritt nicht beeinflusst.

## 5.2.1 Teileklassen

Für die Konzeption des Schnittstellenprogramms wurden die in Frage kommenden Geometrien in zwei Teileklassen eingeteilt. Grundsätzlich einfacher zu behandeln sind rotationssymmetrische Teile oder solche, die genauso gehandhabt werden können. [Bild 73](#) zeigt ein Beispiel. In diesem Fall genügt es, die erforderlichen Schnittebenen um eine Achse anzuordnen. Auf diese Weise zu behandelnde Geometrien werden im folgenden als achsensymmetrisch bezeichnet.



Bild 73: Beispiel für ein achsensymmetrisch zu übertragendes Teil

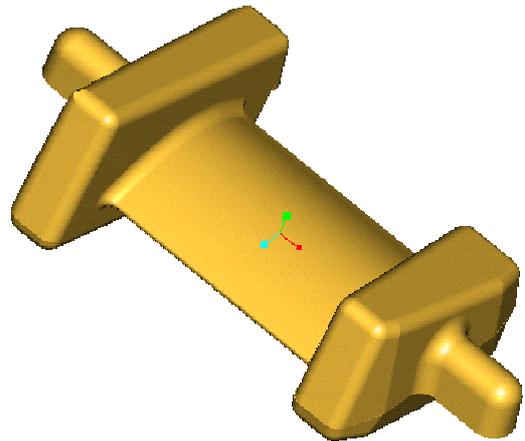


Bild 74: Beispiel für ein asymmetrisch zu übertragendes Schmiedeteil

[Bild 74](#) zeigt ein Beispiel der zweiten Teileklasse, die durch eine beliebig komplizierte Geometrie im schmiedetechnischen Sinne charakterisiert werden. Diese wird im folgenden als asymmetrisch bezeichnet. Hier können die Schnittebenen auch parallel verlaufen. Dazu muss die in der Klasse der rotationssymmetrischen Teile feststehende Achse verschoben werden können.

## 5.2.2 Einbindung in Pro/ENGINEER

Das CAD-System Pro/ENGINEER stellt dem Anwender verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, Abläufe zu automatisieren [31]. Im einzelnen handelt es sich hierbei um

- Tastaturmakros,
- eine direkte C-Schnittstelle, die dazu dient, einzelne Modellparameter zu berechnen und in die aktuelle Geometriedatei zu schreiben,
- das Modul Pro/PROGRAM, mit dessen Hilfe eine Pro/ENGINEER-Datei editiert und Varianten erzeugt werden können, und um

- die Funktionsbibliothek Pro/TOOLKIT zur Programmentwicklung. Über dieses Modul erhält man Zugang zum CAD-Modell, welches über eigene Programme manipuliert werden kann. Zusätzlich ist es möglich, spezifische Menüpunkte zu programmieren.

Da auf alle Geometrielemente der Pro/ENGINEER-Objekte zugegriffen werden muss, wurde für die Realisierung des Schnittstellenprogramms das Entwicklungswerkzeug Pro/TOOLKIT gewählt. So lassen sich für eine komfortable Benutzung Menüs in die Oberfläche von Pro/ENGINEER integrieren, Abfragen realisieren sowie die gewünschten Daten als Ergebnis eines Berechnungsprozesses graphisch darstellen und in eine Datei schreiben.

### 5.2.3 Ermittlung einer Querschnittskurve

Über eine Konfigurationsdatei wird der Abstand der Punkte, die die Schnittkurven repräsentieren, sowie eine zulässige Toleranz dieses Abstandes definiert. Zur Ermittlung der Kurvenpunkte wird eine Gerade genutzt, die durch einen Punkt und einen Richtungsvektor charakterisiert wird. Eine Routine liefert eine Liste zurück, die alle Geometriepunkte enthält, die von der Geraden getroffen werden. Das können Durchstoßpunkte durch Flächen, Kanten oder geometrische Punkte sein. Das Programm wählt nur Durchstoßpunkte durch Flächen aus.

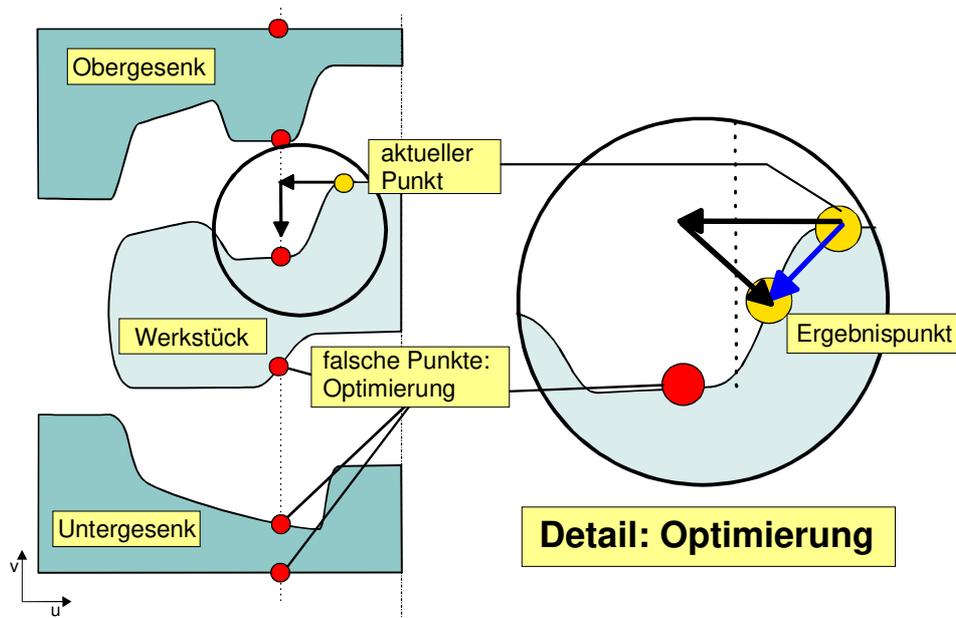


Bild 75: Ermittlung eines Oberflächenpunktes mit ProPRINZ

Für die Ermittlung der Punktfolge einer Schnittkurve wurde ein Algorithmus gewählt, der, ausgehend von einem bekannten Punkt, iterativ den nächsten ermittelt (Bild 75). Zu Beginn der Berechnung wird der erste Punkt auf der Schnittstelle von Oberfläche, Schnittebene und Verdrängungszentrum ermittelt. In einem ersten Schritt wird ein beliebiger Punkt gesucht, der zum richtigen Bauteil gehört und in der richtigen Richtung auf der Schnittkurve liegt. Weiterhin wird geprüft, ob dieser Punkt in dem vom Benutzer vorgegebenen Abstand liegt. Ist der Abstand zu groß, so wird orthogonal zu der Strecke zwischen dem Ausgangspunkt und dem ersten gefundenen Punkt eine Gerade berechnet. Diese wird auf der Strecke in einem vorgegebenen Abstand vom Ausgangspunkt positioniert. Auf ihr wird erneut nach einem Durchstoßpunkt in der Oberfläche gesucht, welcher dann wieder auf seinen Abstand hin geprüft wird. Das Vorgehen wird solange wiederholt, bis der Abstand innerhalb der benutzerdefinierten Toleranz ist. Der

gefundenen Punkt wird anschließend zum Ausgangspunkt für das Durchlaufen dieser Routine. Abgeschlossen ist die Berechnung der Oberflächenpunkte in einer Schnittebene, wenn das Verdrängungszentrum wieder erreicht ist.

## 5.2.4 Behandlung von achsensymmetrischen und Langteilen

Nach der Definition einiger weniger Punkte generiert ProPRINZ automatisch Schnittebenen durch Werkzeuge und Werkstück und erfasst die Oberflächenkontur der Körper auf den entstehenden Schnittkurven. Eine für die Simulation günstige Positionierung der Ebenen hängt von der Modellgeometrie ab, deshalb hat der Anwender zwischen einer achsensymmetrischen und einer asymmetrischen Geometrieabtastung zu entscheiden.

Die achsensymmetrische Abtastung der Oberflächen eignet sich für rotationssymmetrische Systeme. Alle Schnittebenen werden durch eine Achse gelegt. Handelt es sich dagegen um längliche Bauteile, die gerade oder auch gekrümmt sein können, ist eine Abtastung im Modus „asymmetrisch“ günstiger.

Die Bezeichnung hat programmtechnisch nichts mit der Geometrie des Werkstückes oder der Werkzeuge zu tun. Jede in Frage kommende Baugruppe kann grundsätzlich auf beide Arten exportiert werden. In Abhängigkeit von der äußeren Form ist meist jedoch nur eine von beiden Methoden sinnvoll.

Im achsensymmetrischen Modus werden alle Schnittebenen durch eine Achse gelegt (Bild 76). Diese Achse wird vom Benutzer durch Selektion von zwei Baugruppenbezugspunkten mit der Maus festgelegt. Der erste dieser beiden Punkte wird vom Programm als über dem Obergesenk, der zweite als unter dem Untergesenk liegend interpretiert. Durch Selektion eines dritten Bezugspunktes wird die erste Schnittebene definiert. Die folgenden Schnittebenen ergeben sich aus der Drehung der ersten Ebene um die sich ergebende Achse. Die Anzahl der zu verwendenden Ebenen wird bei jedem Programmaufruf vom Benutzer abgefragt. Der Winkel, der dabei überstrichen werden soll, wird über eine Konfigurationsdatei gesteuert und beträgt standardmäßig 90°.

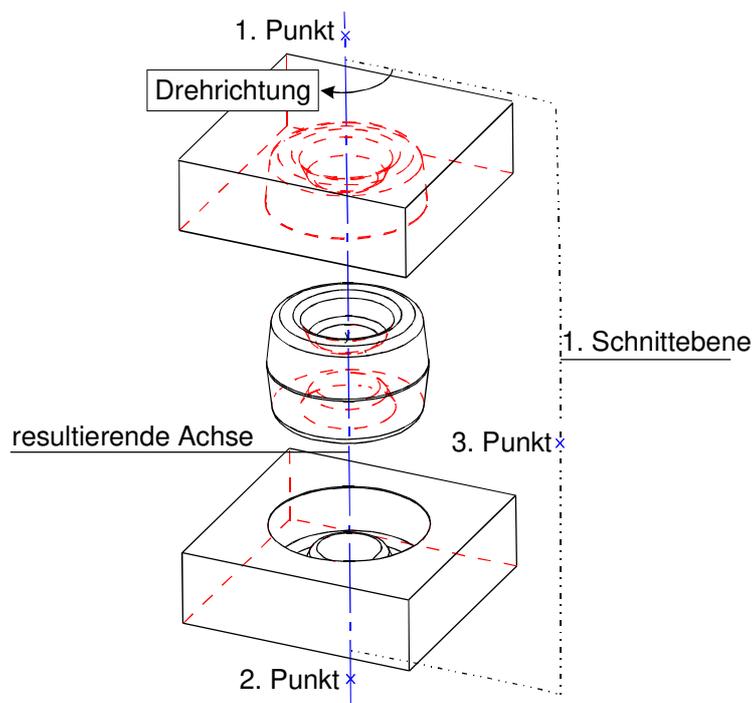


Bild 76: Achsensymmetrischer Abtastungsmodus

Der asymmetrische Modus wurde zur Abtastung von nicht-rotationssymmetrischen Werkstücken geschaffen. Um die Positionen der einzelnen Schnittebenen festzulegen, ist die Definition einer Fläche notwendig, die alle drei Objekte in Schmiederichtung vollständig durchstößt, sonst aber vollständig vom Werkstück umschlossen ist (Bild 77). An dieser Fläche wird die Achse, um die im vorgenannten achsensymmetrischen Modus gedreht wird, verschoben.

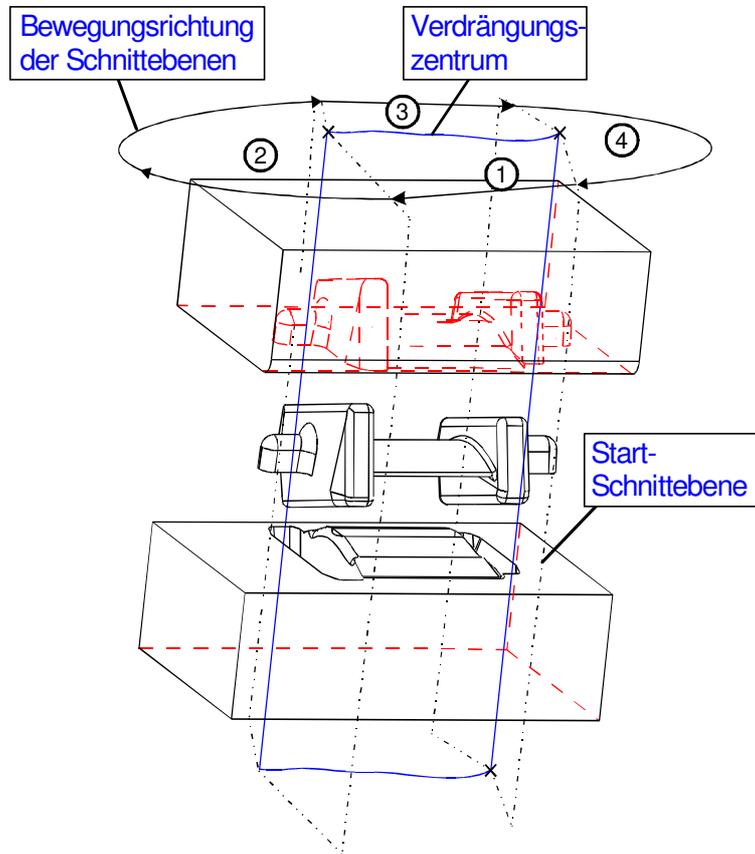


Bild 77: Asymmetrische Abtastung einer Turbinenschaufel

Damit ergeben sich die in Bild 77 nummerierten vier Bereiche, die nacheinander abgearbeitet werden. Der erste arbeitet mit Achsenverschiebung entlang der Fläche (Verdrängungszentrum). Ist die gegenüberliegende Seite der Fläche erreicht, so bleibt die Achse fest, und die Schnittebenen ergeben sich durch Drehung um diese Achse. Das ist der zweite Bereich. Im dritten wird die Achse auf der „Rückseite“ der Fläche wieder verschoben. Der vierte Bereich arbeitet wiederum ohne Achsenverschiebung und schließt den Umlauf um die Fläche ab.

Wie bereits im Modus „achsensymmetrisch“ werden alle notwendigen Definitionen durch Selektion von Punkten mit Hilfe der Maus getroffen. Der erste wird als unter dem Untergesenk, der andere als über dem Obergesenk liegend interpretiert. Gleichzeitig ist der zweite Punkt der Startpunkt der Achsenverschiebung. Ein dritter Punkt markiert den Wendepunkt der Achsenverschiebung, ein vierter zusammen mit den ersten beiden die erste Schnittebene. Weitere drei Punkte definieren die Schnittebenen, an denen Bereiche mit und ohne Achsenverschiebung voneinander getrennt werden sollen. Für jeden der vier Bereiche wird der Benutzer gefragt, wie viele Schnittebenen erstellt werden sollen.

## 5.3 PRINZ/STL

Das STL-Format wurde zur Beschreibung von CAD-Volumenmodellen für die Stereolithographie geschaffen. Es eignet sich gut, um eine universelle Anbindung von PRINZ an gängige Solid Modeler wie Pro/ENGINEER oder UNIGRAPHICS zu schaffen. Notwendig dafür ist eine vom CAD-System unabhängige Software, die in der Lage ist, STL-Files einzulesen und entsprechend für die Simulation aufzubereiten.

Weiterhin ist es durch Nutzung dieses einfachen Datenformates möglich, komplette Stadienfolgen von Anfang bis Ende mit PRINZ zu berechnen (vgl. Beispiel 6.4 *Radträger* auf Seite 114).

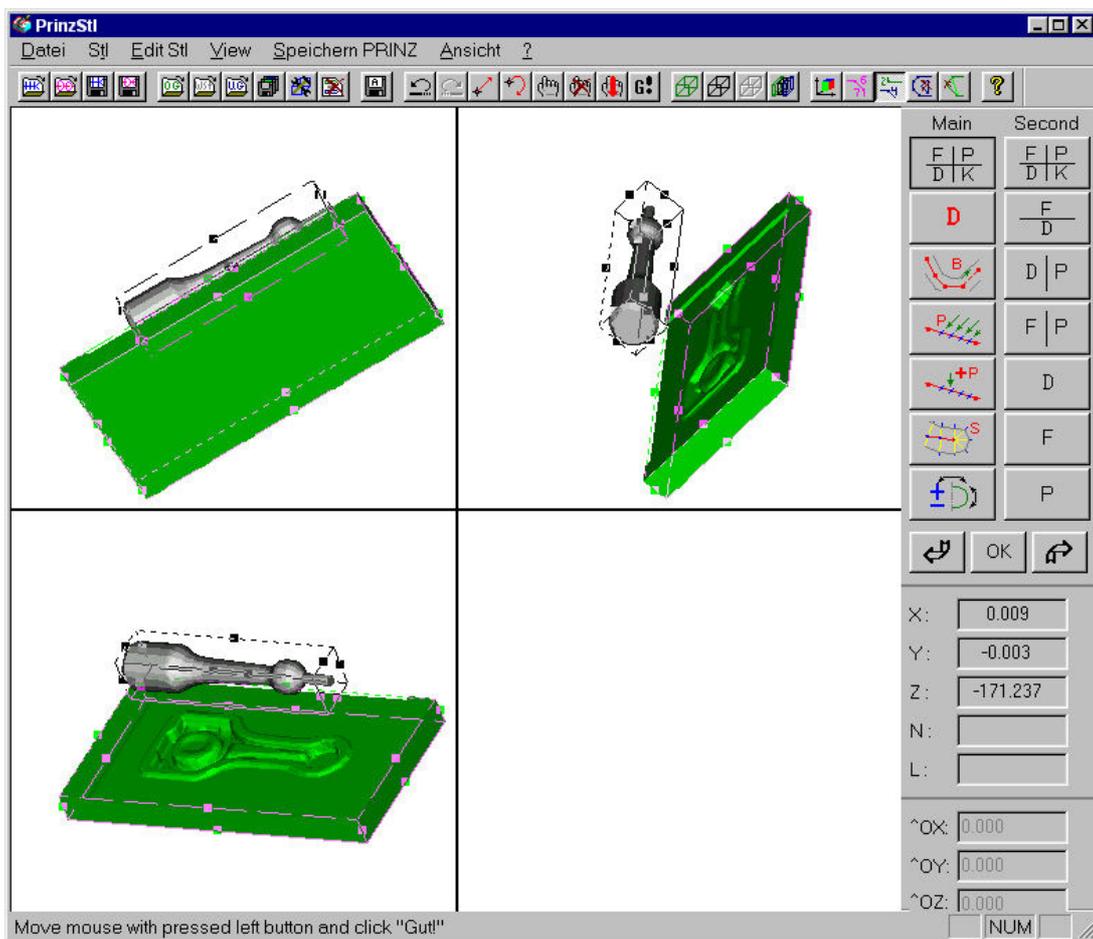


Bild 78: Benutzeroberfläche von PRINZ/STL

Für die Umwandlung von STL-Daten in das PRINZ-eigene Datenformat wurde die Anwendung PRINZ/STL geschaffen (Bild 78). Sie unterstützt:

- die freie Positionierung von Volumenobjekten im Raum z.B. zum „Einlegen“ des Schmiedeteiles in die Gravur,
- das Erzeugen, Manipulieren und Abspeichern von Verschneidestrategien zur Erzeugung von PRINZ-Daten und
- die Reparatur fehlerhafter STL-Volumenmodelle.

