

FEM Simulation in der Kaltumformung

- ein Rück und Ausblick –

Dr. Ing. Dipl. Ing. Gerhard H. Arfmann, Dr. Ing. Michael Twickler,
CPM GMBH, Herzogenrath;

Kurzfassung

In den 1980´er Jahren hielten „CA“-Technologien (Computer aided) Einzug in den Ingenieurbereich der Industrieunternehmen. Zugleich fanden in Forschungsinstituten Entwicklungen zur Anwendung der FEM (Finite Elemente Methode) in der Simulation von Massivumformvorgängen statt. Ab Ende der 80er Jahre wurde diese Technologie zunächst zögerlich dann aber sehr erfolgreich in der Industrie eingeführt. Dieser Beitrag beschreibt wesentliche Schritte dieser Entwicklung am Beispiel der Schrauben- und Kaltumformindustrie.

Abstract (optional)

Text in engl. (Standard)

1. Vorgeschichte

In den 1980er Jahren wurden Computer zunehmend auch in technischen Abteilungen von Unternehmen eingeführt. Große Zentralrechner für kommerzielle Anwendungen wurden durch Abteilungsrechner ergänzt, auf denen technische Anwendungen realisiert wurden. Insbesondere ist hier die Einführung von CAD zu nennen. Neben diesen Abteilungsrechnern gab es diverse Kleinrechner, die aber zunächst nur für einfachste Anwendungen und primitive Spiele Verwendung fanden. Mit der Einführung des PC durch IBM war dann plötzlich eine Plattform geschaffen auf der sich neben Textverarbeitung und ähnlichem auch schnell anspruchsvollere Entwicklungen und grafische Anwendungen realisieren ließen. Durch das große Marktsegment der Computerspiele erfuhr diese Art von Computern eine rasante Entwicklung in den letzten Jahrzehnten und wurde zu einem Standard am Arbeitsplatz eines Ingenieurs. Am Anfang dieser Entwicklungen wurde an der RWTH Aachen die Idee geboren, die damals noch in den Kinderschuhen steckende Entwicklung der FEM als wesentliches Simulationswerkzeug in der Umformtechnik von Beginn an auch für PCs und damit auch für kleine und mittlere Unternehmen verfügbar zu machen. Dies sollte

möglich werden, indem ein speziell für die Umformtechnik zugeschnittenes System entwickelt werden sollte, welches im Gegensatz zu den damals auf Großrechnern und Workstations verfügbaren Universalsystemen auf Anwendungen in der Umformtechnik beschränkt wurde. Auch mussten Konzepte gefunden werden, um eine einfache Handhabung durch einen normalen Ingenieur zu ermöglichen.

2. Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

In den 80er Jahren waren die wesentlichen Entwicklungen auf die grundsätzlichen Bestandteile eines FEM Systems gerichtet. Hierzu gehörten das Untersuchen geeigneter Elementtypen, das Erforschen geeigneter Kontaktalgorithmen, die Auswahl geeigneter Löser der Gleichungssysteme, die Wahl geeigneter Materialgesetze und insbesondere auch die Entwicklung von Meshingmethoden zur automatischen Generierung der FEM Netze. Hierzu wurde eine Reihe von Forschungsarbeiten an der RWTH Aachen durchgeführt. Ende der 80er Jahre waren damit die wesentlichen Bestandteile eines FEM Systems zur Simulation umformtechnischer Prozesse verfügbar. Es konnten zweidimensionale und achsensymmetrische Aufgabenstellungen mit einem starr-plastischen Materialgesetz bearbeitet werden. Ausgehend von diesen Entwicklungen hat CPM Ende der 80er Jahre eine erste Version eines Simulationsprogramms unter dem Namen CAPS-Finel fertiggestellt. Dieses hatte zunächst eine einfache Textmenüführung und erzeugte grafischen Output über den GKS Standard, so dass es auf fast jeder Computerplattform lauffähig war.

3. Industrieintroduction und spezielle Entwicklungen für die Kaltumformung

Ende der 80er und zu Beginn der 90er Jahre wurden erste Installationen in der Warmumformung (Luftfahrtindustrie, Lagerherstellung..) realisiert, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Einen wesentlichen Entwicklungsschub gab es durch Aufnahme von CPM in ein laufendes Forschungsprojekt der Schraubenindustrie, in dem ein einfaches Simulationssystem für die Schrauben- und Mutterfertigung entwickelt werden sollte.

Ein sehr aufwendiger Entwicklungsschritt war die Schaffung eines grafischen Benutzerinterface auf PC, da zu der Zeit noch keine Windowsoberfläche, wie wir sie heute kennen, verfügbar war und das System nach wie vor auch auf anderen Plattformen laufen sollte. Unter Nutzung des GKS Standard wurde ein eigenes grafisches Interface geschaffen, welches dem Benutzer über einfache Menüführung die Nutzung des Systems erlaubte.



Bild 1: Startbild des Systems CAPS-Finel hier in der späteren Version 5.7

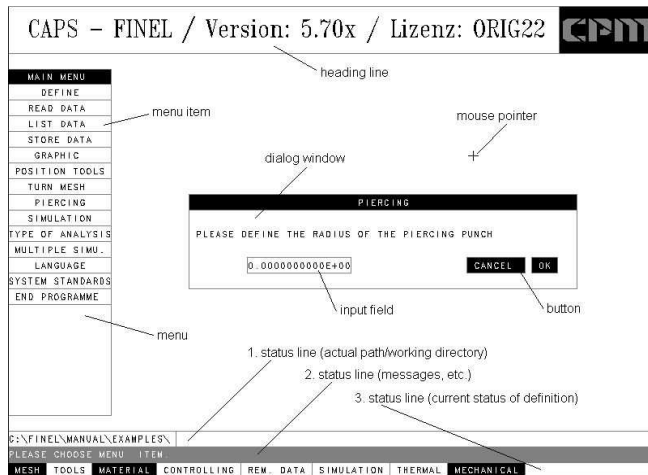


Bild 2: Menuesteuerung der Version 5.7

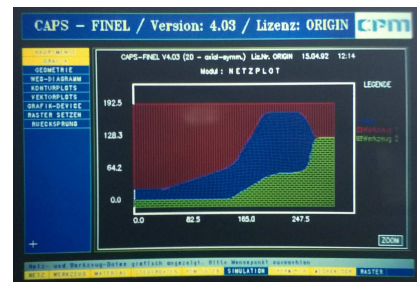


Bild 2.1: Version 4.03-1992

Das System war in einem einzigen Programm realisiert, d.h. Modellierung, Simulation und Auswertung fanden in nur einem Programm statt. Das galt insbesondere auch für das integrierte Meshing und Remeshing, was während der Simulation automatisch erfolgen musste. Programmtechnisch waren dies große Herausforderungen.

