

## SIMULATION IN DER METALLURGIE

Received - Primljeno: 2002-01-31

Accepted - Prihvaćeno: 2002-04-15

Review Paper - Pregledni rad

Die vorliegende Veröffentlichung umreißt in groben Zügen die Grundlagen der Simulation sowie den Weg vom realen Problem zum Modell. An einigen Fallbeispielen ist der Einsatz der Simulation in der Metallurgie gezeigt. Ablaufsimulation, Parameterstudien sowie Simulationen zu Produkteigenschaften werden erklärt. Die Entwicklung von neuen Verfahren mittels der Simulation ist ebenfalls beschrieben.

**Schlagworte:** *Simulation, Ablaufsimulation, Parameterstudien zum Walzen, Studien zu Produkteigenschaften, Entwicklung und Simulation*

**Simulacija u metalurgiji.** Predočeni rad opisuje u grubim crtama kao i put od realnog problema do modela. Na primjerima nekih slučajeva prikazuje se primjena simulacija u metalurgiji. Objašnjava se simulacija toka, proučavanje parametara kao i simulacija glede svojstava proizvoda. Također je opisan razvoj novih postupaka pomoću simulacije.

**Ključne riječi:** *simulacija, simulacija toka, proučavanje parametara glede valjanja, proučavanje svojstava proizvoda, razvoj i simulacija*

### EINLEITUNG

Im Laufe der Zeit entstanden für die unterschiedlichsten technischen Probleme Simulationsmodelle. Diese reichen von Abläufen bis Zustandsdiagrammen und umfassen unter anderem Stoff- und Wärmeflussmodelle, maschinendynamische Modelle und viele andere mehr. Im Folgenden seien beispielhaft sieben Anwendungen der Simulation angerissen, die ihren Einsatz in der Metallurgie veranschaulichen sollen.

### GRUNDLAGEN DER SIMULATION

Der Begriff Simulation kommt vom lateinischen "simulare", was soviel wie vortäuschen bedeutet. In der Technik wird Simulation allerdings als Sammelbegriff für das Darstellen oder Nachbilden physikalischer oder technischer Prozesse durch mathematische und physikalische Modelle verwendet. Vergleicht man Versuche am Original mit der Simulation des entsprechenden Prozesses, ist diese oft billiger und ungefährlicher als der Versuch. Verknüpft mit moderner Rechentechnik ist die Simulation mittlerweile ein mächtiges Werkzeug, das für das Beschreiben und Entwickeln von Prozessen mehr und mehr an Bedeutung gewinnt.

W. Schwenzfeier, M. Philipp, O. K. Harrer, Institut für Verformungskunde und Hüttenmaschinen, Montanuniversität Leoben, Österreich

### VOM PROBLEM ZUM MODELL

Auf ein bestehendes technisches Problem sind die Werkzeuge der Physik anzuwenden, sodass dieses in weiterer Folge mathematisch formuliert werden kann d.h. modellieren. Das Modell soll die Realität nur so genau wie nötig abbilden, um es so einfach wie möglich zu halten. Ein funktionaler Zusammenhang darf beispielsweise unter Umständen linearisiert jedoch nicht umgekehrt werden. In weiterer Folge ist das Modell in computertaugliche Sprachen zu übersetzen. Numerische Probleme wie etwa Divisionen durch extrem kleine Zahlen oder mangelnde Konvergenzen von Iterationen oder ähnliches müssen beherrscht oder vermieden werden. Unumgänglich sind Probeläufe der Rechensimulationen mit anschließender Ergebnisprüfung anhand der Realität oder an physikalischen Experimenten. Besonderes Augenmerk ist während des Modellierens auf die Rand- und Anfangsbedingungen zu richten, da sie entscheidenden Einfluss auf die Modellgröße und Realitätstreue haben. Entsprechen die Modellergebnisse nicht der Realität oder den realitätsnahen Erwartungen, ist das Modell zu prüfen und gegebenenfalls zu modifizieren wodurch dieses umfangreicher und komplizierter werden kann.