Die in PRINZ/STL verwendeten Detaillösungen sind sehr stark an die in ProPRINZ verwendeten angelehnt (vgl. *Kapitel 5.2 ProPRINZ*).

## 5.4 P-TOOL

Zur Vorbereitung der Modelldaten der Schmiedewerkzeuge und der Vorform des Schmiedeteiles im CAD-System Pro/ENGINEER wurde im Rahmen dieser Arbeit das Modul P-TOOL entwickelt. Neben der verfahrensgerechten Gestaltung von Schmiedeteilen, der Ermittlung der Massenverteilung und Bestimmung von Vorformen in der Stadienfolge, realisiert von /81/, ist es hilfreich, mit einem zu entwickelnden Tool die Hohlformen automatisch von den bereits erzeugten Volumenmodellen der Schmiedeteile ableiten zu können.

Ziel der Entwicklung von P-TOOL (Pro/ENGINEER - **Forging Tool** Module) war die automatisierte Ableitung von Schmiedewerkzeugen aus Schmiedeteilen unter Nutzung aller Vorteile dieses Systems wie Parametrik, Assoziativität, Feature-Basis sowie der optional erhältlichen Entwicklungswerkzeuge /36/. Ferner sollten die Vorbereitungsarbeiten zur Positionierung von Werkzeugen und Werkstück für das Simulationssystem PRINZ automatisiert werden /27, 29/.

Neben der Funktionalität zur Generierung der Werkzeuge war es wünschenswert, P-TOOL vollständig in die Benutzeroberfläche von Pro/ENGINEER einzubauen und mit der Angabe möglichst weniger Parameter die Werkzeuge automatisch von der Vorformgeometrie abzuleiten. Die erzeugten Volumenmodelle der Werkzeuge mussten sich für die Verwendung in weiteren Arbeitsschritten eignen, z.B. der Erzeugung von Mehrstufenwerkzeugen oder der manuellen Änderung der Gravur. Weiterhin musste die Oberflächengestalt der Gravur im Werkzeugblock in direkter Weise abhängig von der Gestalt des zu erzeugenden Werkstückes sein, d.h., durchgeführte Änderungen an der Werkstückgestalt im Ergebnis durchgeführter Simulation oder Schmiedeversuche wirken sich so auf die Form und Lage der Gravur aus. Dies führt schließlich zum Wegfall redundanter Arbeit und Fehler bei der Änderung sowohl von Werkstücken als auch der Werkzeuge.

Das realisierte Programm ist sehr einfach zu bedienen. Die Software ist ohne erkennbare Schnittstellen direkt in die Oberfläche von Pro/ENGINEER eingebunden. Nach dem Aufruf des entsprechenden Menüpunktes wird der Konstrukteur aufgefordert, den Namen der Datei mit dem Modell des abzubildenden Schmiedeteils anzugeben. Hier ist die Verwendung sowohl von Pro/E-Dateien als auch von importierten Modellen (z.B. IGES, VDAFS) möglich. Das jeweilige Modell wird sofort eingelesen. Anschließend erfolgt die Wahl des Gesenkblockgrundkörpers: zur Zeit sind das zwei einfache geometrische Objekte. In Zukunft ist hier die Einbindung von Modellen der im jeweiligen Schmiedeunternehmen genutzten Normalien möglich.

Für alle notwendigen Angaben wie Gesenkblockabmessungen usw. werden vom System Vorschläge generiert, die entweder angenommen oder vom Nutzer verändert werden können.

Am Ende erhält der Konstrukteur die Einzelteildateien für die Werkzeuge einschließlich der Gravur im Pro/ENGINEER-Format sowie eine Baugruppendatei, in welcher in gewohnter Weise die Werkzeuge und das Werkstück angeordnet sind. Zur Zeit werden aber nur nicht-gekröpfte Werkzeugsysteme unterstützt. Von hier aus kann die Weiterverarbeitung stattfinden (z.B. Vernetzung für das Simulationssystem PRINZ usw.).

Die Einzelteildateien der Werkzeuge können direkt für die NC-Datengenerierung genutzt werden.

## 6 Berechnungsbeispiele

Die praktische Anwendung der Simulationssoftware wurde anhand mehrerer geometrisch unterschiedlich komplexer Praxisbeispiele untersucht. Aus Kostengründen wurden keine gesonderten Versuchswerkzeuge für die umfangreichen Werkstoffflußuntersuchungen angefertigt, sondern es wurde auf die Ergebnisse laufender Forschungsvorhaben sowie Schmiedeversuche kooperierender Industriepartner zurückgegriffen.

Untersucht wurde das Verformungsverhalten während des Umformprozesses für die folgenden Schmiedeteile:

- ein Experimentalteil,
- ein Pleuel,
- ein Getriebe-Lagerbock,
- ein Radträger (IDS-Benchmarkteil).

### 6.1 Experimentalteil

Zur Durchführung grundlegender Untersuchungen wurde am IFUM ein Experimentalteil konstruiert und gefertigt /24/, welches auch für die Entwicklungsarbeiten an dem beschriebenen Simulationsmodell zum Gesenkschmieden zur Verfügung stand. Die exemplarische Konstruktion mit RUSCHKO /24/ mit Einbindung der Simulation stand im Mittelpunkt der Arbeiten. Weiterhin sollte die Möglichkeit der weiteren Nutzung der CAD-Daten für die Fertigung der Gesenke (Bild 80) und verschiedener Einlegeformen (Bild 79) aufgezeigt werden.

Zu diesem Zweck wurde sehr frühzeitig ein Schnittstellenmodul in das am IFUM entwickelte CAD-System RUSCHKO eingebunden (vgl. auch Kapitel 5.1 RUSCHKO). Erstmals konnte unter Nutzung der CAD-Daten die Simulation konstruktionsintegriert für komplizierte 3D-Teile genutzt werden /24/.



Bild 79: Stadienfolge zur schmiedetechnischen Herstellung des Experimentalteiles /24/.



Bild 80: Werkzeug zur Fertigung des Experimentalteiles

Bild 81 zeigt einen Vergleich der mit den Systemen Forge 3 der französischen Firma Transvalor (FEM) und PRINZ erzielten Berechnungsergebnisse. Beide Berechnungen weisen leichte Unterschiede zum Realbauteil auf, die charakteristischen sichtbaren Merkmale der Formgebung werden jedoch richtig wiedergegeben.

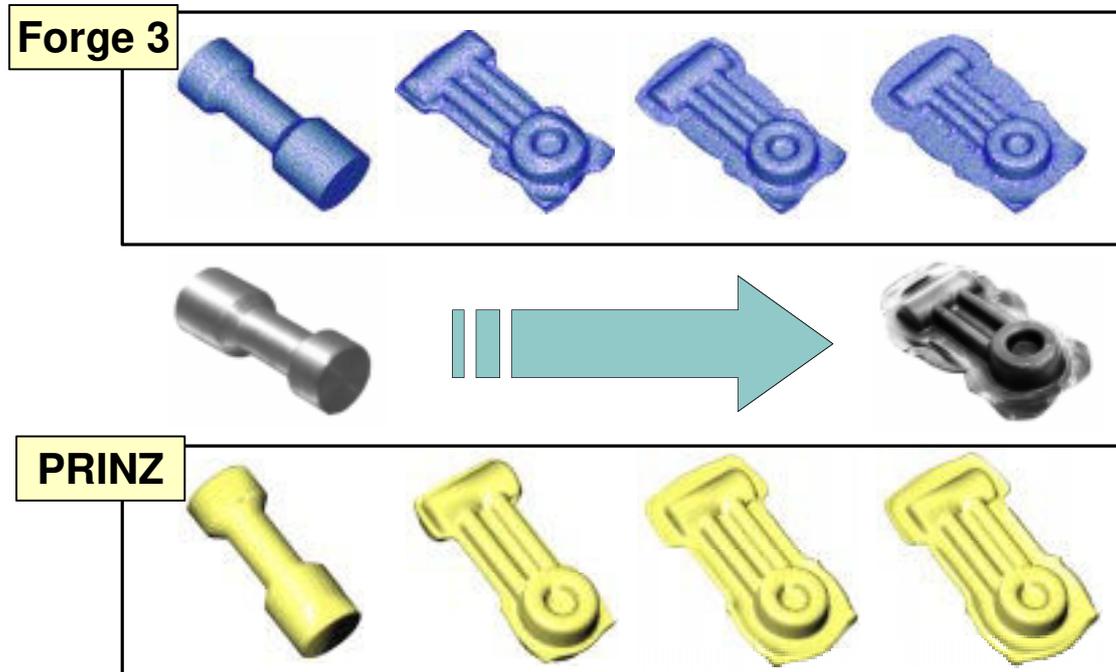


Bild 81: Vergleich von Experiment, Berechnung mit Hilfe von Forge 3 (Transvalor) und Simulationsergebnis von PRINZ

In Bild 82 und Bild 83 werden die Kraft-Weg-Verläufe beider Berechnungen verglichen. Unterschiede zeigen sich einmal im Anstieg der Kurve und in den Maximalwerten. So wird bei Berechnung des Vorganges mit dem FEM-Paket eine Maximalkraft von 3557.6 kN, mit PRINZ eine Endkraft von 3356.3 kN über den Umformweg von 23.27 mm ermittelt. Die Differenz von 5.65% liegt im zulässigen Toleranzbereich beider Systeme. Die im Versuch ermittelten maximalen Kraftwerte variieren zwischen 3000 kN und 3500 kN.

Im Gegensatz zur Maximalkraft weicht der mit PRINZ ermittelte Kurvenverlauf in Bild 83 stärker von dem vom FEM-Programm ermittelten ab. Die Berechnungsvorschrift lässt demnach eher Schlussfolgerungen auf die Maximalkraft zu, als auf den genauen Verlauf der Umformkraft über den Stößelweg während der Umformung.

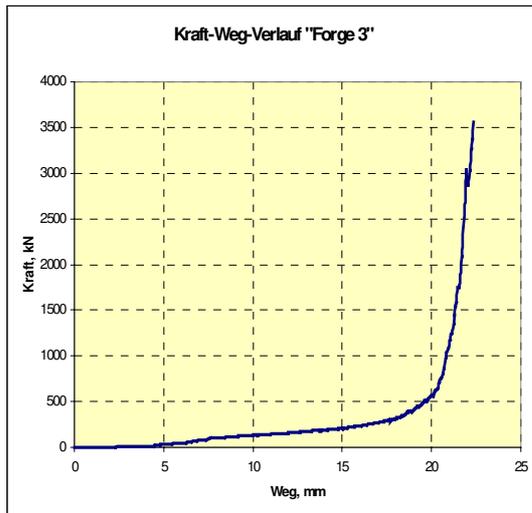


Bild 82: Kraft-Weg-Verlauf, berechnet mit Forge 3

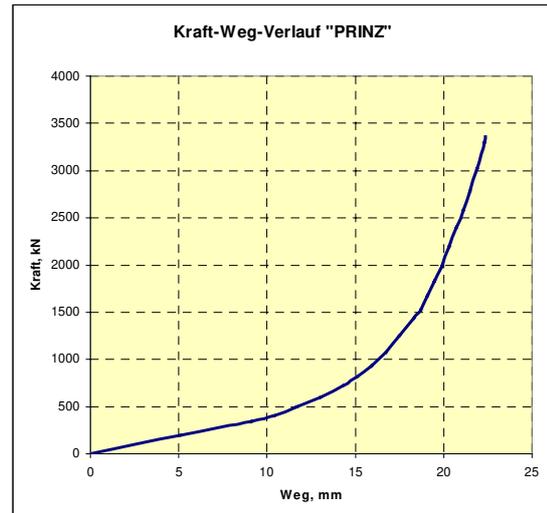


Bild 83: Kraft-Weg-Verlauf, berechnet mit PRINZ

Für die Berechnung mit PRINZ wurden die in Tabelle 7 dokumentierten Randbedingungen fixiert:

|  |       |                       |
|--|-------|-----------------------|
| <b>Werkstoff</b>                           |       | 16MnCr5               |
| <b>Fließspannung</b>                       | $k_f$ | 120 N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Reibfaktor</b>                          | $m$   | 0.4                   |
| <b>Schmiedetemperatur</b>                  | $T_U$ | 1200 °C               |
| <b>Auftreffgeschwindigkeit des Stößels</b> | $v_0$ | 0.7 m/s               |
| <b>Umformweg</b>                           | $s$   | 23.27 mm              |

Tabelle 7: Randbedingungen für die Berechnung der Umformung des Experimentalteiles

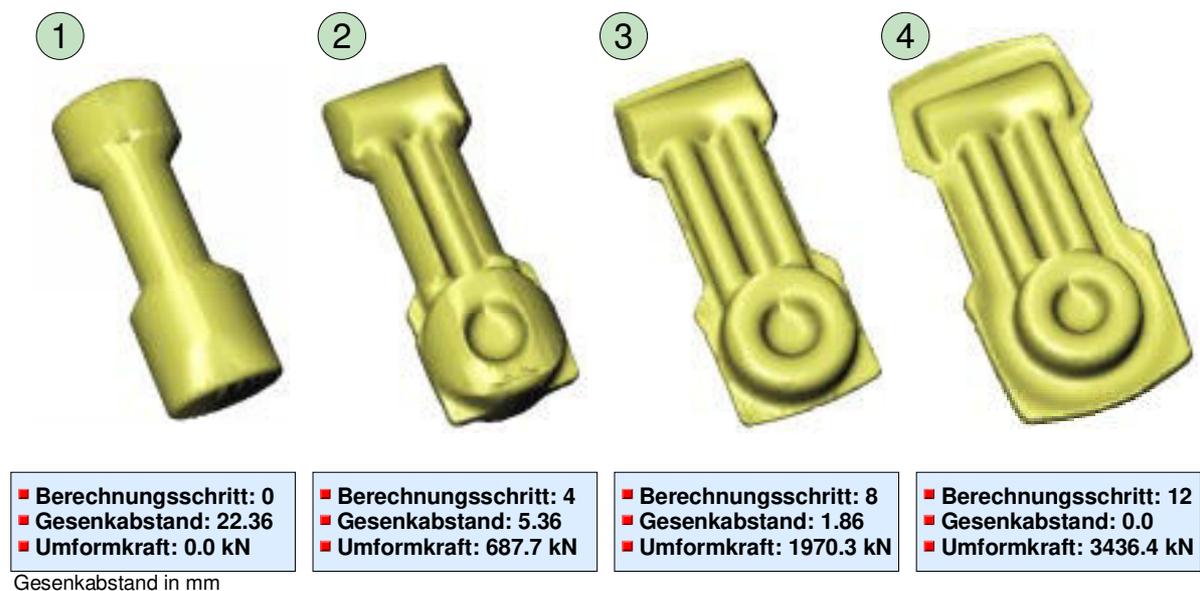


Bild 84: Ausgewählte Berechnungsschritte

In Bild 84 sind beispielhaft ausgewählte Berechnungsschritte des Experimentalteils dargestellt. Charakteristisch ist, dass die knochenförmige Grundform des Rohlings am Berechnungsende immer noch zu erkennen ist. Die Auswertung der Kontaktverhältnisse in Bild 85 zeigt, dass in Berechnungsschritt 8 bei einem Gesenkabstand von 1.86 mm teilweise noch keine vollständige Formfüllung erreicht wurde, obwohl zeitgleich die Ausbildung von Grat in unmittelbarer Nähe der Fehlstellen beginnt.

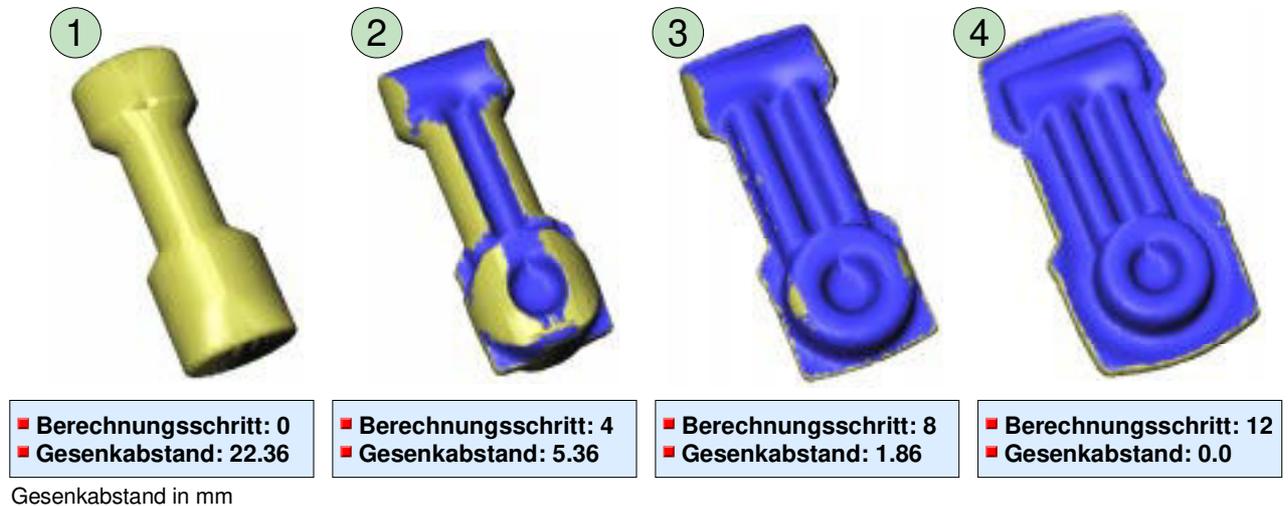


Bild 85: Kontaktanalyse

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass die für einen optimalen Prozess am besten geeignete Gestalt der Vorform sehr schwer zu finden ist.