Auch technologisch standen weitreichende Entwicklungen an. Aus ersten Anwendungen musste erkannt werden, dass die **verwendeten Reibgesetze** nicht ausreichend waren. Reine Anwendungen des Coulombschen Reibgesetzes oder des Gesetzes der maximalen Schubspannung führten zu schlechten oder gar falschen Ergebnissen.

Bild 3 zeigt die Simulation einer einfachen Reduktion, die in der Praxis kein Problem darstellte.

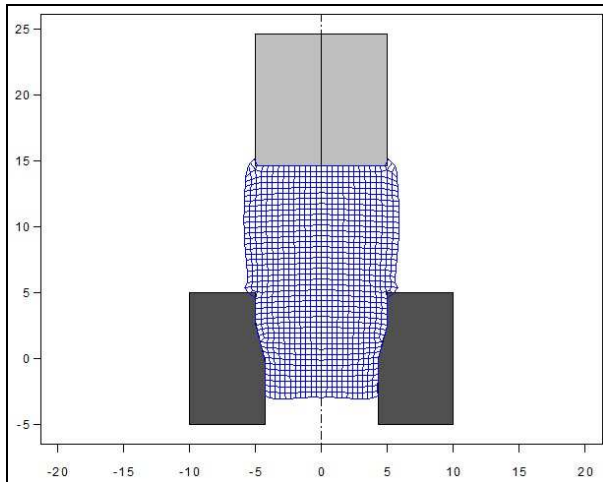


Bild 3: Falsches Ergebnis einer Simulation einer Reduktion

Es war schnell zu erkennen, dass in der realen Welt viel mehr zu berücksichtigen sein würde, als in der Forschung angenommen.

Die Firma ABC führte seinerzeit einige Versuche durch und wir konnten lernen, dass der Vorzug, die Reibung (offensichtlich nicht der aus der Literatur bekannte Standardwert) und die genaue Werkzeuggeometrie einen erheblichen Einfluss haben und die Simulation genau diese Einflüsse darstellen können muss, um ein zuverlässiges Hilfsmittel zu sein.

Das folgende Bild 4 zeigt dann eine Simulation, die ein kombiniertes Reibgesetz (Coulomb verbunden mit dem Gesetz der maximalen Schubspannung unter Verwendung ermittelter Reibfaktoren) und die Vorverformung, sowie die genaue Geometrie (insbesondere im Werkzeugeinlauf) berücksichtigt, sehr genaue Ergebnisse liefert.

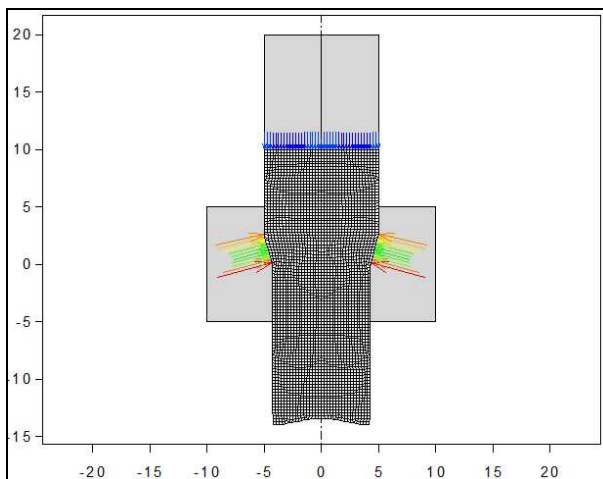


Bild 4: Erfolgreiche Simulation der Reduktion mit genaueren Modellen und exakten Geometrien

Es war von nun an möglich Reduktionen im Voraus genau simulieren zu können. Bei Anwendung von Verfahren im Grenzbereich (hohe Reduktion, Speziellen Material, besondere Werkzeuggestaltung,...) war dies ein entscheidender Schritt zur Akzeptanz von Simulation.

Lokale Verfeinerung (oder richtiger globale Vergrößerung), eingeführt, um Rechenzeit zu ersparen, führte zu Ungenauigkeiten die bei der geforderten Genauigkeit in der Kaltumformung nicht toleriert werden konnten.

Die verwendeten **Kontaktalgorithmen** mussten verbessert werden, um den Materialfluss richtig zu simulieren. Die **Bewegungssteuerung** musste das genaue Verhalten einer Presse abbilden, die **Schrittweitensteuerung** sollte automatisch erfolgen, um negative Einflüsse durch die Modellierung des Benutzers auf die Ergebnisse zu vermeiden, **mehrstufige Prozesse** mussten einfach zu handhaben sein, **Faltenbildungen** und **Luft- und Öleinschlüsse** mussten aufgezeigt werden können und letztendlich mussten gute **Materialdaten** verfügbar sein.

Diverse Forschungsvorhaben begleiteten diese Arbeiten so dass Ende der 90er Jahre ein robustes Simulationssystem verfügbar war.

Die folgenden Bilder zeigen zwei typische Anwendungen, die bereits in den 90er Jahren Standard waren.