Abb. 1 zeigt ein Schema vom Problem bis zur Interpretation des Simulationsergebnisses nach [1]. FEM steht in Abb. 1 und im folgenden Text für die Finite Elemente Methode.

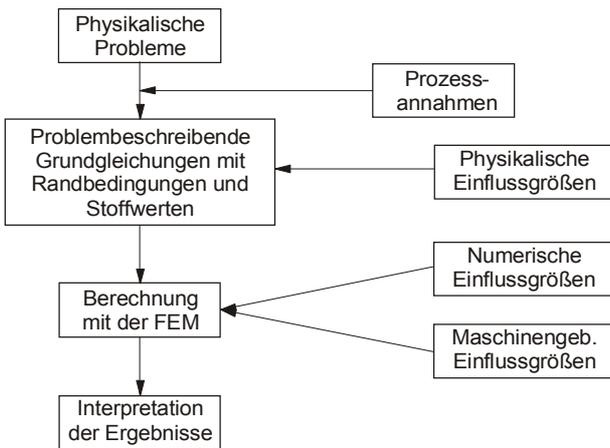


Bild 1. Entstehen einer Simulation  
Slika 1. Nastajanje simulacije

**AUSGEWÄHLTE SIMULATIONSBEISPIELE**

**Ablaufsimulation in der Hüttenindustrie**

Am Beispiel von Transportengpässen, die in einem LD-Stahlwerk mit 3 bestehenden Kränen auftraten, soll gezeigt werden, wie mit Hilfe der numerischen Simulation eine etwaige Investition eines neuen Kranes entschieden werden konnte. Trivial ist der Einsatz eines Kranes, der die an ihn

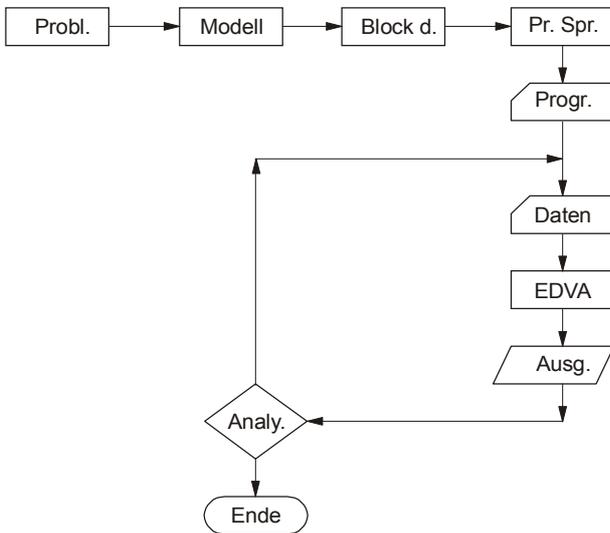


Bild 2. Arbeitsschritte bei der Durchführung eines Simulationsexperimentes  
Slika 2. Radni koraci u izvedbi jednog eksperimenta simulacijom

gestellten Transportaufgaben nach entsprechenden Vorgaben abarbeiten muss. Schwieriger gestaltet sich die Kranbelegung von zwei bis drei oder gar vier auf ein und derselben Kranbahn fahrenden Kränen. Die äußerst komplexe Transportproblematik für drei und vier Kräne konnten mit der Simulationssprache SIMULA-67 formuliert und berech-

net werden (siehe Abb. 2). Eindeutig konnte nachgewiesen werden, dass für einige Anwendungsfälle ein vierter neuer Kran hilfreich wäre, dieser jedoch in der Mehrzahl der Transportfälle die anderen Kräne behindern und somit nicht von Nutzen sein würde [2].