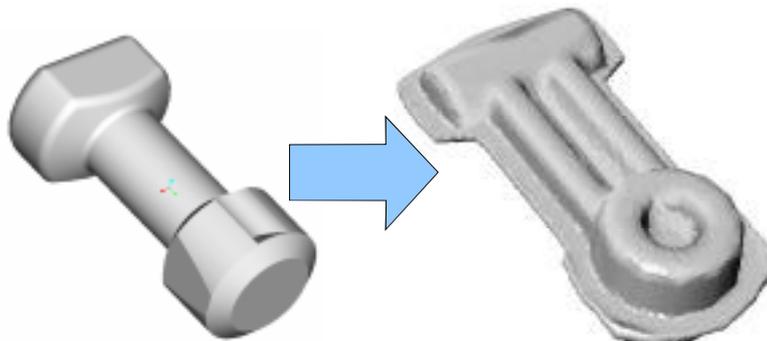


Bild 86: Idealierte Vorform für das Schmieden des Experimentalteiles

Eine sich nach einigen Iterationsschleifen aus Sicht des Anwenders der Simulation als zufriedenstellend erweisende Vorform ist in Bild 86 dargestellt, diese Geometrie ließe sich aber sehr schwer wirtschaftlich industriell herstellen. Aus diesen Gründen müssen Kompromisse gemacht werden, die in der Praxis häufig eine stetig parallel zur Fertigung erfolgende Optimierung während der Herstellungszeit eines Teiles mit sich bringen.

## 6.2 Pleuel

Die Schubstange, auch Pleuel genannt, dient als Verbindungsglied zwischen Kurbelwelle und einem geradeführten Teil, z.B. dem Kolben in einem Verbrennungsmotor (Bild 88). Die hohe mechanische Beanspruchung dieser Teile erfordert ihre schmiedetechnische Herstellung. Weniger hoch belastete Pleuel in Ottomotoren können auch gesintert werden.

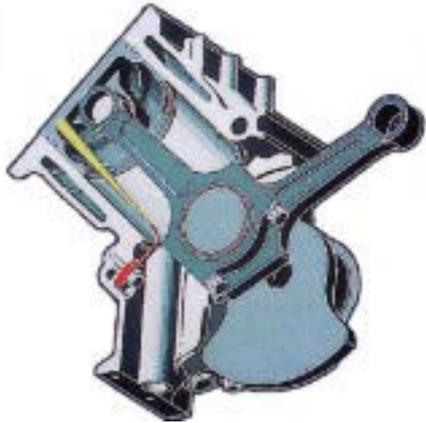


Bild 87: Kurbeltrieb /80/



Bild 88: Geschmiedetes Pleuel

Die Modellierung erfolgte mit Pro/ENGINEER. Die Werkzeuge wurden direkt vom modellierten Pleuel abgeleitet. Von den Endwerkzeugen (Bild 89) und den Einlegeformen wurden STL-Dateien exportiert, die mit PRINZ/STL in das Simulationsformat umgewandelt wurden.



Bild 89: CAD-Modell eines Schmiedewerkzeuges zur Fertigung eines Pleuels.

Die Simulationsläufe wurden mit einfachsten Einlegeformen begonnen, um schrittweise zur optimalen Gestalt zu kommen. In Bild 91 sind die für die Durchführung der Simulation gewählten Einlegeformen dargestellt. Um schnell zu einer optimalen Form zu kommen, wurde eine Massenverteilungsanalyse durchgeführt (Bild 90).

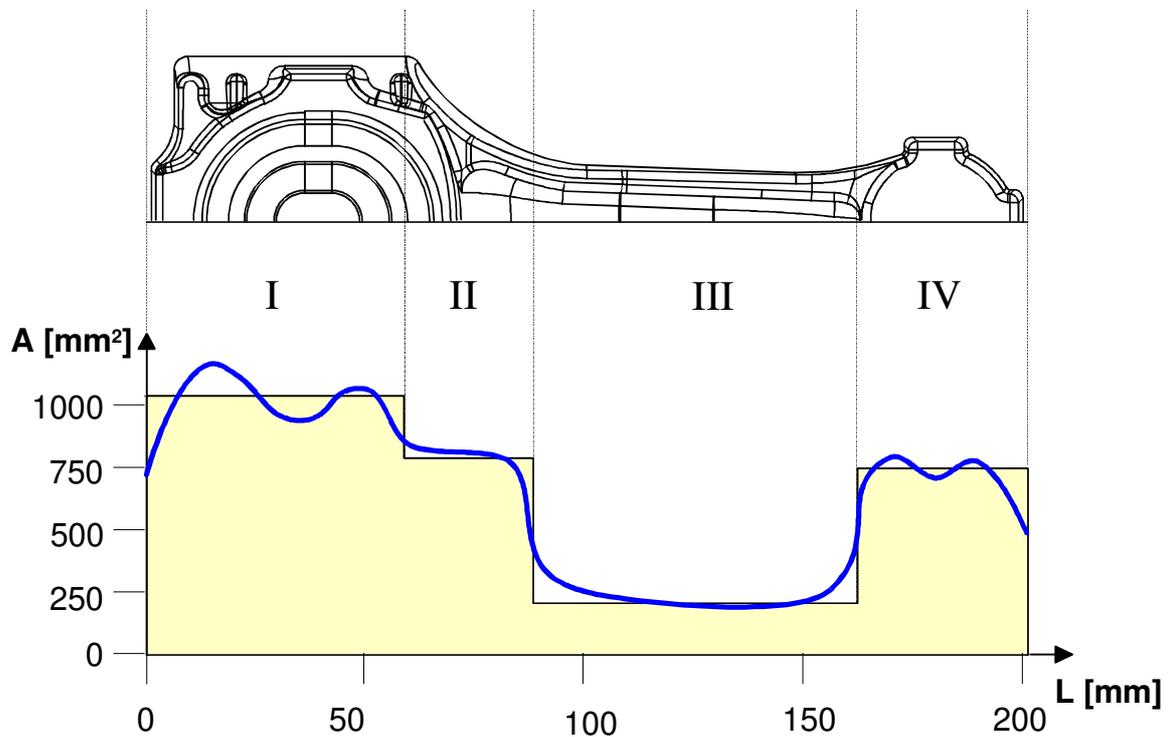


Bild 90: Vereinfachte Massenverteilung und Ursprungverlauf am Pleuel

Die mit unterschiedlichen Optimierungstiefen durchgeführten Massenverteilungen führten zu den in [Bild 91](#) beschriebenen Vorformen, wobei Vorform 3 die im CAD-System nachempfundene Form einer reckgewalzten Einlegeform darstellt. Das Reckwalzen ist zur Zeit das gängige Massenverteilungsverfahren für die Herstellung von Pleuel.

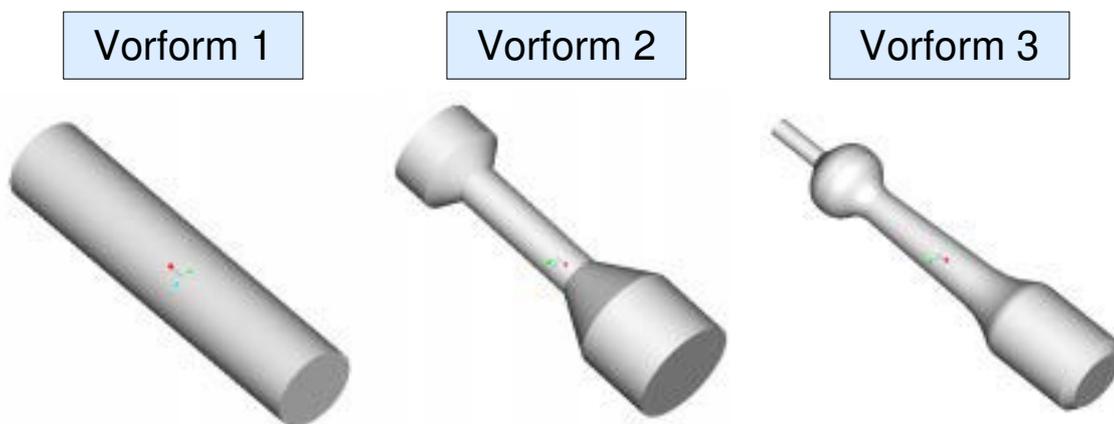


Bild 91: Für die Berechnung des Werkstoffflusses des Pleuels verwendete Einlegeformen

Vorform 2 kann durch Querwalzen hergestellt werden, Vorform 1 ist eine einfache, nicht optimierte zylindrische Einlegeform, die für kleine Serien ihren Anwendungsfall haben kann. Ziel muss es sein, neben der optimalen werkstoffflußgerechten Geometrie der Einlegeform die für die jeweiligen Gegebenheiten passende, mit geringen Kosten zu fertigende Gestalt einer Einlegeform zu finden.

Bei der industriellen Fertigung von Pleuel wird gegenwärtig ein dreistufiges Verfahren angewandt. Ein Stangenabschnitt wird reckgewalzt (Stufe 1), danach mit Hilfe des Gesenkschmiedens geformt (Stufe 2) und am Ende entgratet und gelocht (Stufe 3). Für die Weiterverarbeitung wird eine Bruchmarke eingeschmiedet, an deren Stelle in einer nachfolgenden Verarbeitungsstufe das Cracken des Pleuels

stattfindet. In Bild 92 sind beispielhaft ein Schmiedeteil nach Anwendung von Stufe 1 und Stufe 2 abgebildet.

Das Beispiel in Bild 92 offenbart erhebliches Optimierungspotential. So lässt die Größe des Grates auf erhebliches Potential zur Optimierung des Prozesses schließen. Die asymmetrische Ausbildung des Grates zeigt, dass unter den gegebenen Umständen die Prozessreproduzierbarkeit nur in einem gewissen Schwankungsbereich möglich ist. Die richtige Lage der Einlegeform auf dem Endwerkzeug wird nicht durch geometrische Elemente erzwungen, so dass die dadurch auftretenden Schwankungen der Einlegeposition nur durch erhöhten Materialverbrauch und damit einhergehenden stärkeren Verschleiß der Gesenke zu kompensieren sind. Hier bietet sich in Zukunft eine für diesen Anwendungsfall optimierte Werkzeuggeometrie mit eingearbeiteten Zentrierungselementen an.

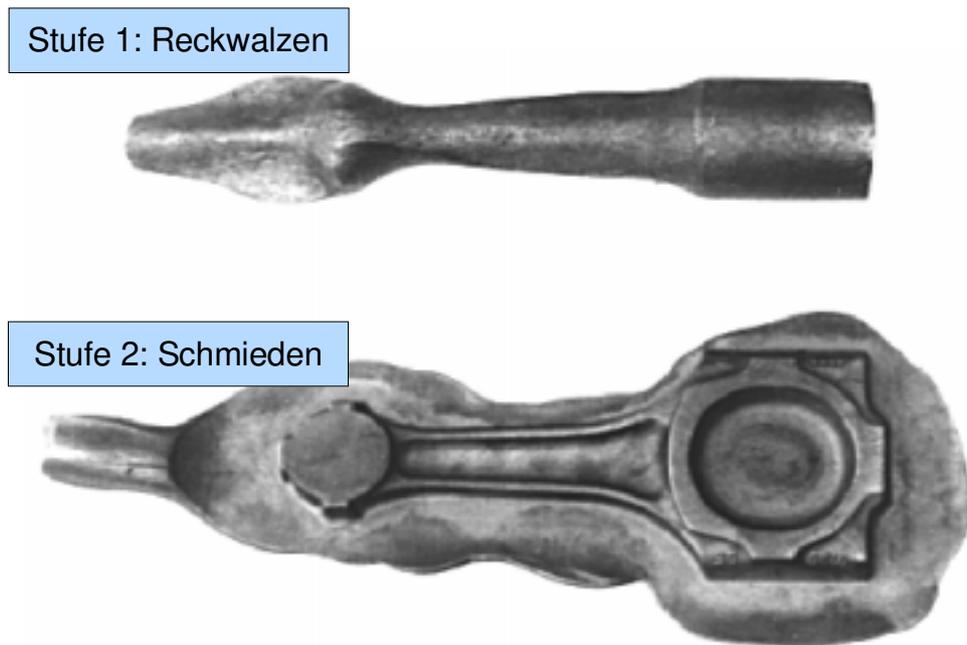


Bild 92: Reckgewalzte Vorform und geschmiedete Endform eines Pleuels.

### 6.2.1 Einlegeform 1 - Stangenabschnitt

Für das fertig geschmiedete Pleuel wurde mit Hilfe des CAD-Systems eine Masse von 1,06 kg ermittelt. In /30/ ist das Verhältnis von Ausgangs- zu Endform für Teile verschiedener Formklassen dargestellt. Danach ergibt sich für das Pleuel ein Verhältnis von Einsatzmasse zu Fertigteilmasse von 1,4. Als erste zu testende Einlegeform wird ein Stangenabschnitt mit einer Masse von 1,48 kg, der Länge  $l = 170$  mm und dem Radius  $r = 19$  mm gewählt.

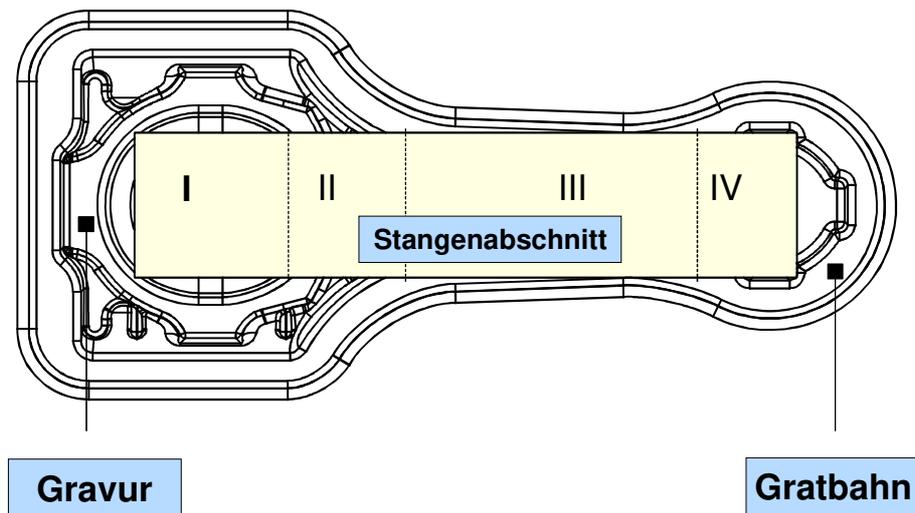


Bild 93: Die einfachste Einlegeform – ein Stangenabschnitt.

Bild 93 zeigt die Einlegeposition des Stangenabschnittes. Die vier Bereiche zur Massenverteilung sind markiert. Bereich I der Einlegeform liegt vollständig innerhalb der Gravur, da in diesem Bereich die Masse des Stangenabschnittes geringer ist, als die des Fertigteils, hier wird voraussichtlich Werkstoff hineinfließen. Im Bereich II liegt der Zylinder zum Teil über der Gratbahn. Ein starker Massenüberschuss befindet sich im Bereich III, dem Steg, in dem der gesamte Abschnitt bereits vor Beginn der Umformung die Gratbahn überdeckt. Im Bereich IV liegt eine Mischsituation vor, d.h., nur Teile des Stangenabschnittes überdecken bereits vor Beginn der Umformung die Gratbahn.

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| <b>Werkstoff:</b>              | C45                    |
| <b>Fließspannung:</b>          | 100 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b>Reibfaktor:</b>             | 0.4                    |
| <b>Dichte:</b>                 | 7.9 kg/dm <sup>3</sup> |
| <b>Umformtemperatur:</b>       | 1150°C                 |
| <b>Stempelgeschwindigkeit:</b> | 0.6 m/s                |
| <b>Schrittweite:</b>           | variabel               |
| <b>Netzdichte:</b>             | variabel               |
| <b>Gratdicke:</b>              | 2 mm                   |

Tabelle 8: Parameter der durchgeführten Simulation

Es wurden Simulationsrechnungen in 10 Schritten durchgeführt. Das Rohteil und die Gesenke wurden dazu mit einem Schnittnetz von 200 Konturen approximiert. Für diese und alle anderen Berechnungen wurde eine Fließspannung von 100 N/mm<sup>2</sup> gewählt, die Umformtemperatur wurde mit 1150°C und die Reibfaktor  $m$  mit 0.4 angenommen (vgl. auch Tabelle 8). In Bild 94 sind die Berechnungsergebnisse dargestellt. Der Prozess wurde auf einem Pentium 266, 96 MByte Hauptspeicher in 5.1 Minuten unter Verwendung von 43540 Knotenpunkten errechnet.

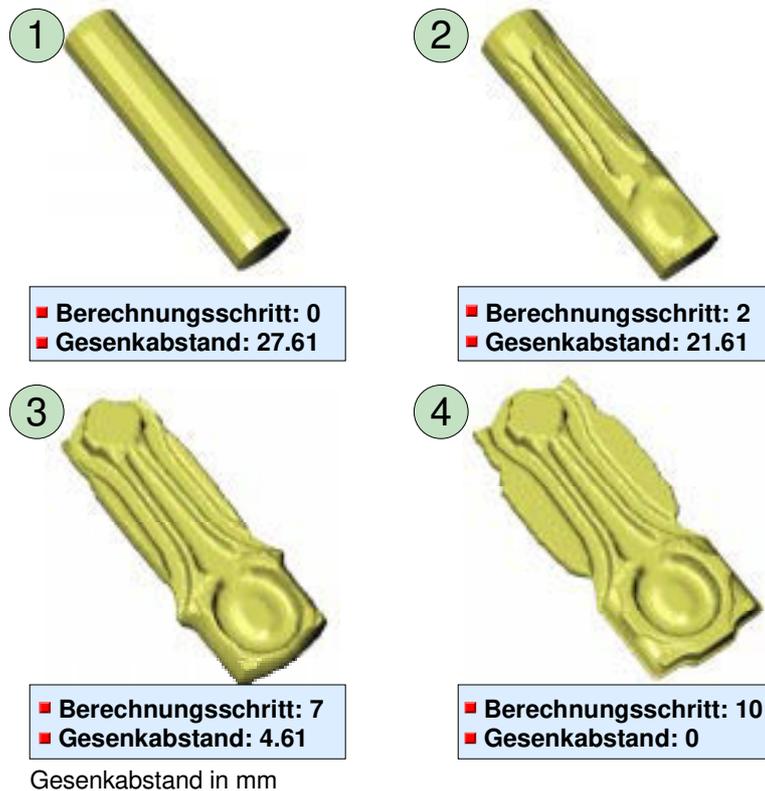


Bild 94: Berechnungsergebnis mit Einlegeform 1

Eine Analyse des in Bild 94 dargestellten Simulationsverlaufes zwingt zum Überdenken der gewählten Einlegeform. Im Bereich des Steges kommt es zu einer überproportionalen Gratbildung, wohingegen das große Auge mit geringer Gratbildung fast vollständig gefüllt wurde (siehe Kontaktanalyse - Bild 95).