Beim ersten Beispiel handelt es sich um eine Extrusion mit komplexer Werkzeugkinematik. Ziel war es keinen Abriss zu haben und die Innenkontur zu erhalten.

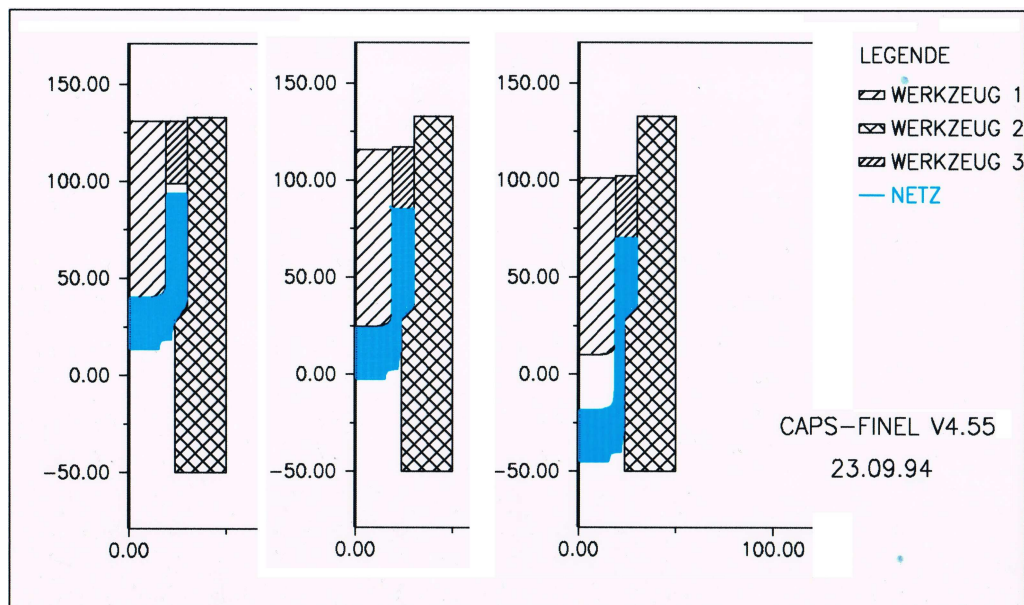


Bild 5: Simulation einer Extrusionsstufe

Bei dem zweiten Beispiel handelt es sich um die Produktion eines Ventilfedertellers. Der Kunde hatte langjährige Erfahrung mit dieser Art von Fertigung. Ein spezieller Teller

bereitete jedoch Probleme, die mit der vorhandenen Erfahrung nicht in den Griff zu bekommen waren.

Das Werkzeug zur Formung der Innengeometrie in der letzten Stufe versagte vorzeitig.



Bild 6: Stadiengang zur Fertigung des Ventildfedertellers und gebrochenes Werkzeug

Die durchgeführte Simulation zeigte die exakte Fertigung des Tellers wie in der Praxis. Der Blick auf die Werkzeuge zeigte etwas Unerwartetes. Während der Umformung kam es zu einem alternierenden Spannungszustand im Stempel. Kurzfristig war der Stempel axial unter Zugspannung. Dies war exakt an der Stelle des Versagens.

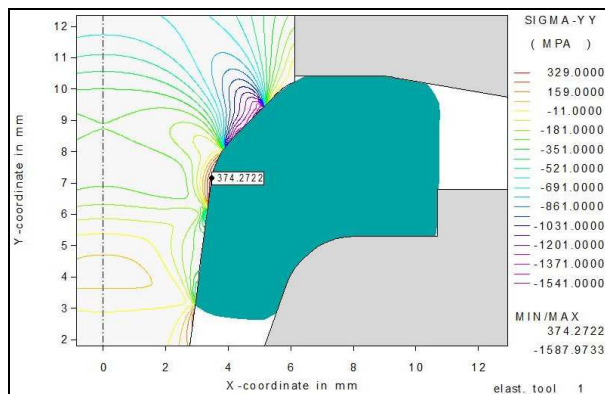


Bild 7: Zugspannung an der Oberfläche des Stemples

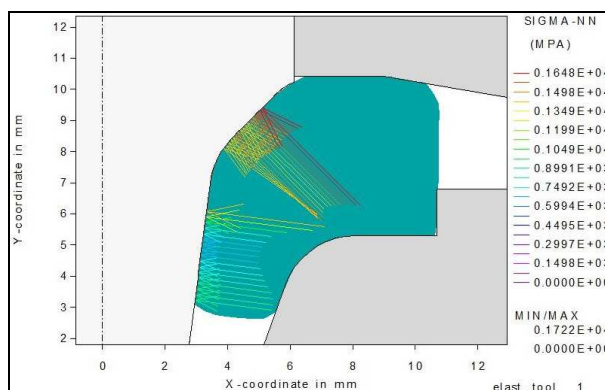


Bild 8: Nicht homogene Spannungsverteilung am kritischen Ort

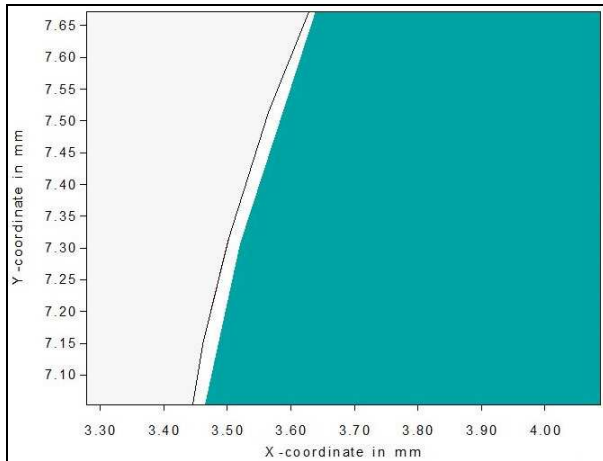


Bild 9: Abheben des Materials verursacht durch den Stofffluss

Die genaue Analyse erlaubte es dem Ingenieur das Problem zu verstehen. Das Stempelmateriale war M42. In einem solchen Material führen dynamische Spannungszustände mit alternierenden Spannungen zur vorzeitigen Ermüdung. Die Ursache war ein Abheben des Materials während der Umformung verursacht durch den Stofffluss. Es gab also keine Luft- oder Öleinschlüsse, deren Spuren man am Teil hätte sehen können. Diese Erkenntnis konnte nur durch Simulation gewonnen werden. Eine Änderung der Vorform zur Vermeidung dieses Stoffflussproblems führte dann gezielt zum Erfolg.