**Parameterstudien zum Walzen**

Grobblech biegt während des Walzens am Blechanfang oft unerwartet nach oben oder unten. Diese sogenannte Schibildung zeigt Abb. 3. Auch treten während des Walzens über der Blechlänge mitunter ausgeprägte

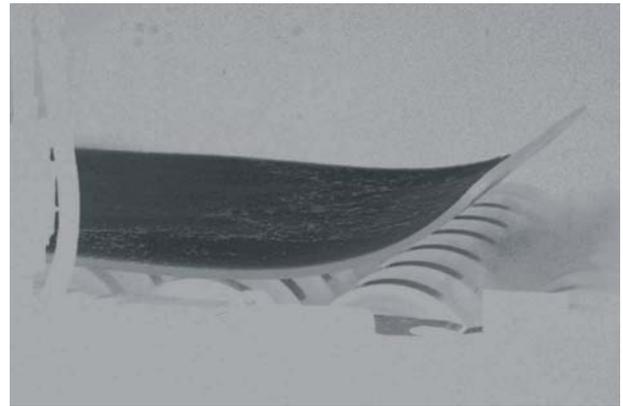


Bild 3. Schibildung an Grobblech  
Slika 3. Prikaz formiranja "skije" na debelom limu

Krümmungswechsel auf, die in Walzwerken als Knicke bezeichnet werden. Diese ungewollten Blechkrümmungen verursachen neben Produktivitätseinbußen oft auch aufwändige Nacharbeiten und nicht selten Anlagenschäden. Ausgehend von umfassenden Betriebsmessungen konnte der Ist-Zustand in einem modernen Grobblechwalzwerk erfasst werden. Eine anschließende FEM-Simulationsstudie ermöglichte es, den aus der Messung bekannten Ist-Zustand in der Simulation einzubauen und Einflüsse auf die Blechkrümmung festzustellen.

Als wesentliche und gut beeinflussbare Störgröße wurde die gemessene Umfangsgeschwindigkeitsdifferenz der Arbeitswalzen erkannt. Mit Hilfe einer FEM-Parameterstudie konnten wichtige Erkenntnisse wie beispielsweise der „neutral point“ gewonnen werden, an dem Walzgut konstanter Dicke und fixer Dickenabnahme trotz vorhandener Umfangsgeschwindigkeitsdifferenzen der Arbeitswalzen ungekrümmt aus dem Walzspalt läuft.

In Abb. 4 können „neutral point“ und die Krümmungsintensität abhängig von verschiedenen Umfangsgeschwindigkeitsdifferenzen für eine Blechdicke erkannt werden. Auch das bis dato unbekannte Verschieben des neutral points abhängig von der Blecheinlaufdicke, auch „drift of the neutral point“ genannt, sowie die in der Praxis bekann-

ten erheblichen Unterschiede der Antriebsdrehmomente für Umfangsgeschwindigkeitsdifferenzen der Arbeitswalzen konnten durch die Simulation quantifiziert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in das Automationskon-

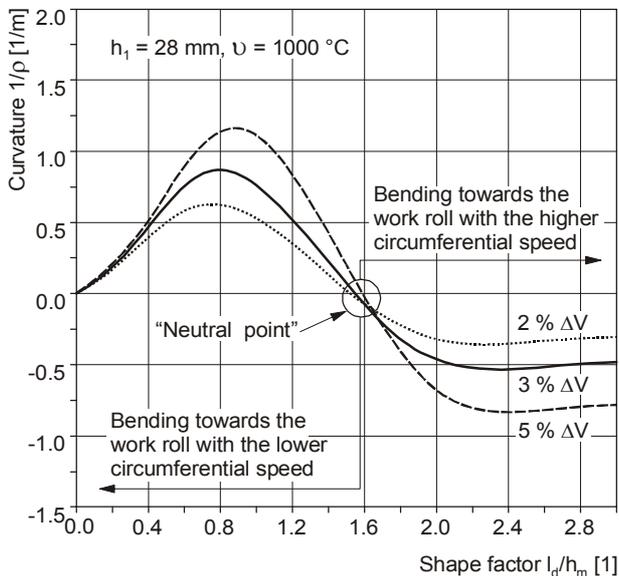


Bild 4. Simulationsergebnisse zur Schi- und Knickbildung an Grobblech  
Slika 4. Simulacija stvaranja "skije" i "prevoja" na debelom limu

zept eines modernen Grobblechwalzwerkes ein [3 - 4].