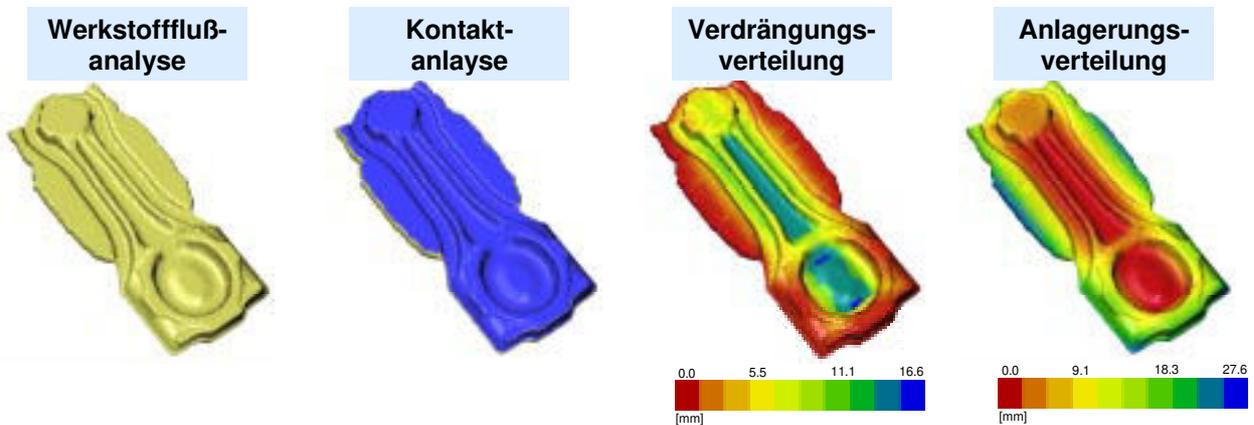


Bild 95: Anwendung von PRINZ/DAT-Analysemethoden zur Beurteilung des Umformprozesses

Die Anlagerungsverteilung zeigt, dass der Werkstoff z.T. mit sehr langen Fließwegen in den Grat fließt. Lange Fließwege treten auch im großen Auge auf. Sie korrespondieren aber mit starker Verdrängung im Zentrum des Auges.

Der Stangenabschnitt kann durchaus für die Herstellung von Pleuel verwendet werden, die Simulationsergebnisse legen dies aber nur für kleine Losgrößen nahe.

## 6.2.2 Einlegeform 2

Entsprechend dem methodischen Ansatz zur Entwicklung der Stadienfolge mit dem Hilfsmittel der Simulation folgt nach dem Test der Verwendbarkeit einer einfachen Einlegeform der Entwurf einer etwas komplexeren Form. Entsprechend der in Bild 90 dargestellten Massenverteilung des Pleuel ist eine Knochenform naheliegend.

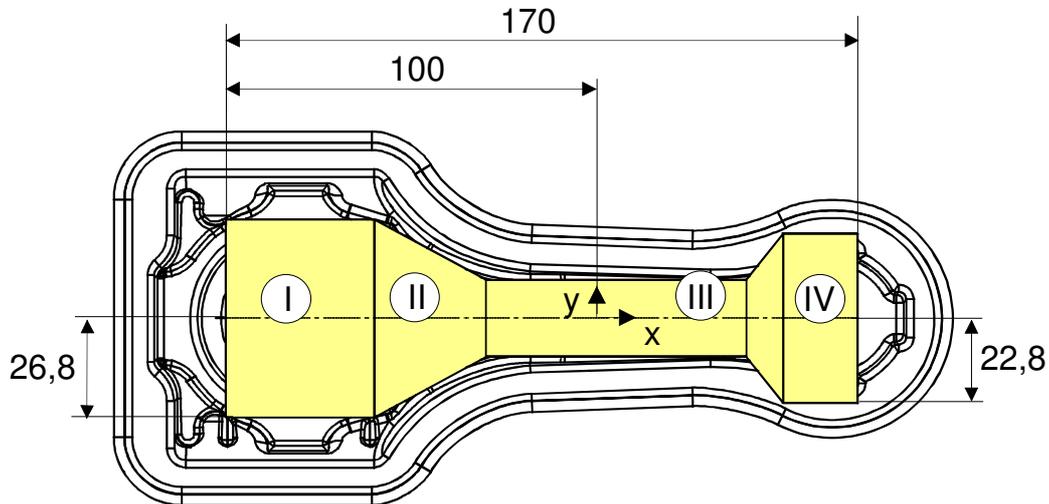


Bild 96: Einlegeform 2 zeigt nur Vorüberdeckung der Gratbahn im Bereich IV

Der in Bild 96 gezeigte Bereich IV, der in dieser Form für das Füllen des kleinen Auges (Lagersitz des Kolbenbolzens) notwendig ist, bewirkt in der Simulation charakteristische Ausprägungen.

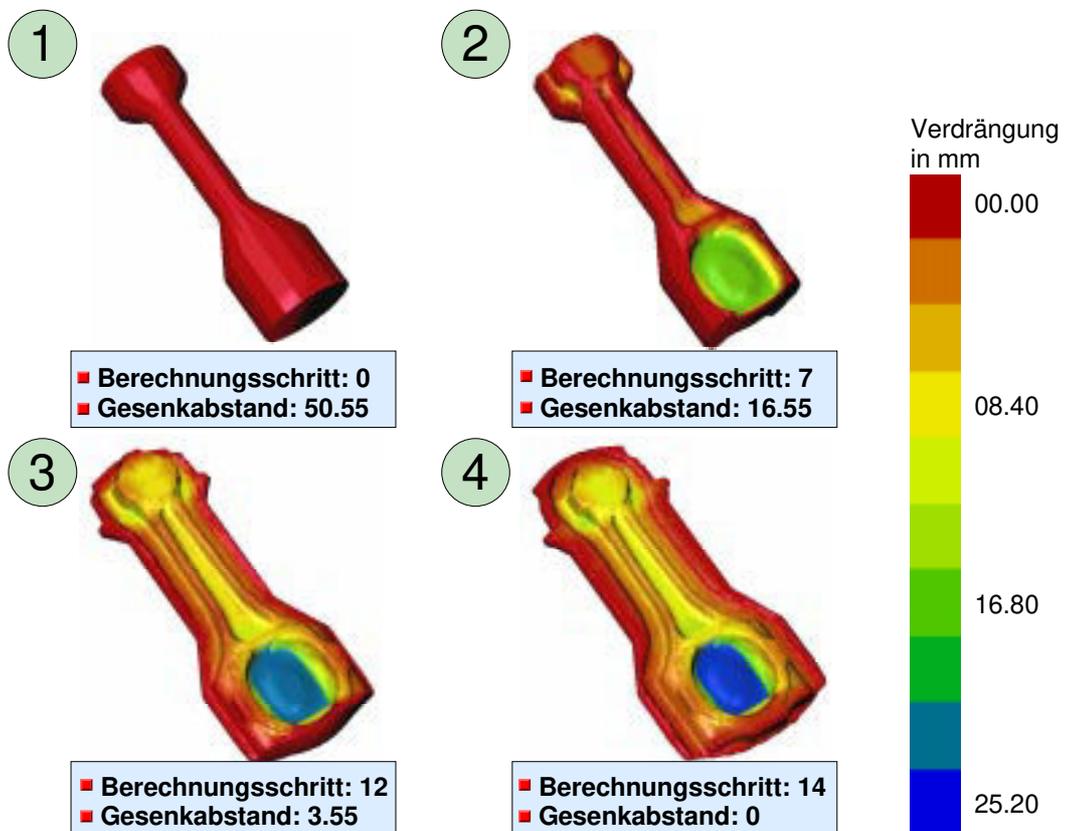


Bild 97: Verdrängungsverteilung (Einlegeform 2)

In Bild 97 ist erkennbar, dass die gezielte Massenverteilung einmal den Effekt geringerer Gratentwicklung im Bereich des Steges mit sich bringt, zum anderen aber auch in diesem Bereich das im Verlaufe des Prozesses verdrängte Volumen reduziert.

### 6.2.3 Einlegeform 3

Die Untersuchung der Vorform 2 zeigte, dass noch erhebliches Optimierungspotential hinsichtlich der Reduzierung des Grates im Bereich des kleineren Auges (Aufnahme Kolbenbolzen) sowie im Steg durch die dortige Reduzierung der Masse besteht. Das Fertigungsverfahren für die Vorform, in den meisten Fällen das Reckwalzen, erlaubt, wie in Bild 92 zu sehen, keine scharfen Kanten, wie sie in der konstruierten Einlegeform 2 auftraten.

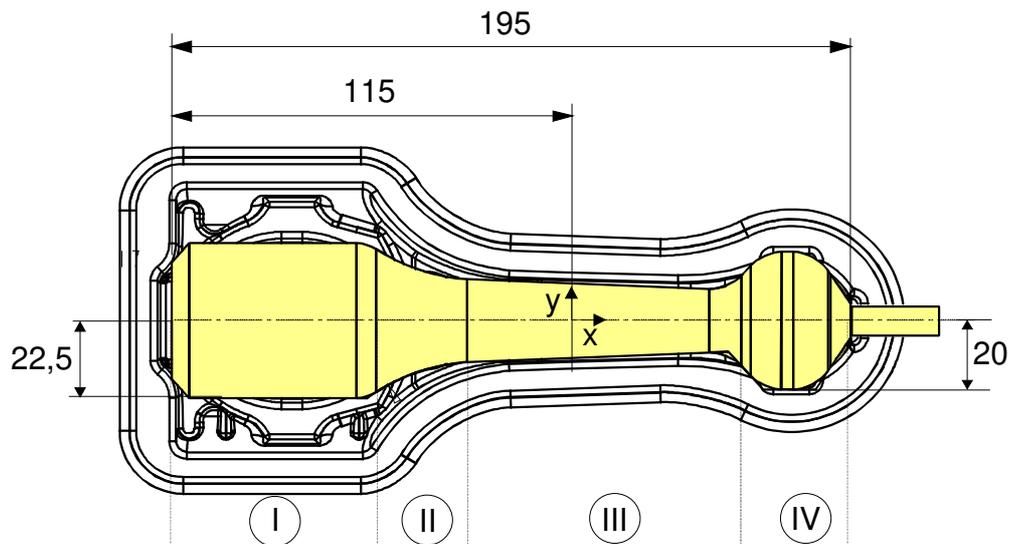


Bild 98: Einlegeform 3 ohne Überdeckung der Gratbahn

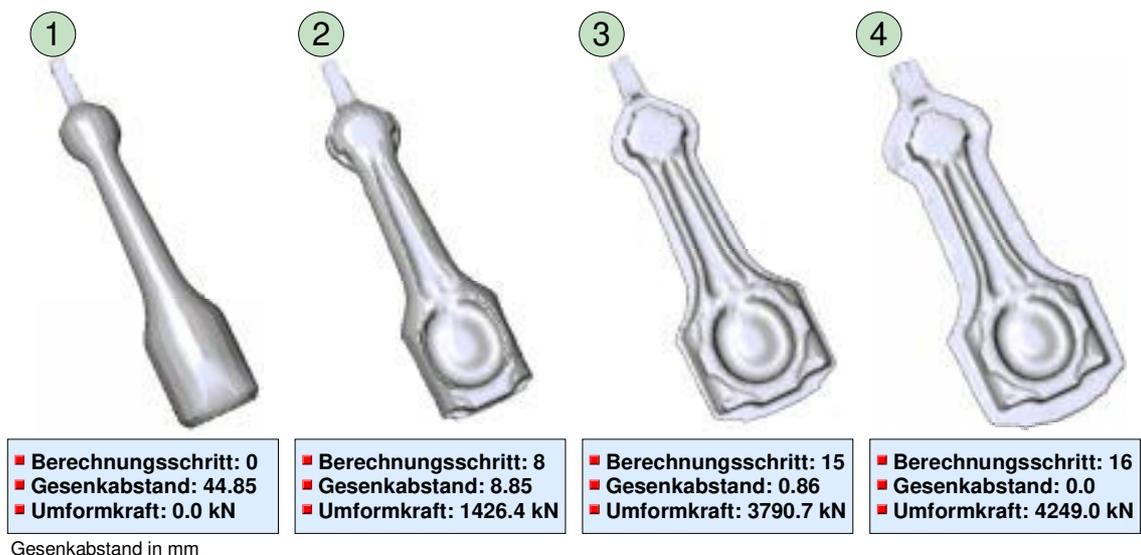


Bild 99: Diskrete Umformschritte der Berechnung der Umformung von Einlegeform 3 zu einem Pleuel

Die in Bild 99 dargestellte Sequenz zeigt, dass Einlegeform 3 einen fast optimalen Werkstofffluss erlaubt. Die Gratbildung ist gleichmäßig, alle Gravurteile werden gut gefüllt. Beim Schmieden mit Grat ist die Anwendung des Vorformverfahrens Reckwalzen empfehlenswert. Abhängig von den in der Fertigung

erreichten Toleranzen der Prozessbedingungen kann dann die Masse der Einlegeform so gewählt werden, dass in jedem Falle das gewünschte Ergebnis erreicht wird.

In der Praxis auftretende Prozessschwankungen, wie sie in Bild 100 deutlich werden, werden von dem Berechnungsmodell nur erfasst, wenn alle Varianten berechnet werden. In Bild 100 ist Einlegeform und Ergebnis des Fertigschmiedens eines Pleuels dargestellt. In dem gezeigten Fall wurde der Reckwalzrohling offensichtlich schräg in das Gesenk gelegt.



Bild 100: Vergleich von Experiment und Simulation.

## 6.3 Getriebe-Lagerbock

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Lagerbock wird zur Zeit bei der Carl Dan. Peddinghaus GmbH & Co. KG (CDP) in Ennepetal hergestellt. Bei dem Bauteil handelt es sich um einen Lagerbock für ein PKW-Getriebe (Bild 101), der zur Abfederung der Beschleunigungskräfte beim Bremsen und Anfahren benötigt wird.

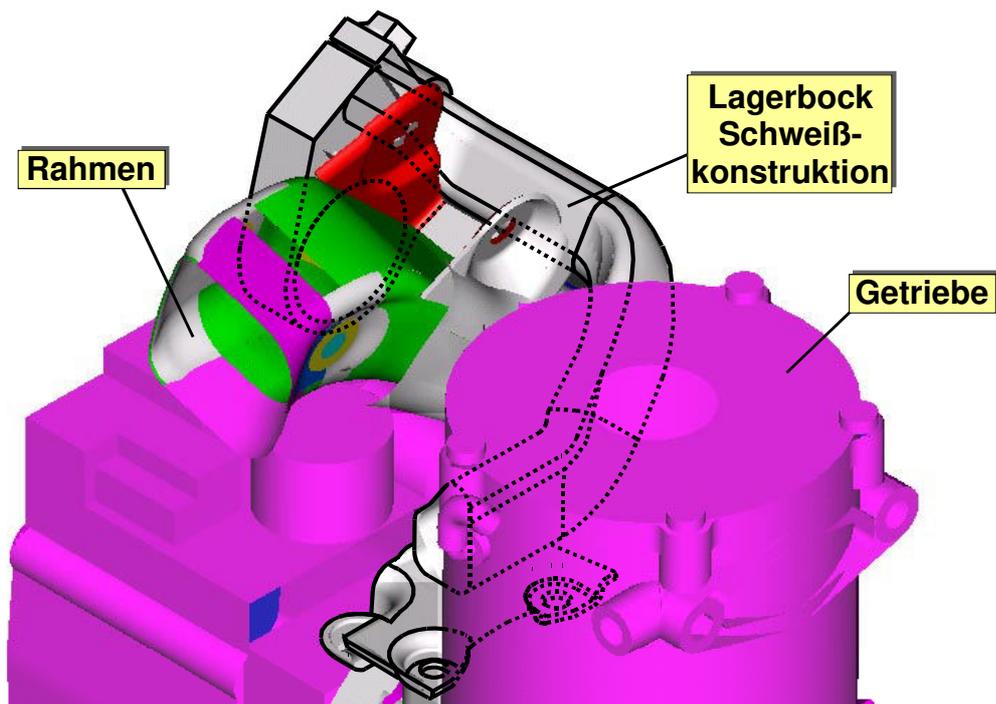


Bild 101: CAD-Modell des Getriebes mit Lagerbock /81/

Nach der funktionsorientierten Schmiedeteilkonstruktion nach MUCKELBAUER /81/ einschließlich der Belastungssimulation konnte nach Konstruktion der Werkzeuge der Fertigschmiedestufe die Simulation des Herstellprozesses erfolgen.