Solche Simulationen helfen in der Kaltumformung nachhaltig, die Produktivität und Qualität von Produkten zu steigern. Das Ingenieurwissen konnte systematisiert und reproduzierbar gemacht werden. Neue Ideen konnten ohne hohes Kostenrisiko probiert werden.

Bild 10 und Bild 11 zeigen noch weitere Anwendungen aus dieser Zeit.

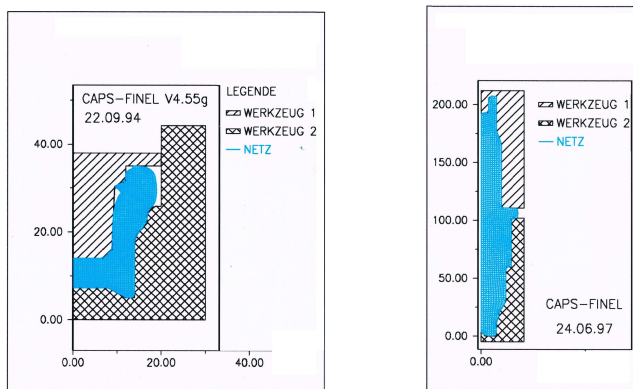


Bild10: Vorhersage einer Falte Bild11: Erfolgreiche Simulation eines mehrstufigen Prozesses

Da oft nicht alle Details in den technischen Zeichnungen der Kunden vorhanden waren, diese aber in der Beschreibung des FEM Modells benötigt werden, wurden auch einfache Hilfswerkzeuge entwickelt, die es dem Ingenieur erlauben, fehlende Informationen bei der Modellerstellung zu generieren. Ein typisches Beispiel sind nicht vollständig vermaschte Radien, oder fehlende Angaben, da einige Geometrien vom Werkzeugmacher erzeugt werden oder Standards Verwendung finden.

Bild12 zeigt ein solches Modul zur Ermittlung von Radien.

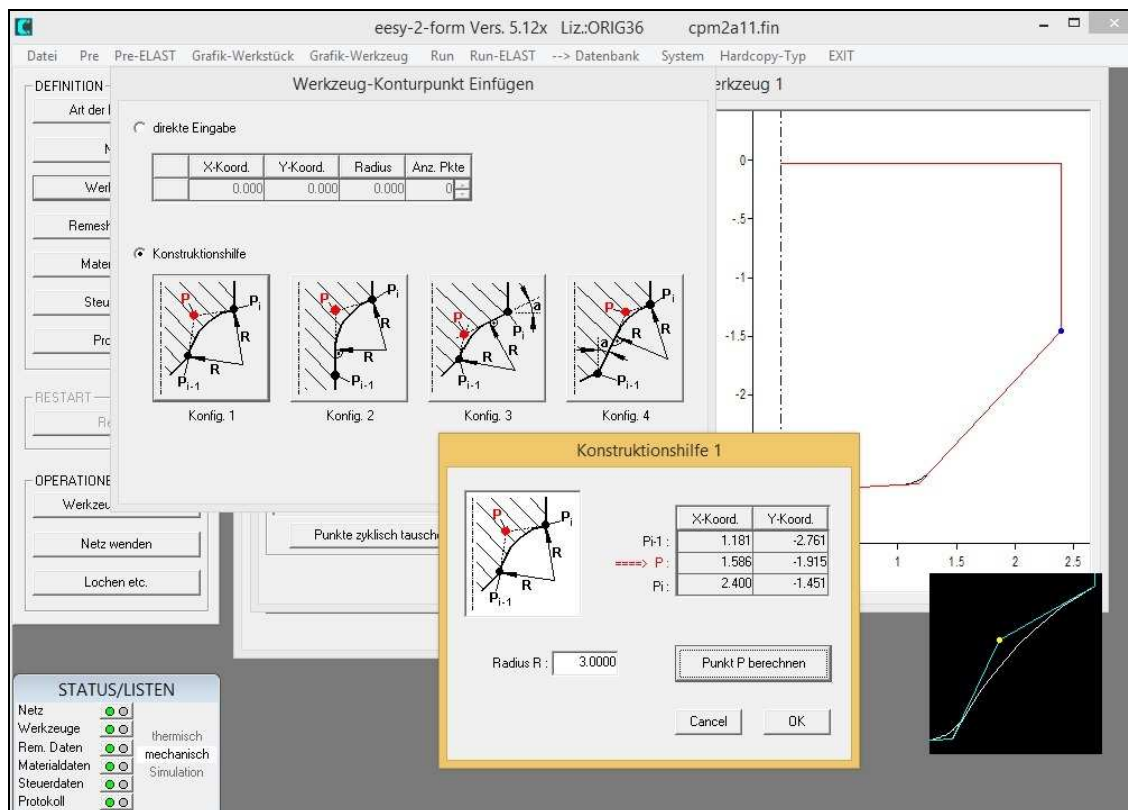


Bild 12: Modul zum Einfügen nicht beschriebener Geometrien

Gegen Ende des Jahrzehnts wurde unter den Kunden mehr und mehr der Wunsch offenbar, auch **3D Anwendungen** simulieren zu können, um das Spektrum der Anwendung auch auf komplexere Teile mit starken Un-symmetrien ausweiten zu können. Ein europaweites Forschungsprojekt wurde gestartet. Ziel war es **3D Modellierungen direkt in der Software zu ermöglichen**, da viele Firmen zu der Zeit gar nicht über 3D CAD Software verfügten. Auch sollte ein einfacher **Netzgenerator für Hexaederelemente** geschaffen werden, da sie eine bessere Genauigkeit als zu Beispiel Tetraederelemente versprachen. Als Basissoftware wurde eine **elastisch-plastisches System** benutzt, da anders als in 2D Anwendungen der elastische Einfluss auf die Endgeometrie als teilweise bedeutend eingeschätzt wurde. Um das Jahr Zweitausend konnten erste vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Bild 13 und folgende zeigen Simulationen aus einem Mutternfertigungsprozess.