Am Beispiel eines Regelungsmodells für eine Drahtstraße soll der Einsatz der Simulation für das Erstellen von online-Programmen erklärt werden. Querschnittsfehler von Knüppeln sollen mittels spezieller Walzstrategien in der Walzstraße egalisiert werden, sodass der Endquerschnitt des gewalzten Drahtes in das enge Toleranzfeld der Weiterverarbeiter trifft. Da das Ausgleichen der Fehler während der Produktion erfolgen muss, FEM-Simulationen aber für on-line-Berechnungen viel zu langsam sind, ist ein Überwachungs- und Rege-lungsprogramm einzusetzen, welches auf einfachen und somit schnell zu berechnenden Zusammenhängen basiert. Quelle für das Erkennen und Aufstellen dieser einfachen Zusammenhänge ist auch hier wieder die FEM-Simulation (siehe Abb. 5). Sie bietet die Möglichkeit, in der

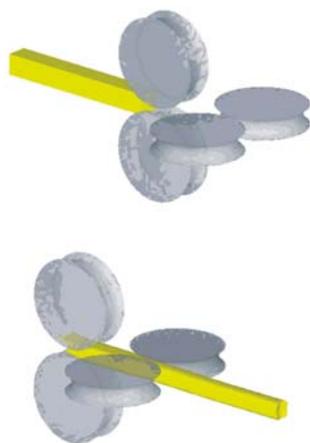


Bild 5. Simulation des Kaliberwalzens in einer Vortafel  
Slika 5. Simulacija valjanja kalibra u grupi valjaka za izduživanje

Realität gleichzeitig auf-tretende Störeinflüsse auf wenige Größen zu reduzi-eren und diese Schritt für Schritt nach Ursache und Wir-kung zu untersuchen. Die gefundenen Zusammenhänge können dann in einem entsprechend schnell ablaufenden Programm verwendet werden [5].

### Studien zu Produkteigenschaften

Bleche und Bänder, die rand- oder mittengewellig die Walzstraße verlassen, müssen in weiterer Produktionsfolge gerichtet werden (siehe Abb. 6). Mittels geeigneter Richtmaschinenanstellungen gelingt es, die während der Produktion entstandenen Planheitsfehler zu egalisieren. Um den Richtprozess reproduzierbar zu halten, ist es notwendig, den theoretischen Zusammenhang zwischen Planheitsfehlern und Richtmaschinenanstellwerten zu kennen. Der Prozess muss also in einem entsprechenden Online-programm nachempfunden werden, um so der Richtmasc-

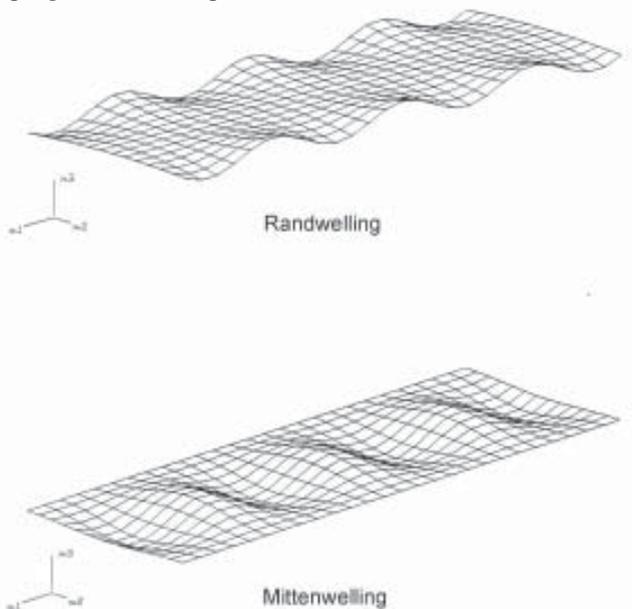


Bild 6. Mitten und randwelliges Blech  
Slika 6. Valovitost na sredini i na rubovima lima