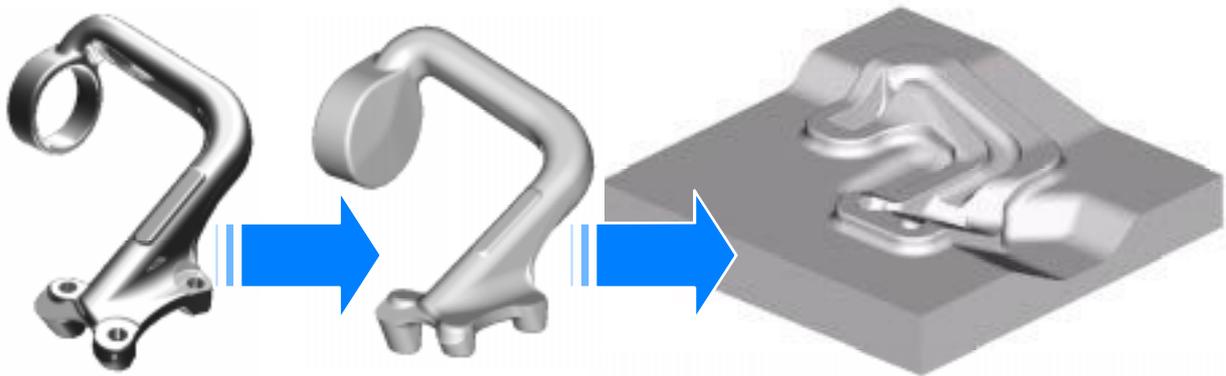


Bild 102: Konstruktionsablauf: Fahrzeugteil – Schmiedeteil - Werkzeuge

Mit Hilfe der Simulation kann die Stadienfolge ausgelegt werden, wie sie in Bild 103 dargestellt ist. Die Entwicklung der Stadienfolge erfolgt rückwärtsschreitend, vom fertigen Schmiedeteil hin zum Rohteil.

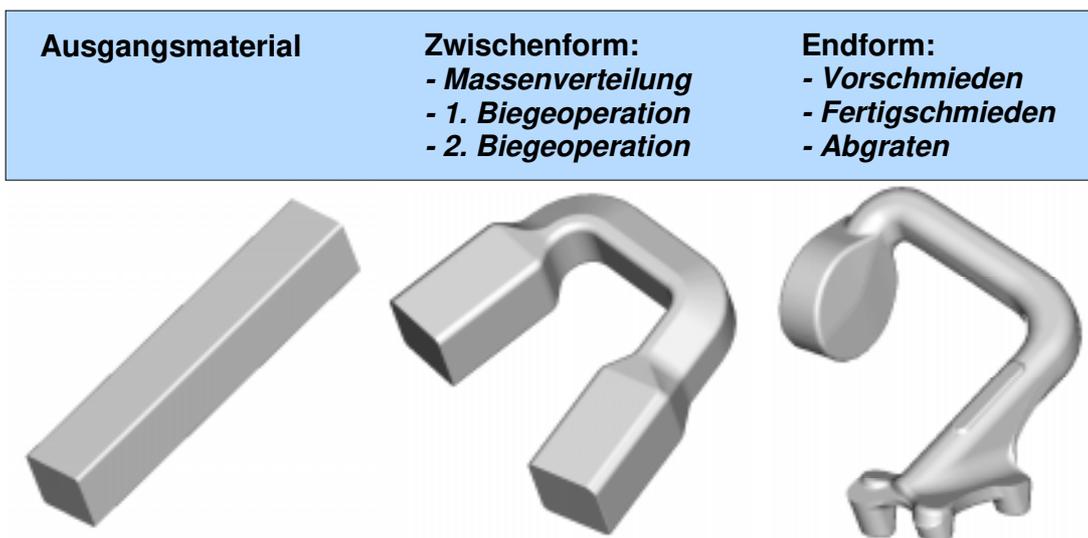


Bild 103: CAD-Modell der Stadienfolge nach /81/

Die Simulation macht die integrierte, gesicherte Werkzeugentwicklung möglich. Eine zu Versuchszwecken ohne Simulation ausgelegte und geschmiedete Stadienfolge für dieses Bauteil ist in Bild 104 dargestellt. Ziel war es, traditionelle Wege der Prozessentwicklung mit neuen, simulationsgestützten Methoden zu vergleichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit einem relativ hohen Massenüberschuss (ca. 40 %) geschmiedet wurde, der als Grat verloren geht.

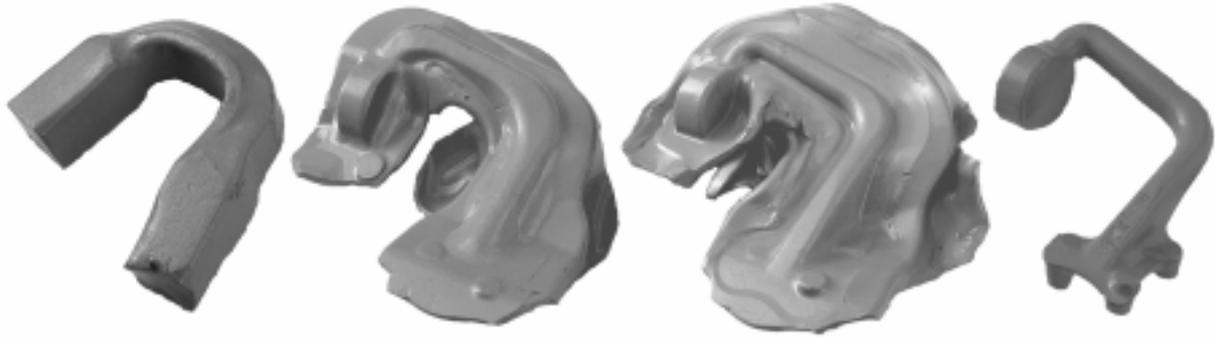


Bild 104: Stadienfolge des Lagerbocks

Für die Durchführung der Simulation der gebogenen Vorform im Endformwerkzeug wurden die in Tabelle 9 dargestellten Parameter verwendet:

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| <b>Werkstoff:</b>              | 16 MnCr 5              |
| <b>Fließspannung:</b>          | 120 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b>Reibfaktor:</b>             | 0.4                    |
| <b>Dichte:</b>                 | 7.9 kg/dm <sup>3</sup> |
| <b>Umformtemperatur:</b>       | 1150°C                 |
| <b>Stempelgeschwindigkeit:</b> | 0.6 m/s                |
| <b>Schrittweite:</b>           | variabel               |
| <b>Netzdichte:</b>             | variabel               |
| <b>Gratdicke:</b>              | 2.5 mm                 |

Tabelle 9: Parameter der durchgeführten Simulation

Die Fließkurve des verwendeten Werkstoffes 16 MnCr 5 wurde /66/ entnommen. Bei einer Schmiedetemperatur von 1150°C ist die Fließspannung bei gegebener Umformgeschwindigkeit annähernd konstant.

Für die Durchführung der Simulation mussten auf Grund der Modelleinschränkungen Veränderungen an den Werkzeugen vorgenommen werden. Die sternförmige Anordnung der Schnittkurven um ein Verdrängungszentrum herum erfordert bei stark gekrümmten Werkstücken den Ausschnitt von Teilen der Werkzeuge und den Einbau von Sperrkästen (Bild 105). Die Berechnung des Werkstoffflusses wird bei entsprechender Anordnung dieser Konstruktionselemente kaum behindert.

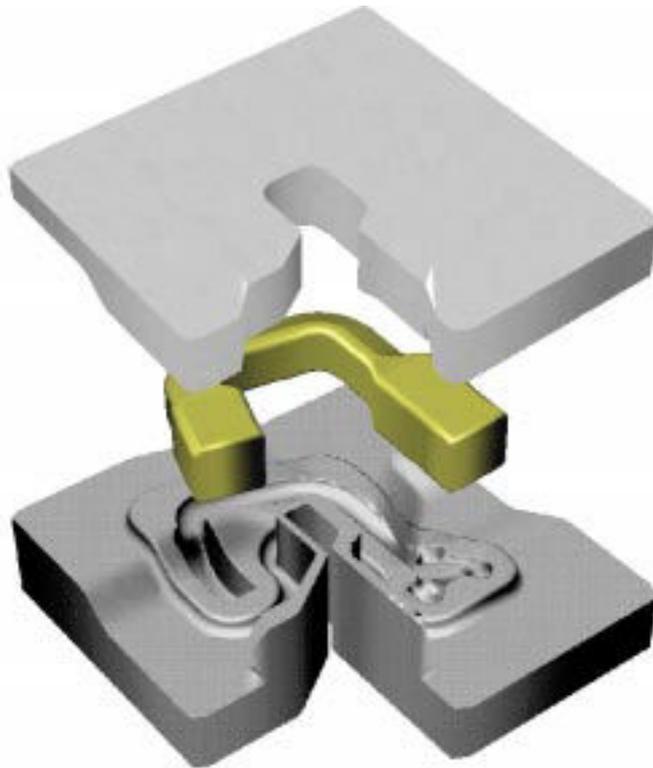
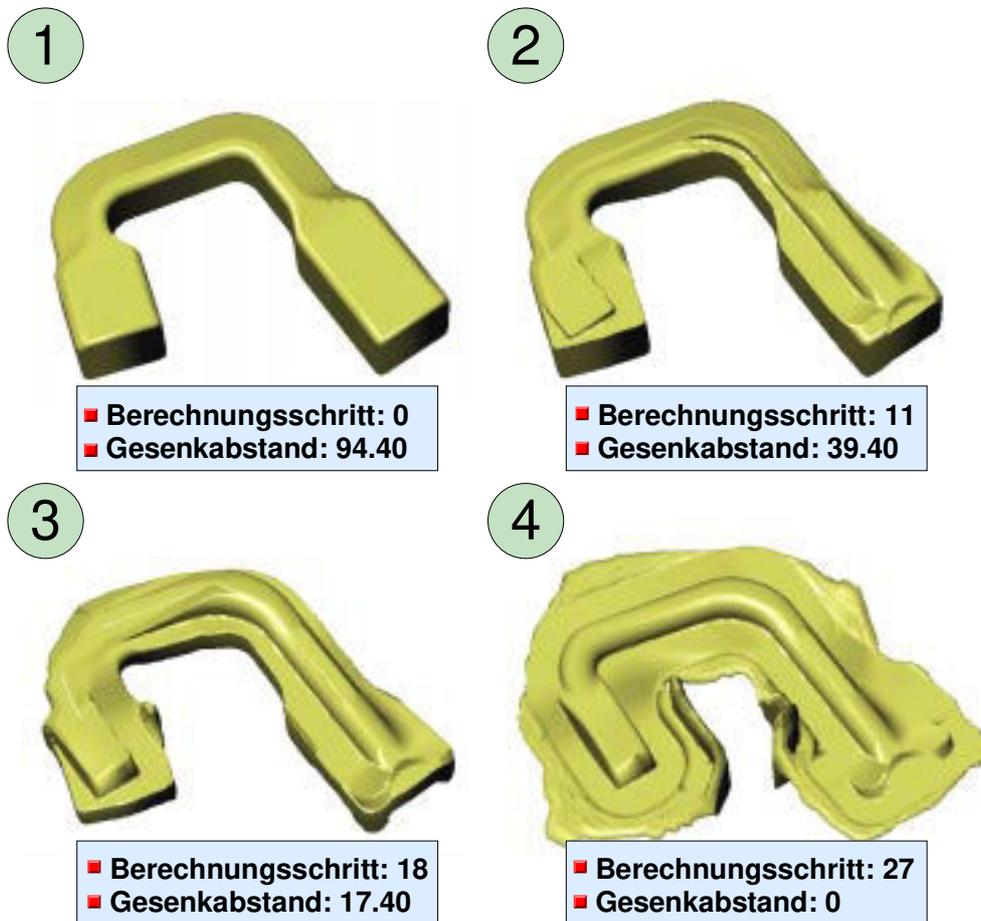


Bild 105: Anordnung der modifizierten Werkzeuge und des Werkstückes für die Simulation

In Bild 106 ist eine Sequenz des Simulationsprozesses dargestellt.



Gesenkabstand in mm

Bild 106: Simulationssequenz des Lagerbocks

Die Berechnung des Schmiedeprozesses des Lagerbocks erfolgte in 27 Schritten, die Schrittweite wurde variabel gesteuert. Zu Beginn des Umformprozesses wurden Umformschritte mit größerer Schrittweite gewählt, am Ende des Prozesses wurde in sehr kurzen Schritten gerechnet. Modelliert wurde der Lagerbock in Pro/ENGINEER, zur Vorbereitung der Simulation wurden die Modelle der Einlegeform und der Werkzeuge durch 218 Schnittkurven approximiert. Die Berechnung dauerte 13.5 Minuten (Pentium II, 400 MHz, 128 MByte). Die berechnete maximale Umformkraft beträgt 17982.81 kN.

Die in [Bild 107](#) gezeigte Gegenüberstellung des Simulationsergebnisses mit dem fertiggeschmiedeten, noch nicht entgrateten Lagerbock zeigt, dass die entscheidenden charakteristischen Merkmale des Grates durch die Simulation mit PRINZ vorhersagbar sind. Das trifft insbesondere auf die im inneren Bereich und wie [Bild 106](#) zeigt, in der letzten Phase der Umformung aufeinandertreffenden Materialfronten des Grates zu, die dort am Ende zu erheblichen Materialaufwerfungen führen (2). Bei Nutzung von Simulationswerkzeugen vor der Fertigung der Werkzeuge hätte das durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden können.

Aber auch andere, die Form des Grates bestimmende Merkmale sind im Simulationsmodell zu finden, wenn auch nicht absolut identisch.

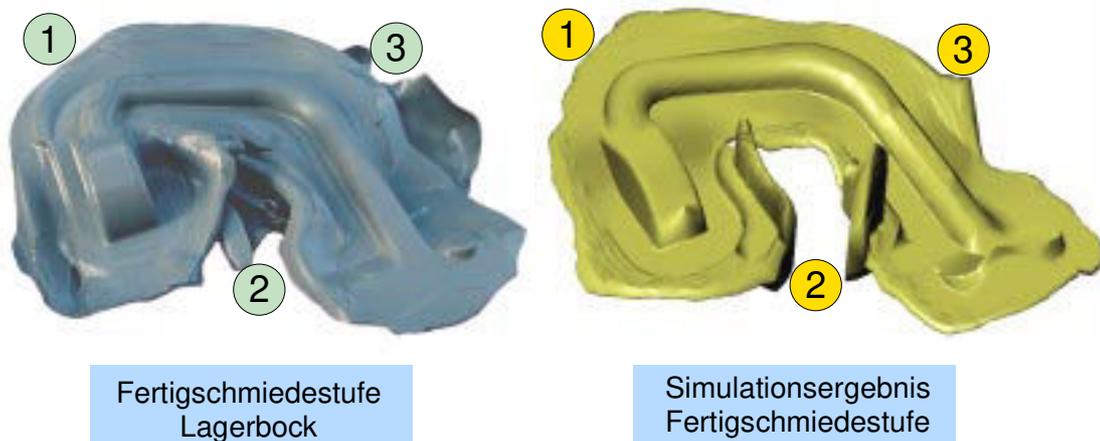


Bild 107: Gegenüberstellung geschmiedeter und simulierter Lagerbock. Charakteristische Merkmale sind: (1) geringe Ausprägung des Grates; (2) starke Bildung von Verwerfungen des Grates; (3) unkontrollierter Werkstofffluss über die Gratrille hinaus.

Neben der visuellen Analyse des Werkstoffflusses stellt PRINZ dem Anwender noch eine Reihe anderer Funktionen zur Verfügung, die für eine gründliche Prüfung des Umformprozesses von Nutzen sein können. In [Bild 108](#) ist die bereits in [Bild 106](#) dargestellte Sequenz mit Hilfe der Kontaktanalyse näher untersucht worden.

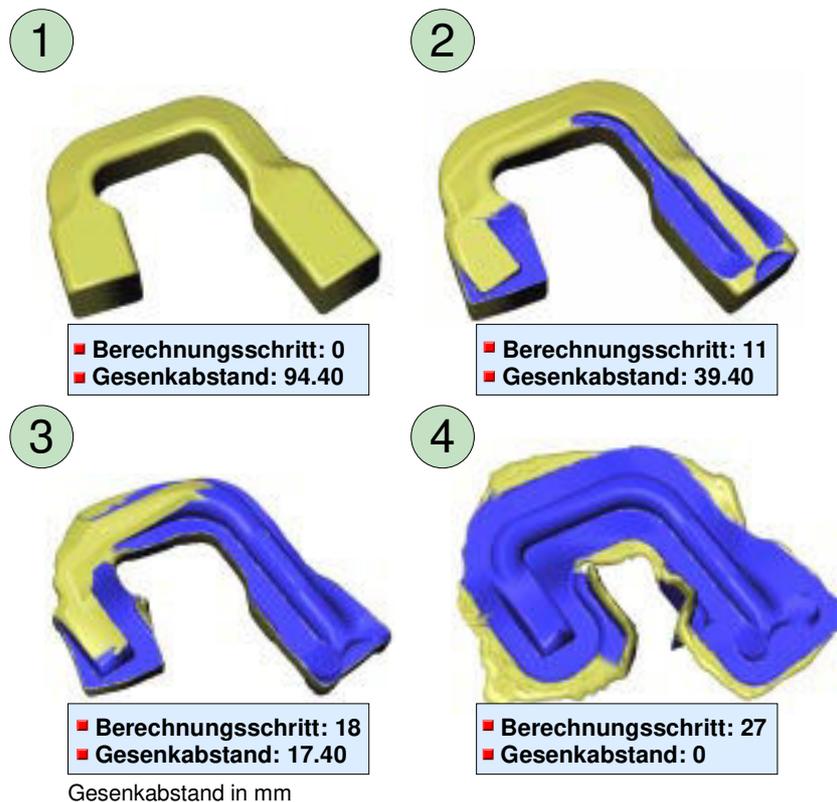


Bild 108: Kontaktanalyse des Lagerbockes

Die Kontaktanalyse zeigt, dass die nach oben gewandte Seite des Fußbereiches des Lagerbockes (rechts) schon sehr frühzeitig die vollständige Formfüllung erreicht, im Gegensatz zum Auge, welches sich erst sehr spät vollständig füllt. Im Fußbereich ist demnach ein geringerer Materialaufwand für die Erreichung des Qualitätszieles notwendig. Demgegenüber beginnt im Bereich des Auges der Werkstoff sehr frühzeitig in die Gratbahn abzufließen, wodurch Schwierigkeiten bezüglich der Formfüllung auftreten.