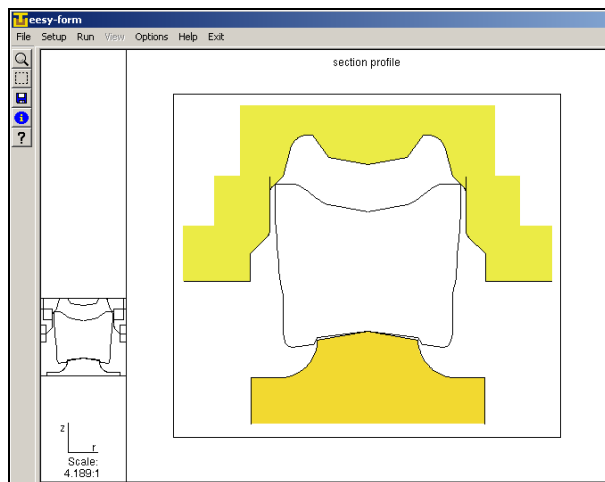


Bild 13: Setup einer Stufe in der Fertigung einer Mutter

Für einfache Geometrien können die Werkzeuge dabei ohne Hilfe von CAD aus einer Toolbox modular generiert werden.

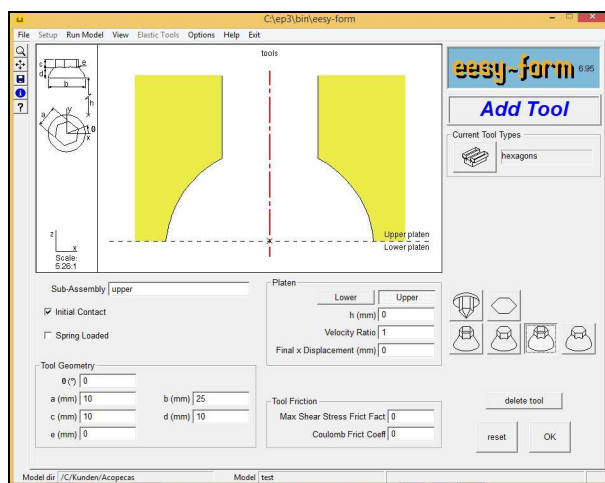


Bild 14: Beispiel der Werkzeuggenerierung aus einer Toolbox

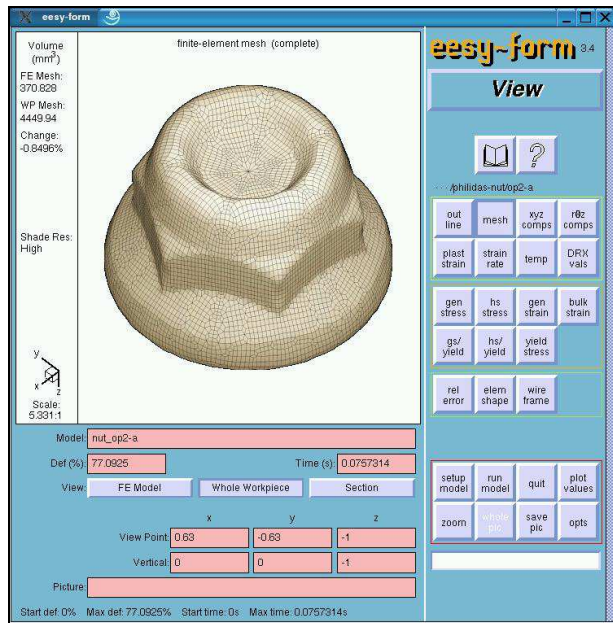


Bild 15: Endgeometrie der simulierten Stufe mit den typischen Unterfüllungen am Sechskant

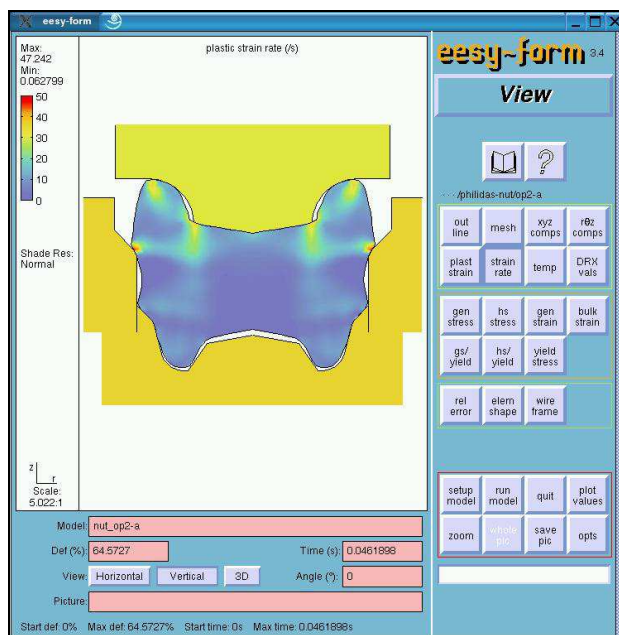


Bild 16: Typische Unterfüllungen und Luftpinschlüsse

Die Ergebnisse der Simulationen waren sehr gut, aber es wuchs auch die Erkenntnis, dass die meisten Probleme in der Fertigung solcher Teile auch in einer 2D Simulation aufgezeigt wurden....und das wesentlich schneller.