hine die geeigneten Anstellwerte vorgeben zu können. Im Rahmen einer Dissertation wurde ein entsprechendes Richtprogramm entwickelt. Getestet wurde das so entwickelte Programm mit dem bewährten und allgemein anerkannten FEM-Programmpaket ABAQUS. Das Richtprogramm konnte so gestaltet werden, dass die mit ihm errechneten Ergebnisse gut mit jenen des Programmpaketes ABAQUS übereinstimmten [6].

Immer höher werdende Radlasten und Fahrgeschwindigkeiten erhöhen die Anforderungen an Geradheit, Oberfläche und Eigenspannungen der Schienen.

Die CEN (European Committee for Standardization) lässt in einem entsprechendem Normenentwurf Zugeigenspannungen im Schienenfuß bis 250 MPa zu.

Um sowohl das Entstehen von Eigenspannungen in Schienen besser zu verstehen als auch ihre Größe beeinflussen zu können, wurde im Rahmen einer Dissertation eine FEM-Simulationsstudie angefertigt. Begleitet wurde diese Arbeit von Messversuchen, welche das Materialverhalten der Schienenwerkstoffe genau erfassten, um dieses anschließend durch ein entsprechendes Materialmodell - es wurde ein Chaboche Modell verwendet - nachzubilden. Mittels der FEM-Simulation zeigt Schleizer [7], dass der Richtrollendurchmesser die entstehenden Eigenspannungen nicht beeinflusst. Abb. 7 zeigt die plastischen Dehnungen der Schiene unter einer Richtrolle. Weiters wird in [7]

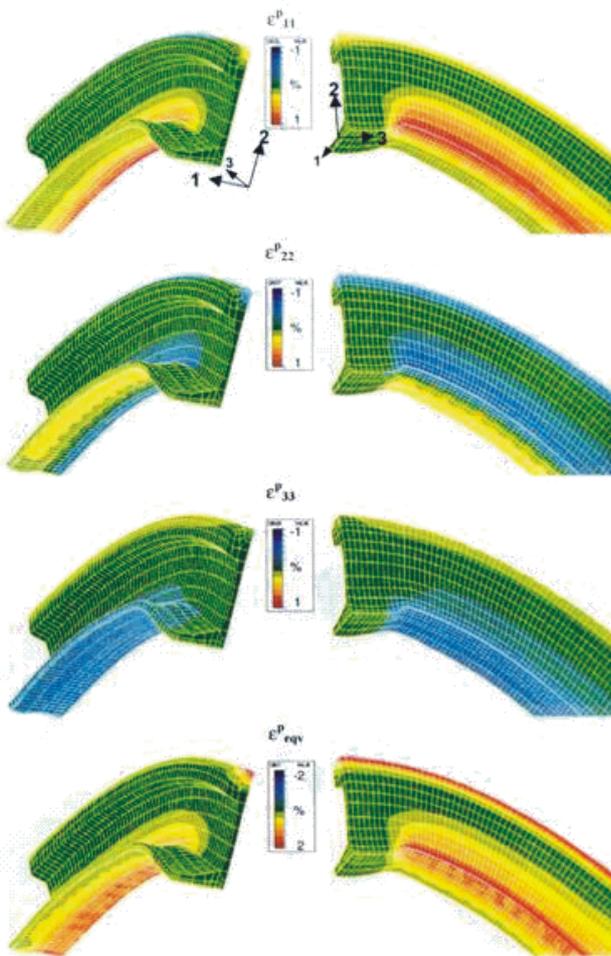


Bild 7. Simulation der Dehnungen während des Schienenrichtens  
Slika 7. Simulacija izduživanja pri ravnanju tračnica