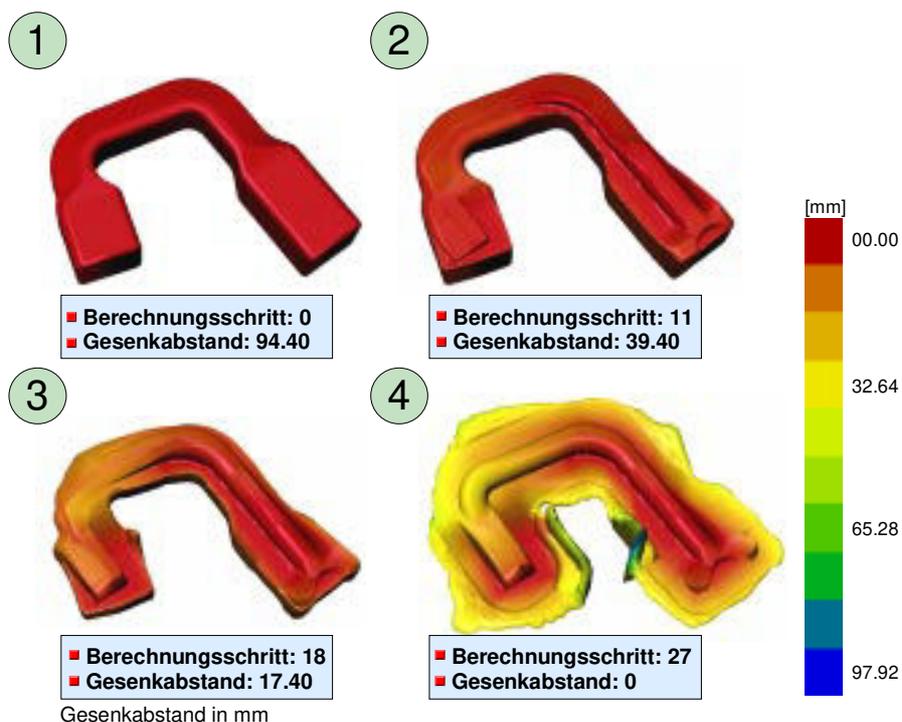


Bild 109: Anlagerungsverteilung über der Oberfläche des Schmiedeteiles, bezogen auf den Gesamtprozess.

Die in [Bild 109](#) gezeigte Anlagerungsverteilung über der Oberfläche des Schmiedeteils bietet die Möglichkeit, die lokale Intensität des Werkstoffflusses zu beurteilen. Fließwege von bis zu 97.92 mm in den Grat hinein zeigen, dass dieser Versuchsumformprozess ein großes Verbesserungspotential aufweist. Die in [Bild 109](#) dargestellten Schritte 1 bis 3 zeigen, dass die größten Materialbewegungen erst gegen Ende des Umformprozesses stattfinden, was mit einiger Erfahrung aus der Praxis zu erwarten war. Die extrem schnelle Materialbewegung in den mittleren Bereich des Werkstückes hinein signalisieren aber auch eine große Gefahr für die Standzeit der Werkzeuge, da die damit verbundenen in der Wirkfuge auftretenden hohen Relativgeschwindigkeiten von Werkstoff und Werkzeug zueinander bei hohem Druck und bei Schmiedetemperatur zu großem mechanischen und thermischen Verschleiß führen.

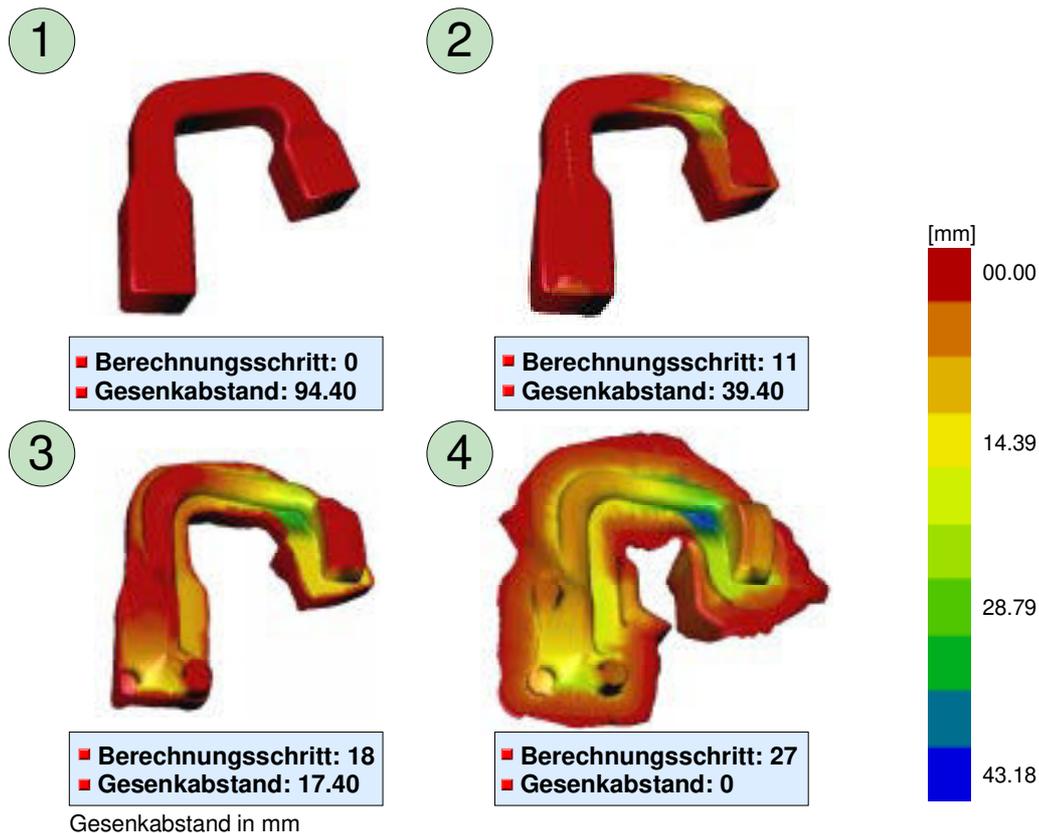


Bild 110: Verdrängungsverteilung über der Oberfläche an der Unterseite des Lagerbockes.

Zur gründlichen Analyse des Schmiedeprozesses mit PRINZ ist die in [Bild 110](#) dargestellte Verdrängungsverteilung notwendig. Sie zeigt, aus welchen Zonen des Werkstückes sehr stark Werkstoff verdrängt wird. Auch hier können Rückschlüsse auf die Belastung der Werkzeuge gezogen werden. Hohe Verdrängungswerte sowie deren Einleitung schon zu Beginn der Umformung, wie beim dargestellten Lagerbock der Fall, zeigen, dass in den dazugehörigen Werkzeugbereichen eine langandauernde hohe Flächenpressung zu erwarten ist, die meist mit, begründet durch abfließenden Werkstoff aus diesem Bereich, hohen relativen Geschwindigkeiten in die angrenzenden Bereiche gekoppelt ist.

Der berechnete Kraft-Weg-Verlauf zeigt ein Kraftmaximum bei ca. 18.000 kN ([Bild 111](#)). Der Verlauf ist nach der in Kapitel 4.7 *Umformkraftberechnung* vorgestellten Methode berechnet. Im Versuch wurde auf einer Kurbelpresse der Firma Eumuco mit einer Nennkraft von 20.000 kN eine Auslastung von bis zu 100% ermittelt, was einer Maximalkraft von höchstens 20.000 kN entspricht.

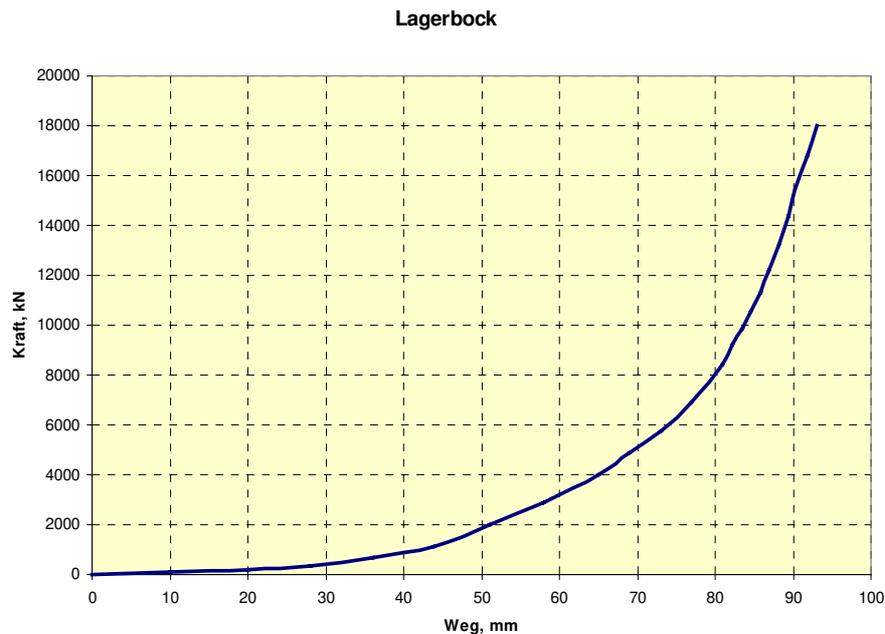


Bild 111: Berechneter Kraft-Weg-Verlauf

Bei einer Neuauslegung eines solchen Umformprozesses kann nach der Berechnung des Fertigschmiedens, je nachdem, ob alle Stufen des Prozesses auf einer Presse geschmiedet werden sollen, und bei Berücksichtigung eines möglichen Berechnungsfehlers von bis zu 10% für flache Langteile, eine Presse mit einer Nennkraft zwischen 20.000 kN für die Fertigschmiedestufe bzw. ca. 50.000 kN für alle Stufen empfohlen werden.

## 6.4 Radträger

Die CAD-Modelle der Umformwerkzeuge und eines zu verwendenden Knüppels für die Produktion eines Radträgers einer PKW-Hinterachse wurden im Vorfeld eines vom Industrieverband Deutscher Schmieden (IDS) durchgeführten FEM-Workshops (Hagen, 22.10.97) an Hersteller kommerzieller Schmiede-Simulationssoftware verteilt, mit dem Ziel, einen Vergleich zwischen den angebotenen 3D-FEM-Systemen zu erhalten /9/. Bekannt wurde der Workshop unter dem Namen „Simulations-Benchmark“. PRINZ wurde hier nicht getestet. Nach dem Workshop bestand die Möglichkeit, die CAD-Daten für eigene Berechnungen zu nutzen.

In Bild 112 ist das Berechnungsergebnis der letzten Stufe des 3D-Teiles der Firma Transvalor abgebildet. Diese Berechnung wurde mit Forge 3 durchgeführt. Da Transvalor der einzige Anbieter von Simulationssoftware war, welcher die gestellten Aufgaben vollständig und zufriedenstellend erfüllen konnte, wurde dieses Simulationsergebnis als Referenz für die Berechnungsergebnisse mit PRINZ ausgewählt.

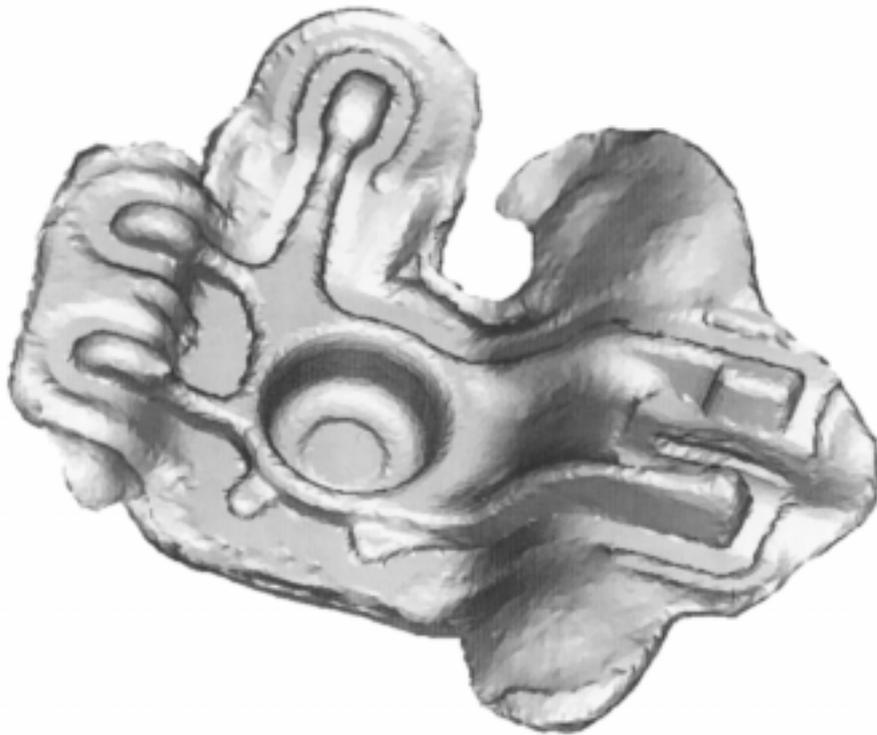


Bild 112: Benchmark-Berechnungsergebnis der Firma Transvalor (FORGE 3)

Die CAD-Modelle der Umformwerkzeuge bestanden aus zwei Stauchwerkzeugen für die erste und die zweite Stufe, einem Werkzeugsatz zur Massenverteilung sowie Vorform- und Fertigschmiedegesenken. Einlegeform der ersten Stufe war ein Knüppel, der bis zu einem bestimmten Grade anzustauchen war, dann um 90° um die Längsachse zu drehen war, um eine weitere Anstauchung vorzunehmen mit dem Ziel der Längung und Verjüngung des Knüppels auf einer Seite. Insgesamt handelte es sich bei der im Simulationssystem abzubildenden Stadienfolge um einen 5-stufigen Prozess (Tabelle 10).

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Stufe 1: Anstauchen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeug 1</li> <li>• Einlegeform: Knüppel</li> <li>• Berechnungszeit: 2.2 min</li> <li>• maximale Umformkraft: 4361 kN</li> </ul>               |  |
| <p><b>Stufe 2: Stauchen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeug 1</li> <li>• Einlegeform: aus Stufe 1 (berechnet)</li> <li>• Berechnungszeit: 9.2 min</li> <li>• maximale Umformkraft: 6152 kN</li> </ul> |  |

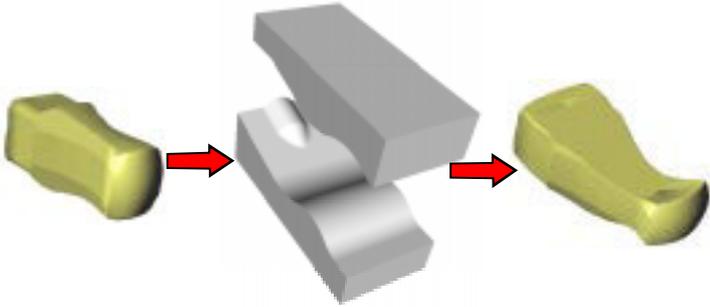
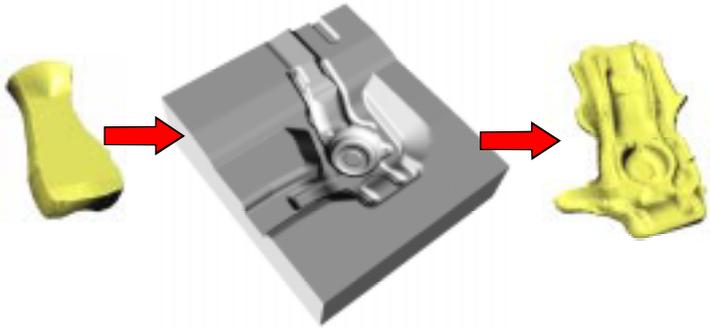
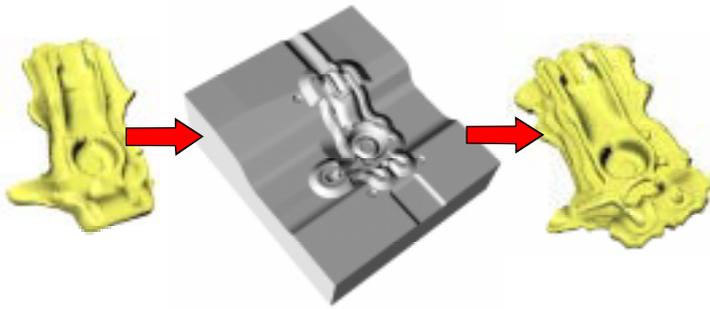
|  |   |
|--|---|
| <p><b>Stufe 3: Längen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeug 2</li> <li>• Einlegeform: aus Stufe 2 (berechnet)</li> <li>• Berechnungszeit: 7.3 min</li> <li>• maximale Umformkraft: 7110 kN</li> </ul>        |   |
| <p><b>Stufe 4: Vorformen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeug 3</li> <li>• Einlegeform: aus Stufe 3 (berechnet)</li> <li>• Berechnungszeit: 13.2 min</li> <li>• maximale Umformkraft: 24815 kN</li> </ul>   |   |
| <p><b>Stufe 5: Fertigformen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkzeug 4</li> <li>• Einlegeform aus Stufe 4 (berechnet)</li> <li>• Berechnungszeit: 46.2 min</li> <li>• maximale Umformkraft: 18014 kN</li> </ul> |  |

Tabelle 10: Fünfstufiger Schmiedeprozess zur Herstellung eines PKW-Radträgers aus Stahl

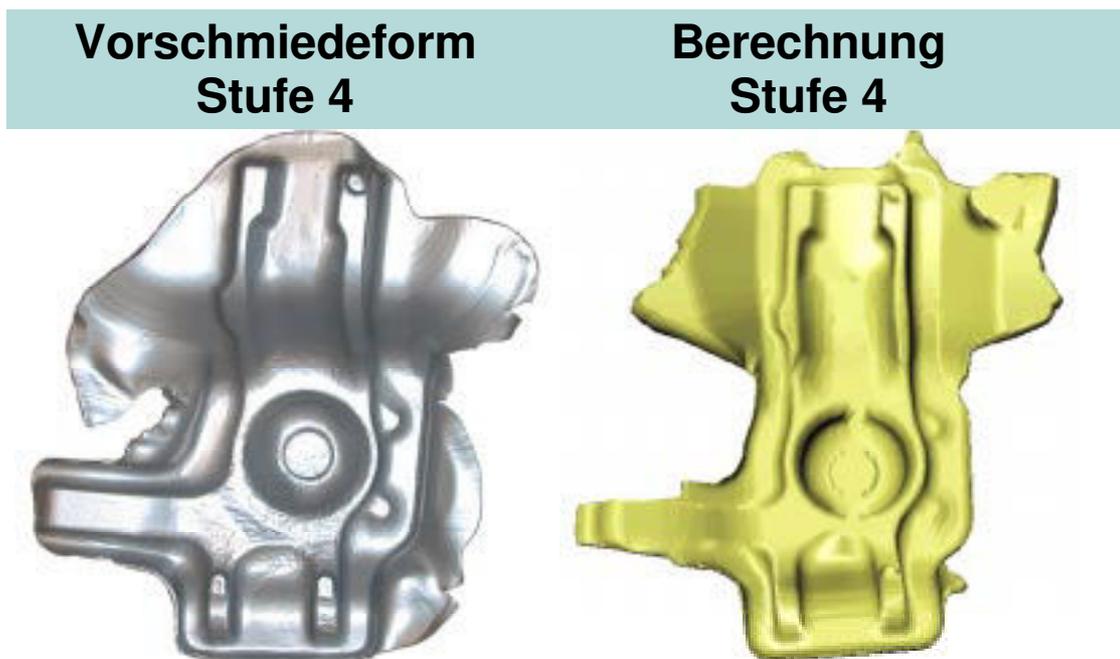


Bild 113: Vergleich Vorschmiedeergebnis (Stufe 4) und dem Berechnungsergebnis dieser Stufe.