Die 3D Simulation war also offensichtlich nur sinnvoll, wenn es sich um komplexe 3D Teile handelte. Dementsprechend wurde das Hauptaugenmerk in der Entwicklung nun auf die Handhabung komplexer Bauteile gelegt. Das Hauptproblem war dabei das automatische Meshen komplexer Geometrien mit Hexaederelementen. Auch wurden die Schnittstellen zur komfortablen Übernahme von komplexer Werkzeuggeometrie aus 3D CAD Systemen geschaffen.

Inzwischen hatten sich PCs in den Umformtechnischen Unternehmen etabliert und Windows war zum Standard geworden. Entsprechend wurden die Interfaces unserer Produkte angepasst und die Systeme umbenannt. Fortan gab es unsere Systeme unter den Namen eesy-2-form und eesy-form.

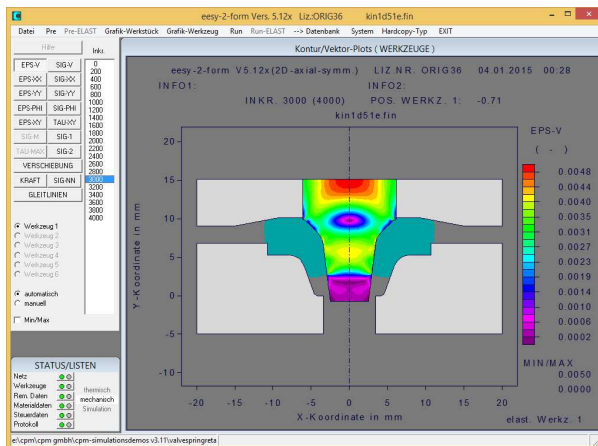


Bild 17: eesy-2-form

Bild 17 zeigt das Design unseres Systems eesy-2-form wie es im Prinzip seit 1999 besteht.

4. Vervollständigung und Ertüchtigung technologischer Module, Werkzeuganalyse und 3D Simulation mit automatischem Remeshen hexagonaler Elemente

Die Schwerpunkte der Entwicklungen in den 2000er Jahren lagen in der **Vervollständigung** und **Verbesserung der technologischen Module** und der Fertigstellung eines **vollautomatischen 3D Meshers für hexagonale Elemente**. Außerdem wurde ein Schwerpunkt auf die Entwicklung weiterer Module zur **Auslegung und Optimierung von Werkzeugen** gelegt.

Nachdem die Basisentwicklungen zur Anwendung der FEM in der Kaltumformung abgeschlossen waren galt es nun **technologische Module zu ertüchtigen oder zu ergänzen**.

Die **Kontaktalgorithmen** wurden basierend auf umfangreichen Anwendungserfahrungen verbessert. Die Möglichkeit **lokaler Reibungsbeschreibung** wurde ebenso eingeführt wie das automatische **Erkennen und Schließen von Falten**. Module zur **Oberflächenanalyse** wurden getestet und Analysemodule zur Beurteilung des **Tribosystems** ergänzt.

Zur **Schadensanalyse** wurden verfügbare Modelle getestet. Mangels genauer Erkenntnisse zum Anwendungsspektrum und Mangels zugehöriger Materialdaten sind diese allerdings bis heute kein zuverlässiger Standard.

Ein umfangreicher Bestand an **Materialdaten** wurde ermittelt und zusammen mit den führenden Forschungseinrichtungen in Deutschland und der GCFG Richtlinien zur Durchführung entsprechender Prüfungen erarbeitet.

Zur **Auslegung der Werkzeuge** wurde ein entsprechendes Berechnungssystem entwickelt und auch in die FEM integriert. Nun war es möglich **Armierungssysteme** zu berechnen und basierend auf den Simulationsergebnissen des Umformprozesses zu optimieren.

Ähnlich wie zuvor schon beim 2D Meshing, war es schwierig ein **automatisches generelles 3D Meshing für Hexaederelemente** zu entwickeln. Einem Ansatz der Universität Ankara folgend, der ähnlich wie auch schon im in Aachen entwickelten 2D Remesher aus den 80er Jahren, ein möglichst gleichförmiges Netz aus den Inneren des Bauteils aufbaut und dann über spezielle Algorithmen den Außenbereich des Bauteils mit der Werkstückoberfläche

vernetzt, wurde ein **genereller 3D Remesher** fertiggestellt und in das 3D Simulationssystem eesy-form integriert.

Schnittstellen wurden in 2D und im 3D realisiert, um die Anbindung **zwischen CAD und FEM** zu erleichtern.

Bild 18 ff zeigen einige dieser Entwicklungen.