gezeigt, dass zusätzliches Richten um die kleine Trägheitsachse die Eigenspannungsspitzen aus dem randnahen Bereich des Schienenkopfes und -fußes ins Schieneninnere verschiebt. Diesen Ergebnissen stehen jedoch die Arbeiten von Weiser [8] und Guericke [9] gegenüber, die eine deutliche Abhängigkeit der entstehenden Eigenspannungen vom Richtrollendurchmesser feststellten.

### Entwicklung und Simulation

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Simulation ist ihr Einsatz in der Entwicklung von neuen Bauteilen, Verfahren und Prozessen. Auch für dieses Anwendungsgebiet ist die Simulation auf solide Messergebnisse angewiesen, welche zum einen Simulationsergebnisse belegen und somit Vertrauen zum Modell aufbauen, zum anderen helfen, das Modell durch wesentliche Rand und Anfangsbedingungen klein zu halten. Zwei Verfahren, die am Institut entwickelt wurden, sollen Beispiele für die Möglichkeiten der Simulation auf diesem Gebiet geben.

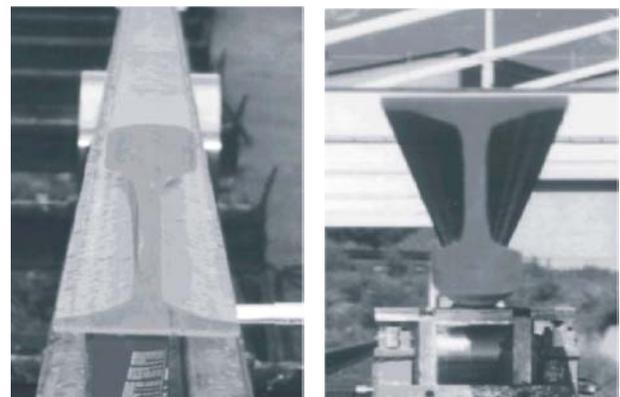


Bild 8. Versuche zur Entwicklung der Krümmungswaage  
Slika 8. Pokus o razvoju progiba na uravnoteženim tračnicama

Das bisherige Fehlen eines Verfahrens, welches die Krümmungen von Langgut nach deren Produktion erfassen kann, motivierte zur Entwicklung der im Folgenden beschriebenen „Krümmungswaage“. Durch das biegeschlaife Verhalten von Langgut zeigt dieses, auch wenn es im schwerelosen Raum durchgehend gekrümmt wäre, in Realität lediglich an seinen Enden seine „wahre“ Krümmung. Demzufolge biegt - vorerst gerade erscheinendes Langgut - nach dem Sägen oft unerwartet nach oben oder unten. Die Krümmungswaage nützt die Auflagerreaktionen, die das Langgut auf genau positionierte Messstützen ausübt. Abb. 8 zeigt einen Versuchsaufbau, wobei das linke

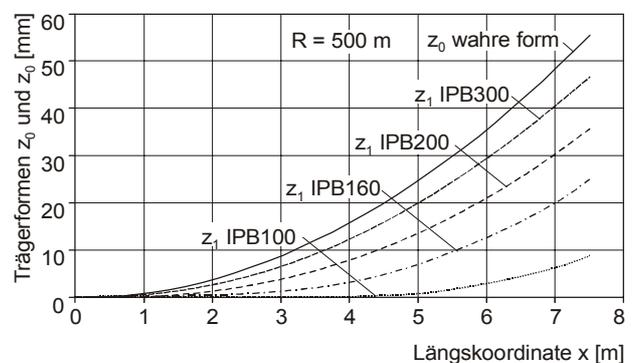


Bild 9. Simulationsergebnis zum Krümmungswaage  
Slika 9. Rezultati simuliranja progiba uravnotežene tračnice

Bild das Vermessen der Fußkrümmung, das rechte Bild das Vermessen der Kopfkrümmung ein und derselben Schiene zeigt. Die so ermittelten Krümmungen unterscheiden sich durch ihr Vorzeichen, sind jedoch betragsgleich, wodurch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gezeigt werden konnte.