Die Berechnung des gesamten Schmiedeprozesses erfolgte auf der Grundlage der Einlegeform „Knüppel“ der ersten Umformstufe. Alle weiteren Zwischenformen wurden mit PRINZ berechnet. Die Berechnungszeiten für die mit bis zu 169000 Knoten vernetzten Teile steigerten sich auf bis zu 46 Minuten auf einem Rechner der Leistungsklasse Pentium II 400 MHz. In Tabelle 11 sind die für die PRINZ-Berechnung notwendigen Parameter aufgelistet.

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| <b>Werkstoff:</b>              | Cf 53                  |
| <b>Fließspannung:</b>          | 80 N/mm <sup>2</sup>   |
| <b>Reibfaktor:</b>             | 0.4                    |
| <b>Dichte:</b>                 | 7.9 kg/dm <sup>3</sup> |
| <b>Umformtemperatur:</b>       | 1150°C                 |
| <b>Stempelgeschwindigkeit:</b> | 0.6 m/s                |
| <b>Schrittweite:</b>           | variabel               |
| <b>Netzdichte:</b>             | variabel               |
| <b>Gratdicke:</b>              | 3 mm                   |

Tabelle 11: Parameter der durchgeführten Simulation des Radträgers

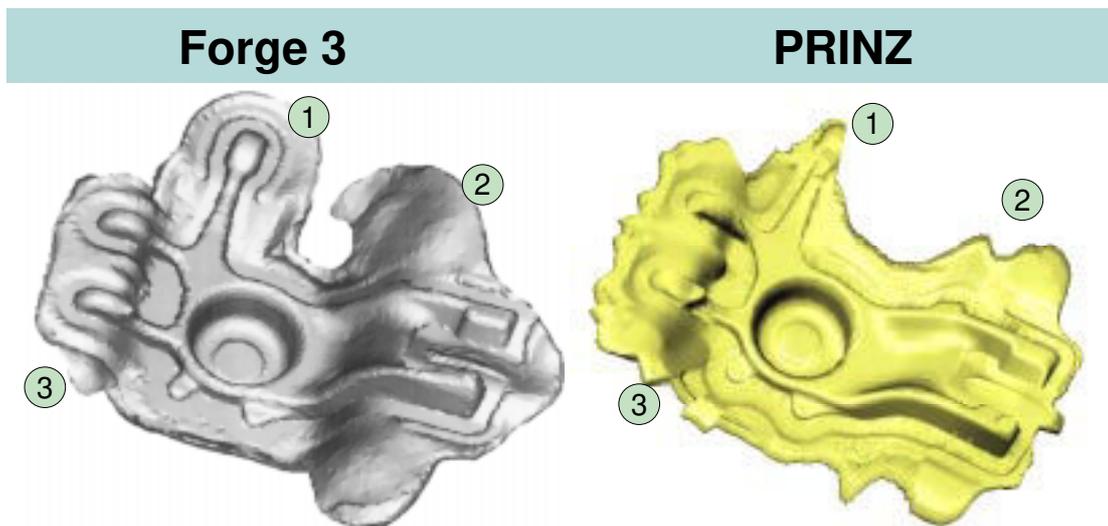


Bild 114: Vergleich der Berechnungsergebnisse des kommerziellen FEM-Programms Forge 3 (Transvalor) und von PRINZ.

Der in Bild 114 gezeigte Vergleich der Berechnungsergebnisse von FORGE 3 und PRINZ macht deutlich, dass der größte Unterschied sich in der nach PRINZ wahrscheinlich nicht möglichen Formfüllung im Bereich (1) ausbildet. Bereich (2) zeigt in der FEM-Berechnung eine charakteristische Haken-Ausprägung, die mit PRINZ auf Grund der internen Modellstruktur nicht abgebildet werden kann. Statt dessen wird durch PRINZ in diesem Bereich eine Materialanhäufung im Grat angezeigt, die durch einen kontinuierlicheren Übergang zu Bereich (1) gekennzeichnet ist. Im Bereich (3) wird durch beide Programmsysteme eine charakteristische Nase berechnet.

## 7 Ausblick

Die Forderung nach schneller Simulationssoftware in der Schmiedeindustrie wird auch in Zukunft Weiterentwicklungen notwendig machen. Die Nutzung der Software muss ungeachtet aller Verbesserungen in Hinblick auf die Genauigkeit und Anwendbarkeit einfach zu nutzen bleiben.

Für eine uneingeschränkte Verwendbarkeit von PRINZ in der gesamten Entwicklungsprozesskette von Schmiedeteilen und –werkzeugen müssen noch einige Voraussetzungen erfüllt werden:

- Die Abkehr von der Verwendung sternförmig angeordneter Querschnitte zur Vernetzung der Werkzeuge und des Werkstückes. Auf diese Weise können in Zukunft Schmiedeteile beliebiger Form berechnet werden.
- Berücksichtigung von mehrfach wirkenden Werkzeugsystemen. In Zukunft könnte nicht nur die Wirkung von einfach geteilten Werkzeugen in der Berechnung Berücksichtigung finden, auch weitere Stempel oder gar mit Hilfe weiterer Antriebe vorgenommene Fließpressen in beliebige Richtung würde Eingang in die Berechnung finden.
- Berücksichtigung der während der Umformung veränderlichen Stößel- und damit Umformgeschwindigkeiten.
- Kopplung mit der Berechnung der thermischen Vorgänge während des Umformens. Hier ergeben sich Potentiale z.B. beim Fließen von Werkstoff in enge Rippen, in denen der Werkstoff auf Grund großer Kontaktflächen im Verhältnis zum sich dort befindlichen Volumen durchgängig schnell abkühlt. Abhängig von diesen Temperaturänderungen steigt der Widerstand gegen Verformung, der im Realprozess zu immer wiederkehrenden Formfüllungsfehlern führt.
- Anbindung einer Werkstoffdatenbank an PRINZ. Die derzeit in der Warmmassivumformung verbreiteten Stahlwerkstoffe werden vom PRINZ-Fließmodell berücksichtigt. Die Werkstoffdatenbank müsste die Abhängigkeit der Fließspannung von der Temperatur, dem Umformgrad und der Umformgeschwindigkeit beinhalten.
- Für die Positionierung des Werkstückes zwischen den Werkzeugen ist ein automatisiertes System nützlich, welches auch die selbsttätige Positionierung beim Wechsel der Werkzeuge durchführt. Für das Programm SuperForge wurde z.B. ein System realisiert, welches nach den Gesetzen der Gravitation arbeitet /86/.
- Verfeinerung der Kraftberechnungsalgorithmen zur Erhöhung der Genauigkeit der Voraussage der für die Umformung nötigen Umformkraft.
- Parallelisierung des PRINZ-Kerns zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit unter Nutzung mehrerer CPU's zur Berechnung des Werkstoffflusses.
- Berücksichtigung von Biegeanteilen.
- Erkennen von Schmiedefehlern in der Oberfläche des Schmiedeteiles.
- Berechnung der Vergleichsformänderung.

## 8 Zusammenfassung

PRINZ wurde entwickelt, um im Konstruktionsprozess frühzeitig Informationen über den Fertigungsprozess zu erhalten. Der bisherige Weg, die reine Modellierung von Geometrie, wird durch den Einsatz von Simulationstechniken ergänzt durch die Prozessmodellierung, welche sich wiederum optimierend auf den Geometriemodellierungsprozess auswirkt. Diese Wechselwirkung ist nun möglich, ohne dass aufwendige Versuche auf Umformmaschinen notwendig werden.

Bei Anwendung des Softwaresystems wird der Konstrukteur mit einer neuen Vorgehensweise bei der Entwicklung der Stadienfolge konfrontiert. Beibehalten wird die von der Fertiggeometrie ausgehende, rückwärtsgerichtete Vorgehensweise, d.h. ausgehend von den Fertigschmiedewerkzeugen werden sukzessive Vorformen und Vorformoperationen entworfen, bis die komplette Stadienfolge vom einfachen Stangenabschnitt bzw. Knüppel bis zum Schmiedestück konstruiert ist. Dabei wurde bisher meist auf der Basis von langjährigen Erfahrungen eine möglichst optimale Gestaltung für jede Einlegeform gesucht. Unter Nutzung von PRINZ können nun alle Entwicklungsschritte am CAD-System durch Simulation verifiziert und optimiert werden. Während der Entwicklung stehen damit neue, qualitativ hochwertige Informationen im Konstruktionsprozess zur Verfügung, die für eine erfolgreiche Arbeit unerlässlich werden (Bild 115). Die Schleife [Entwicklung – Versuch – Entwicklung] kann dabei durchbrochen werden.

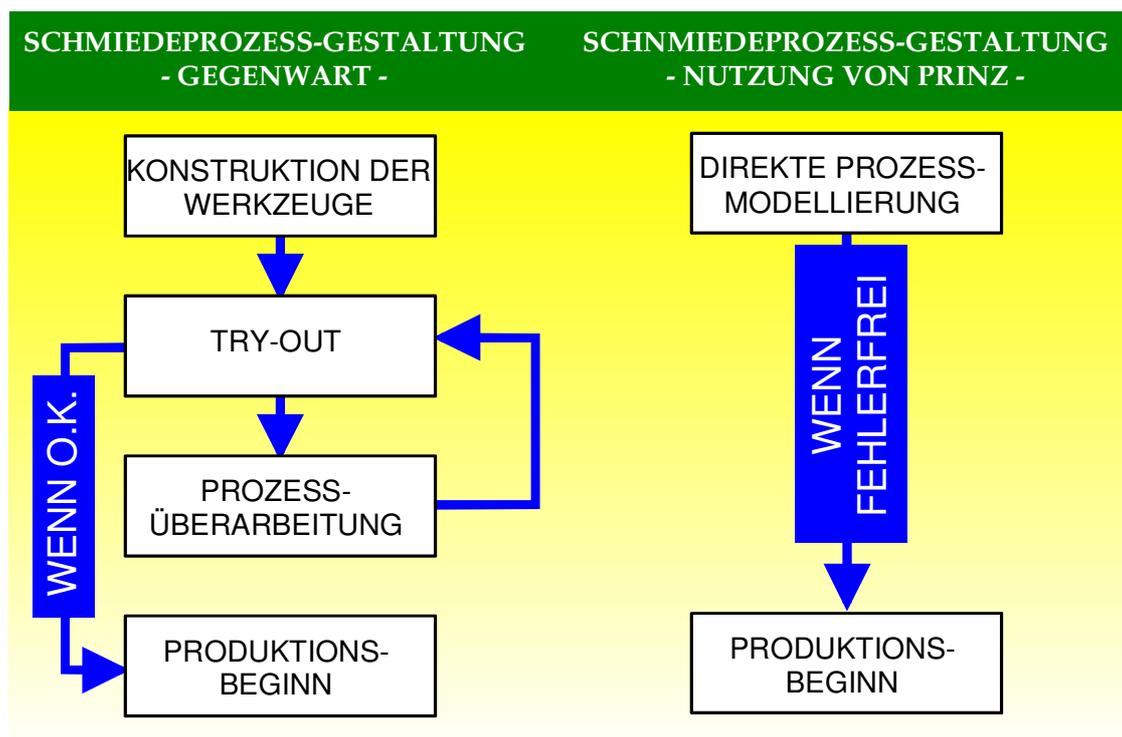


Bild 115: Durch den Übergang zur konstruktionsintegrierten Prozessmodellierung wird der Entwicklungsprozess der Stadienfolge erheblich abgekürzt. Im Idealfalle ist in Zukunft der Beginn der Produktion ohne Try-out möglich.

PRINZ erlaubt die Berechnung von Schmiedeprozessen von Langteilen ohne Biegeanteil mit sehr guter Berechnungsgenauigkeit. Der Fokus der Entwicklung lag auf kurzen Rechenzeiten, um die Konstruktionsintegration zu erreichen. Dieses Ziel wurde erreicht. Durch die Nutzung der STL-Schnittstelle für die Datenaufbereitung kann PRINZ mit jedem gängigen Volumenmodellierer genutzt

werden. Das Zusammenwirken mit Flächemodellierern wie Euklid gestaltete sich aufgrund des fehlerhaften STL-Daten-Exports dieser Systeme schwierig. Die Pilotsoftware läuft auf gängigen Windows NT – PC.

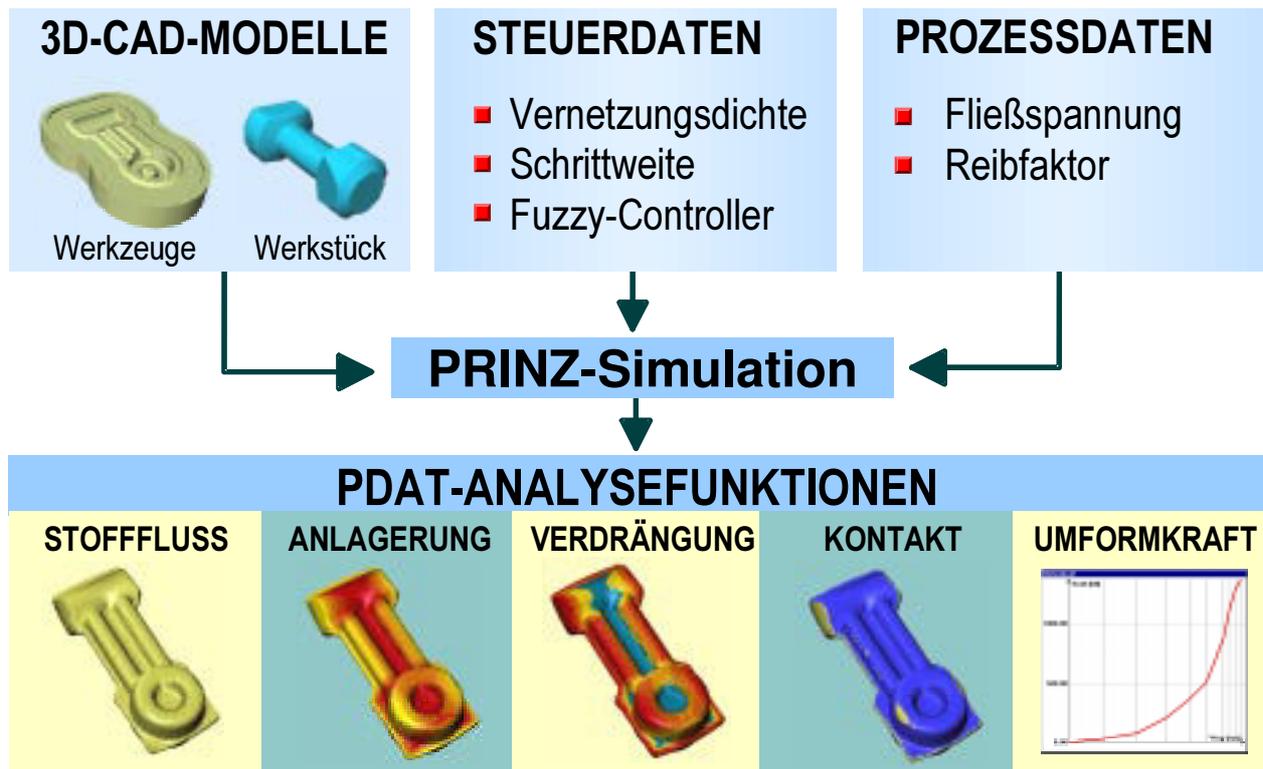


Bild 116: Anwendung von PRINZ

Die Benutzerschnittstelle von PRINZ ist für den Gebrauch im Bereich der Konstruktion entworfen. Für die Benutzung ist Erfahrung notwendig, Grundlagenkenntnisse im Bereich des Einsatzes von numerischen Berechnungsverfahren sind nicht notwendig.

PRINZ bietet verschiedene Analysemethoden, die über die Analysesoftware PRINZ/DAT genutzt werden können. Neben Stofffluss- und Kontaktanalyse kann die Anlagerungsverteilung und die Verteilung der Verdrängung über der Oberfläche des Schmiedeteils genutzt werden. Anlagerungs- und Verdrängungsverteilung stehen sowohl für den gesamten Umformprozess als auch für einzelne Umformschritte zur Verfügung. Die approximierten Umformkraft kann jederzeit, aufgetragen über den Stößelweg, abgerufen werden (Bild 116).

Für die Anbindung der Software an das Internet können automatisch animierte Bitmaps erzeugt werden. Dadurch ist die Auswertung der Simulationsergebnisse ohne die Installation von PRINZ/DAT möglich. Der Aufwand zum Transport der Daten verringert sich deutlich.

Zur Berechnung kompletter Stadienfolgen wird der Export von STL-Daten aus jedem beliebigen Umformschritt heraus unterstützt.