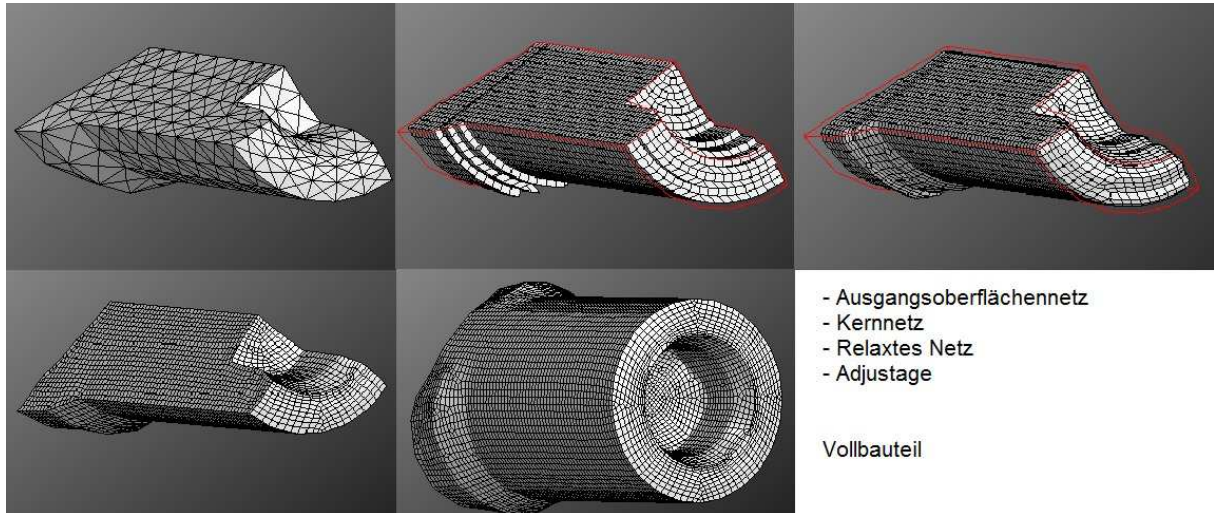


Bild 18: Prinzip der Vernetzung

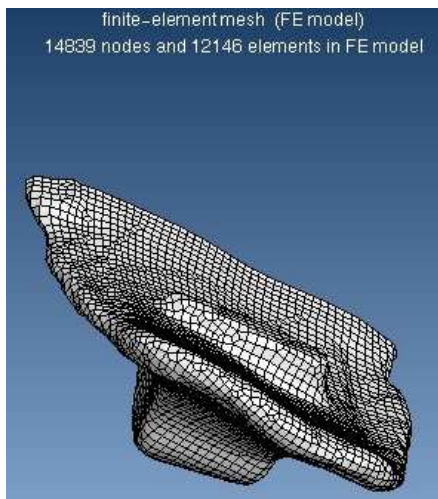


Bild 19: Komplexe Vernetzung

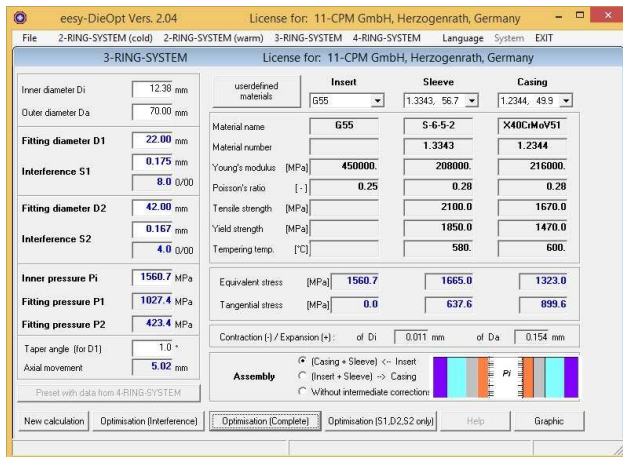


Bild 20: Werkzeugauslegungs- und Werkzeugoptimierungssystem

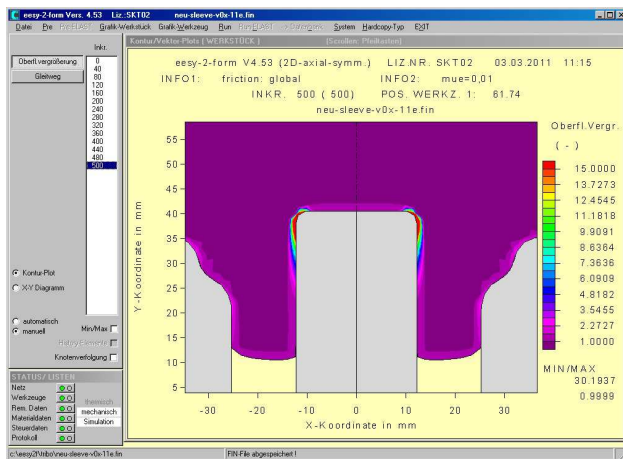


Bild 21: Oberflächenvergrößerung

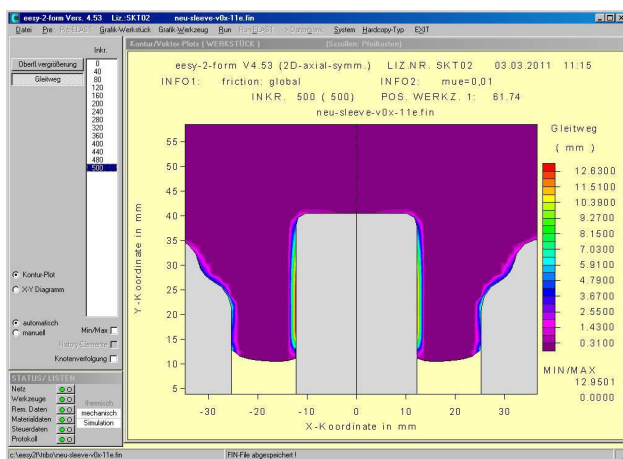


Bild 22: Gleitweg

Bild 21 zeigt die Vergrößerung der Bauteiloberfläche während der Umformung und Bild 22 zeigt den Gleitweg, den das Material zurücklegt.

5. Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick

Mit den oben beschriebenen Entwicklungen stehen heute leistungsfähige Systeme zur Unterstützung des Ingenieurs in der Entwicklung von Prozessen und Werkzeugen zur Verfügung.

Der Schwerpunkt bei der Einführung von Simulationssystemen liegt heute weniger in der Schulung zur Handhabung der Systeme, vielmehr ist eine **intensive Schulung zum richtigen Verstehen der Modellierung und der Berechnungsergebnisse in Vordergrund**. Simulation kann den guten Ingenieur nicht ersetzen, sie ist ihm ein gutes Hilfsmittel mit dem er seine Prozesse analysieren und optimieren kann und sein Prozessverständnis verbessern kann. Bei entsprechender Kreativität kann der dann an und über die Grenzen der heute verfügbaren Technologie in der Umformtechnik vorstoßen. Aus solchen Anwendungen erwachsen dann immer neue Anforderungen an die verfügbaren Modelle in der Simulation.

So werden die Simulationssysteme kontinuierlich erweitert und verbessert werden.

Die folgenden Bilder zeigen aktuelle Ergebnisse von Entwicklungen unter Nutzung der Simulation. Ingenieure versuchen mit Fantasie Grenzen zu verschieben.

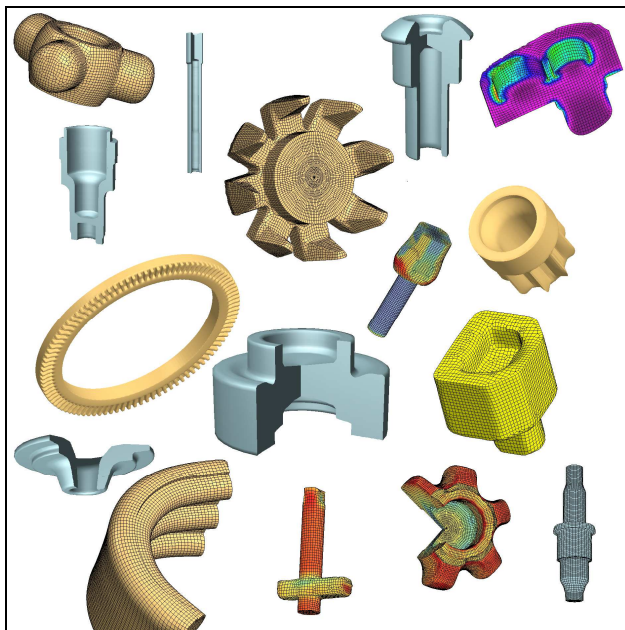


Bild 23: Simulationen wie sie heute standardmäßig durchgeführt werden



Bild 24: Mehrteilige komplexe Motorenkomponente entwickelt mit Hilfe von Simulation

Die beiden Teile in Bild 24 werden komplett vom Abschnitt auf einer Mehrstufenpresse gefertigt. Es folgt nach der Umformung nur noch ein Präzisionsschleifen und es wird das kleine Einzelteilteil (links am rechten Bauteil) eingepresst.

Die gezeigten Beispiele zeigen die Mächtigkeit der verfügbaren Simulationstechnik. Es können entscheidende Schritte in der Entwicklung der Technologie und damit im Wettbewerb getan werden.

Entwicklungen neuer Module und weitere Materialkennwerte werden erforderlich sein, um die Simulation weiter zu vervollständigen.

Derartige Entwicklungen können neue Ansätze zur Materialbeschreibung, Gefügemodellierungen, Module zur Wärmebehandlung, Analyse und Auslegungstools zur Tribologie, thermische Analysen von Werkzeugsystemen und ähnliches sein, die heute oftmals bereits in der Entwicklung sind.

Eine andere Richtung der Entwicklung ist die Integration der reinen Umformtechnik in die Systemkette der Produktion. Hierunter ist die Anbindung an vorgelagerte Prozesse genauso zu verstehen wie die Koppelung an Simulationsmodell weiterführender Operationen bis hin zur Anwendung. Hier sind erste Ansätze vorhanden und hier wird es in Zukunft viele Entwicklungen geben. Auch die Kopplung der Umformsimulation mit der Maschinen- und Werkzeugumgebung gehört zu diesen Entwicklungen genauso wie Module zur Abbildung der Bewegungsabläufe in Bezug auf neue Entwicklungen in der Pressentechnologie.

Bei allen Fortschritten ist festzustellen, dass es eine Vielzahl von neuen Entwicklungen gibt, die sinnvoll in die FEM integriert werden sollten oder mit ihr verbunden werden sollten. Es klafft jedoch eine Lücke zwischen der Forschung und der Anwendung, indem Modelle im

Prinzip erforscht werden, der breiten Anwendung jedoch der Mangel an zugehörigen Materialdaten entgegensteht.

Bei den Fließkurven war es in den 90er Jahren gelungen Anwender, Politik und Wissenschaft zusammenzubringen. Durch Kostenteilung war es möglich einen Ansehnlichen Bestand an Fließkurven für die Warm- und Kaltumformung zu ermitteln.

Ähnliche Überlegungen muss es auch in anderen Bereichen geben, um Module mit interessanten Modellen der breiten Anwendung zugänglich zu machen.

Andernfalls wird zwar Forschung finanziert, die Anwendung erforschter Zusammenhänge wird dann aber nur den potentiellen Anwendern mit der vorhandenen finanziellen Potenz vorbehalten bleiben. Eine Perspektive, die den oft mittelständischen Firmen in der Kaltumformung nicht recht sein dürfte.

6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag sollte einen Überblick über Entwicklungen in der Anwendung der FEM in der Kaltumformung in den letzten 30 Jahren geben. Er ist sicherlich nicht in jeder Hinsicht vollständig.

Natürlich ist dieser Rückblick an die Entwicklungen der Produkte der CPM GmbH angelehnt, die sich in einigen Punkten wie der Nutzung der Elementtypen oder dem Verzicht auf lokale Verfeinerung und einem sehr konservativen Umgang mit neuen Modellen sicher von anderen Mitbewerbern unterscheiden.

Als Rück- und Ausblick, auch mit Blick auf die hier auf den VDI Jahrestreffen über die Jahre vorgetragenen Entwicklungen, ist er aber durchaus repräsentativ und gibt einen Eindruck von den stattgefundenen Entwicklungen.

Auf ein Literaturverzeichnis wird verzichtet, da es leicht hätte länger werden können als der Vortrag selbst. Interessenten an Details mögen die Autoren kontaktieren.

Die Autoren bedanken sich bei Ihren Kunden für die Unterstützung dieses Vortrags, indem Anwendungsbeispiele zur Veröffentlichung freigegeben wurden. Alle Beispiele sind reale Anwendungen und stammen sowohl von etablierten Kunden in den traditionellen Ländern der Umformtechnik als auch von jungen aufstrebenden Unternehmen aus den BRICS Ländern.