## 9 Schrifttum

- /1/ Lange, K. Umformtechnik. Band 1: Grundlagen, Springer-Verlag Berlin, (1984)
- /2/ Lippmann, H.; Mahrenholz, O. Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe. Bd. I, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1967)
- /3/ Steck, E. Numerische Behandlung von Verfahren der Umformtechnik. Verlag W. Girardet, Essen (1971)
- /4/ Drucker, D. C. On the postulate of stability of material in the mechanics of continua. *J. de Mécanique* 3 (1964), S. 235-249
- /5/ Kobayashi, S.; Thomson, E. G. Upper and Lower Bound Solutions to Axisymmetric Compression and Extrusion Problems. *Int. J. Mech. Sci.* 7 (1965), S. 127-143
- /6/ Du, X. Ein Beitrag zur Simulation des Materialflusses und Berechnung der Kraft beim Gesenkschmieden mit Grat. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuer- und Regelungstechnik, Nr. 670, VDI-Verlag Düsseldorf (1997)
- /7/ Thomson, E.G.; Chang, Ch. T.; Kobayashi, S. *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing.* Macmillan New York (1965)
- /8/ Besdo, D. Haupt- und Gleitlinienverfahren bei axialsymmetrischer starrplastischer Umformung. Dr.-Ing.-Diss. TU Carolo-Wilhelmina Braunschweig (1969)
- /9/ N.N. IDS-FEM-Workshop, Industrieverband Deutscher Schmieden, Hagen, 22.10.97 (1997)
- /10/ Prager, W.; Hodge, P.G. *Theorie plastischer Körper.* Springer Verlag, Wien (1954)
- /11/ v. Mises, R. Die Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* (1913)
- /12/ Siebel, E. Kräfte und Materialfluß bei der bildsamen Formänderung. *Stahl, Eisen* 45 (1925), S. 1563-1566
- /13/ v. Karman, Th. Beitrag zur Theorie des Walzvorganges. *Z. Angew. Math. Mech.* 5 (1925), S. 139-141
- /14/ Sachs, G. Zur Theorie des Ziehvorganges. *Z. Angew. Math. Mech.* 7 (1925), S. 235-236
- /15/ Siebel, E.; Pomp, A. Zur Weiterentwicklung des Druckversuchs. *Mitt. K.-*

- Wilh.-Inst. f. Eisenforschung 10 (1928), S. 55-62
- /16/ Doege, E.; Dohrmann, H.; Neubauer, I. Numerical simulation of thermally and mechanically induced phase transformations. CIRP International Symposium – Advanced Design and Manufacture in the Global Manufacturing Era, August 21-22 1997 Honkong, S. 271-276 (1997)
- /17/ Besdo, D.; Mahrenholz, O. Finite-Elemente-Methode. In: Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde. Hrsg: Dahl, Kopp, Pawelski, Verlag Stahleisen Düsseldorf (1993) S. 227 ff.
- /18/ Boujut, J. F.; Tichkiewitch, S. A Step Toward Automatic Dressing of a Three-Dimensional Stamped Part. Journal of Mat. Proc. Tech. 34 (1992), S. 163-171
- /19/ Marin, Ph; Boujut J. F.; Tichkiewitch, S. Fast Simulation System For Axissymmetrical Stamped-Parts Deformation. Proc. 5th Int. Conf. on Metal Forming (1994), S. 43-50
- /20/ Doege, E.; Mathieu, H.; Beneker, W. Rechnerunterstützte Stadienplanung beim Gesenkschmieden. Fabrik 43 (1993) 11/12, S. 20-22
- /21/ Mathieu, H. Ein Beitrag zur Auslegung der Stadienfolge beim Gesenkschmieden mit Grat. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 213; Düsseldorf VDI-Verlag (1991)
- /22/ Beneker, W. Rechnergestützte Simulation des Füllverhaltens beim Gesenkschmieden. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 187; Düsseldorf VDI-Verlag (1995)
- /23/ Kuhn, G.; Mahrenholz, O. Rand-Elemente-Methode. In: Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde. Hrsg: Dahl, Kopp, Pawelski, Verlag Stahleisen Düsseldorf (1993) S. 253 ff.
- /24/ Stockter, R. Entwicklung eines rechnerunterstützten Systems zur Schmiedewerkzeugkonstruktion. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 245, VDI-Verlag Düsseldorf (1997)
- /25/ N.N. Fides integriert Schmiedemodul in EUKLID V4, Schmiede-Journal März (1993)
- /26/ Kaehler K. CAD/CAM-Einsatz bei der Erstellung von Schmiedewerkzeugen. S. 171 ff, Vortragstexte des Symposiums "Neuere Entwicklungen in der Massivumformung" , Universität Stuttgart, 28.-29. Mai 1991, DGM-Informationsgesellschaft mbH (1991)
- /27/ Mathieu, H.; Michael, M.; Schlange, K.-H. 3D-Geometrie für die Werkstoffflußsimulation. wt Werkstattstechnik 4/97 April, Springer-VDI-Verlag Düsseldorf (1997)
- /28/ Doege, E.; Michael, M. Rapid Simulation of Material Flow During Die Forging. In: Proceedings of the Conference on Agile and

- Intelligent Manufacturing Systems, October 2-3, 1996, Troy, NY (1996)
- /29/ Doege, E.; Muckelbauer, M.; Michael, M. Simulationsgestützte Konstruktion von Umformwerkzeugen. In: Vortragstexte des Kolloquiums „Werkzeugbau – eine Branche mit Zukunft!“, 15.-16.09.97, EMO Hannover (1997)
- /30/ Speis, K. Die Zwischenformen beim Gesenkschmieden und ihre Herstellung durch Formwalzen. Dissertation, Universität Hannover (1957)
- /31/ N.N. Pro/ENGINEER Handbücher
- /32/ Blume, F. und andere Einführung in die Fertigungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin (1988)
- /33/ Bodschwinn, H.; Gravel, G.; Ostermeyer, H.; Reimche, W.; Stegemann, D.; Südmersen, U. Präzisionsumformung schrägverzahnter Zahnräder. VDI-Z Integrierte Produktion 138 (1996), Nr. 4 April; VDI Verlag Düsseldorf
- /34/ Kopp, R.; Bünten, R.; Karhausen, K.; Philipp, F.-D.; Schneider, R. Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit bei der Simulation und Optimierung umformtechnischer Prozesse. In: Tagungsband 7. Aachener Stahlkolloquium, 26. und 27. März (1992)
- /35/ Burth, K.; Brocks, W. Plastizität: Grundlagen und Anwendungen für Ingenieure. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden (1992)
- /36/ Michael, M.; Muckelbauer, M.; Winkelmann, K. Modellierung von Schmiedegesenken mit Pro/ENGINEER und FTOOL, Schmiedejournal, März 98, S. 20-22 (1998)
- /37/ Lange, K. Umformtechnik. Band 2: Massivumformung, Springer-Verlag Berlin (1984)
- /38/ Westerkamp, Ch. Präzisionsschmieden verzahnter Antriebsselemente am Beispiel schrägverzahnter Zahnräder. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 427, VDI-Verlag Düsseldorf (1997)
- /39/ Doege, E.; Behrens, B. A.; Wiarda, M. Verkürzte Fertigungsketten durch das Präzisionsschmieden von Zahnrädern – Auswirkungen auf die konventionelle Schmiedetechnik. In: Tagungsband 15. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 29. Februar und 1. März (1996)
- /40/ Doege, E. Umdruck zur Vorlesung: Anwendung der FEM in Entwicklung und Konstruktion. Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Universität Hannover (1998)
- /41/ Rudd, B. W. Volumenmodellierung und automatische Netzgenerierung. CAD-CAM-Report, Nr. 12 (1987)

- 
- /42/ Rudd, B. W. Impacting the design process using solid modelling and automatic finite element mesh generation. Computer-aided design, Bd. 20, Nr. 4 (1988)
- /43/ Haller, D.; Schuebbe, M. FEM-Berechnung in der Verbindungstechnik. CAD CAM CIM, Sonderteil in Hanser Fachzeitschriften, 06 (1989)
- /44/ Böge, G.; Schwarz, S. Halbautomatische Generierung von FE-Netzen aus VDA-FS-Daten. VDI-Berichte Nr. 816 (1990)
- /45/ Weck, M.; Heckmann, A. Finite-Elemente-Vernetzung auf der Basis von CAD-Modellen. Konstruktion, Bd. 45 (1993) S. 34-40
- /46/ Bokelmann, D. Untersuchungen über den Einfluss hoher Werkstücktemperaturen beim Gesenkschmieden von Baustählen. Diss. Universität Hannover (1985)
- /47/ DIN 7526 Toleranzen und zulässige Abweichungen für Gesenkschmiedestücke. Berlin: Beuth Verlag (1969)
- /48/ Lung, M. Ein Verfahren zur Berechnung des Geschwindigkeits- und Spannungsfeldes bei stationären starr-plastischen Formänderungen mit finiten Elementen. Diss. TU Hannover (1971)
- /49/ Lee, C.H.; Kobayashi, S. New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method. Trans ASME, J. Eng. Ind. 95 865-873 (1973)
- /50/ Mathieu, H.; Michael, M. Ein alternatives Simulationsverfahren für die Massivumformung. In: Tagungsband 15. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 29.02.-01.03.96, Hannover, S. 319-334 (1996)
- /51/ Karkmann, A. Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden hinter-schnittener Teile. Tagungsband zum Kolloquium „Rechnergestützte Methoden für die Werkzeugauslegung beim Präzisionsschmieden und bei der Blechumformung“, 20. und 21.10.1994, Hannover (1994)
- /52/ Rizzo, F. J. An integral equation approach to boundary value problem of classical elastostatics. Q. Appl. Math. 25 (1983) 83
- /53/ Cruse, T. A.; Rizzo, F. J. A direct formulation and numerical solution of the general transient elasto-dynamic problem. J. Math. Anal. Appl. 22 (1968) 244-259
- /54/ Brebbia, C. A.; Telles, J. C. T.; Wrobel, L. C. Boundary element techniques – theory and applications in engineering. Springer Verlag Berlin (1984)
- /55/ Swedlow, J. L.; Cruse, T. A. Formulation of boundary integral equations for threedimensional elastoplastic flow. Int. J. Solids Struct. 7 (1971) 1673 – 1683

- 
- /56/ Fleischer, M. Auslegung ausgewählter Schmiedeprozesse mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Verlag Stahleisen, Umformtechnische Schriften Band 67 (1996)
- /57/ Sedgewick, R. Algorithms in C. Addison-Wesley Publishing Company Inc. (1990)
- /58/ Muckelbauer, M.; Klawitter, G. Rechnerunterstützte Schmiedewerkzeugkonstruktion mit Pro/ENGINEER. Schmiedejournal, März/99, (1999)
- /59/ Werner, N. Algorithmen zur Kalibrierung von Finite-Elemente-Simulationsmodellen für Schmiedeprozesse. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 242, VDI-Verlag Düsseldorf (1996)
- /60/ Marquardt, B. Ein Beitrag zur Optimierung der Gratspaltabmessungen von rotationssymmetrischen Schmiedegesenken. Dissertation, TU Hannover (1981)
- /61/ Putnam, L. Software Cost Estimating and Life Cycle Control. IEEE No. EH0-165-1 (1980)
- /62/ Biba, N. et al. Form-2D. Finite Element System for Simulation and Analysis of Forming Processes. Version 2.12. User's Guide. Quantor Soft. Ltd, Moscow (1997)
- /63/ Tekkaya, A. E. Stand und Entwicklungstendenzen der Umformsimulation. Umformtechnik 2/98 S. 44-48 (1998)
- /64/ Vieregge, K. Die deutsche Schmiedeindustrie im Wettbewerb. In: Fortschritt mit Schmiedeteilen. VDI Berichte 1382, VDI Verlag Düsseldorf (1998)
- /65/ Polley, W. Untersuchungen zum Gravurfüllungsverhalten beim Präzisionsschmieden von Aluminiumknetlegierungen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 477, VDI-Verlag Düsseldorf (1998)
- /66/ Doege, E.; Meyer-Nolkemper, H.; Saeed, I. Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München Wien (1986)
- /67/ Mamdani, E.H.; Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, (1975)
- /68/ Zadeh, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3, No. 1, pp. 28-44, Jan. (1973)
- /69/ Geck-Müller, Th. Ermittlung der Umformkraft und Umformarbeit beim Formpressen mit Grat im Hinblick auf geeignete Baugrößen von Kurbelpressen. Diss. TU Hannover (1969)

- /70/ Stöter, J. Untersuchung des Schmiedevorganges in Hammer und Presse, insbesondere hinsichtlich des Steigens. Forschungsberichte d. Landes NRW Nr. 848, Westdeutscher Verlag Köln Opladen (1960)
- /71/ Thomsen, E. u.a. Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing. Macmillan New York (1965)
- /72/ Kobayashi, S.; Thomsen, G. Approximate Solutions to a Problem of Press Forging. Trans. ASME 81, Series B., J. Engng. Ind. 217-227 (1959)
- /73/ Neuberger, F.; Möckel, L. Richtwerte zur Ermittlung der Gratdicke und des Gratbahnverhältnisses beim Gesenkschmieden von Stahl. Fertigungstechnik und Betrieb 11 492-495 (1961)
- /74/ Tresca, H. Comptes Rendus. Acad. Sci Paris 59 S. 754 (1864)
- /75/ Lange, K.; Steck, E.; Adler, G. Grundlagen des Gesenkschmiedens. In: Grundlagen der bildsamen Formgebung. Verlag Stahleisen Düsseldorf (1966)
- /76/ Siebel, E. Die Formgebung im bildsamen Zustand. Verlag Stahleisen Düsseldorf (1932)
- /77/ Vater, M.; Nebe, G. Über die Spannungs- und Formänderungsverteilung beim Stauchen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigung, Nr. 5, VDI-Verlag Düsseldorf (1965)
- /78/ Stöter, H.J. Untersuchungen des Schmiedevorganges in Hammer und Presse, insbesondere hinsichtlich des Steigens. Forschungsberichte d. L. NRW, Nr. 848, Westdt. Verlag (1960)
- /79/ van Rooyen, G.T.; Backofen, W.A. A Study of Interface Friction in Plastic Compression. Intern. J. of Mech. Sci. Vol. 1 (1960)
- /80/ Bauer, R.; Brox, W.; Fischer, A.; Hofmann, R.; Lemberger, H.; Städter, J. BMW V8-Motoren Steigerung von Umweltverträglichkeit und Kundennutzen. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 57 (1996) 2
- /81/ Doege, E.; Muckelbauer, M.; Breuer, H.-W. CAX - Durchgängige Computerunterstützung - bei der Schmiedeteilentwicklung. VDI-Berichte 1382, S. 103-116 (1998)
- /82/ Lee, D. T.; Drysdale, R. L. Geralization of Voronoi diagrams in the plane - SIAM J. Comput., vol. 10, pp. 73-87, Feb. (1981)
- /83/ Doege, E.; Feindt, J.-A.; Seidel, R. Umformeigenschaften praxisnah ermittelt. Genaue Kenntnis der Fließspannung ist Voraussetzung für die Simulation von Präzisionsumformverfahren. Maschinenmarkt 101 (1995), Nr. 45, S. 46-48 (1995)
- /84/ Kraft, P.; Pfeufer, P. Jüngste Entwicklungen im Bereich Hexaeder-Vernetzer für den vollautomatischen Einsatz in der Simulationspraxis. In: Tagungsband XXIV. FEM-

- Kongreß, Baden-Baden 1997, S. 19-28 (1997)
- /85/ Schneiders, R. Algorithmen zur Generierung unstrukturierter Vierecks- und Hexaedernetze. In: Tagungsband Gittererzeugung und Datenstrukturen, TU Hamburg-Harburg, 8.-12.09.97, S. 53-66 (1997)
- /86/ N.N. MSC/Superforge™ Version 1.0. User's Manual. The MacNeal-Schwendler Corp., Los Angeles
- /87/ Doege, E.; Neubauer, I. Berechnung der Werkzeugbelastung beim Präzisions Schmieden von Zahnrädern. Umformtechnik 4/98, S. 48-50 (1998)
- /88/ Doege, E; Klein, K.; Jannsen, S Magnesium Light Metal Forging Technology - Experimental and Numerical Approach for Material Specific Near Net-Shape Processing. International Conference and Exhibition Magnesium Alloys and Their Applications, Wolfsburg, Germany, 28-30. April 1998, pp. 551-556 (1998)
- /89/ Doege, E. et al. Abschlußbericht der DFG-Forschergruppe: Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahnrädern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung. DFG Do 190/92, Universität Hannover (1999)
- /90/ Peddinghaus, J.; Breuer, H.-W. Entwicklung und Fertigung komplexer Stahlschmiedeteile. In: Tagungsband 16. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 25.02.-26.02.96, Hannover, S. 159-167 (1999)
- /91/ N.N. Pro/MECHANICA - Arbeiten mit STRUCTURE in Pro/ENGINEER.. Parametric Technology Corporation, Version 20, (1999)
- /92/ Neubauer, I. Potential der FEM bei der Auslegung von Massivumformvorgängen. In: Werkzeug- und Prozeßtechnik für die Massivumformung: Fachgespräche zwischen Industrie und Hochschule, 11. Juni 1997 / Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Universität Hannover (1997)
- /93/ Lange, K. Die Fertigungsbelange des Gesenkschmiedens und ihre wissenschaftliche Weiterentwicklung. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg (1957)
- /94/ Bramley, A. N. Design of Preform Stages With UBET. In: Tagungsband „Rechnergestützte Methoden für die Werkzeugauslegung beim Präzisions Schmieden und der Blechumformung“, IFUM-Kolloquium Hannover, 20 u. 21.10.94 (1994)

# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Matthias Michael  
 Weißdornweg 3b  
 30900 Mellendorf  
 Tel.: 05130-7751  
 Fax: 05130-7759

Geburtsdatum, -ort: 16.12.1965, Wurzen  
 Staatsangehörigkeit: deutsch  
 Familienstand: verheiratet, zwei Kinder

## Schulbildung:

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| 1972 – 1976 | Grundschule Gerichshain             |
| 1976 – 1980 | Oberschule Machern                  |
| 1980 – 1984 | Erweiterte-Goethe-Oberschule Wurzen |
| 07.1984     | Allgemeine Hochschulreife           |

## Wehrdienst:

|                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| 08.1984 – 07.1985 | Grundwehrdienst                 |
| 08.1985 – 04.1987 | Ausbilder in Potsdam und Glöwen |
| 05.1987 – 07.1988 | Werkstattleiter in Gardelegen   |

## Studium:

|                   |  |
|-------------------|--|
| 09.1988 – 08.1989 | Kraftfahrzeugtechnik, Technische Universität Dresden |
| 10.1989 – 09.1994 | Maschinenbau, Universität Hannover                   |
| 09.1994           | Diplom im Studiengang Maschinenbau                   |

## Berufspraxis:

|                   |   |
|-------------------|---|
| 09.1994 – 02.1995 | Projektingenieur, Frymaster Corporation, Shreveport (USA)   |
| 03.1995 – 03.1998 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung CA-Techniken, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), Universität Hannover |
| seit 04.1998      | Oberingenieur, IFUM   |