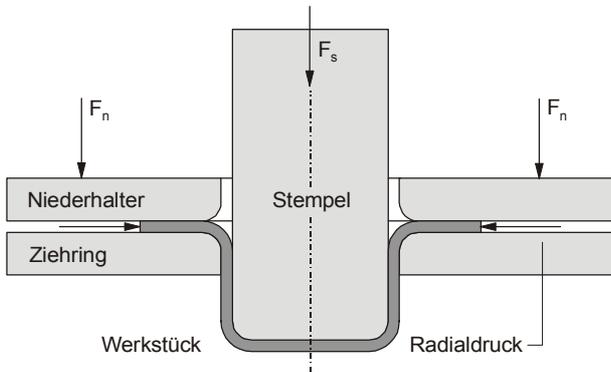


Bild 10. **Prinzipskizze zum Radialdrucktiefziehen**  
Slika 10. **Skica načina dubokog radijalnog izvlačenja pod tlakom**

Den Einfluss des Flächenträgheitsmomentes auf die Langgutform eines im schwerelosen Zustand gekrümmten Trägers zeigt Abb. 9 [10].

Ein weiteres Beispiel für ein neues Verfahren, das von der Idee über eine FEM-Simulationsstudie mittlerweile das Versuchsstadium erreicht hat, ist das Radialdrucktiefziehen. Ziel des neuen Verfahrens ist es, unterstützt durch einen radial über den Rondenmantel wirkenden Druck größere Tiefziehverhältnisse als sie konventionelle Tiefziehverfahren erlauben, zu ermöglichen (siehe Abb. 10).

Dabei wirkt der beispielsweise über ein Hydraulikummedium aufgebrachte Radialdruck für die

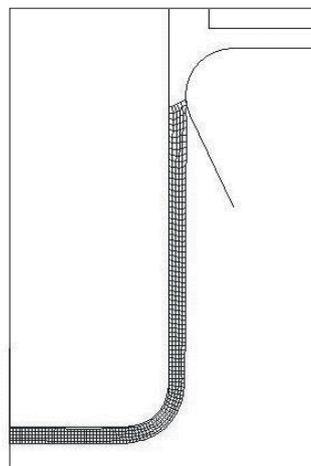


Bild 11. **Simulationsergebnis zum Radialdrucktiefziehen**  
Slika 11. **Rezultat simulacije dubokog radijalnog izvlačenja pod tlakom**

Fließbewegung des Materials zum Ziehspalt hin unterstützend und ermöglicht so unverhältnismäßig große Tiefziehverhältnisse.

Das durch eine FEM-Simulationsstudie (siehe Abb. 11) gewonnene Vertrauen motivierte zum Bau eines Versuchstandes, welcher die Vorhersage der Simulation voll bestätigte. Das Projekt befindet sich momentan in einer Phase, in der ein interessierter Industriepartner komplexere Versuche ermöglichen soll [11].

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit zeigt die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Metallurgie. Deutlich wurde veranschaulicht, wie eng Simulation und Versuch Hand in Hand gehen müssen und wie auf diese Art neue, bisher unbekannte Zusammenhänge erkannt werden können.

## LITERATUR

1. M. L. Cho: Bewertung der Anwendbarkeit der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Umformtechnik, Verlag Stahleisen, 1987
2. G. Ponschab: Entwicklung eines Simulationsrechenmodelles zur Ablauf- und Planungsuntersuchung eines Sauerstoff-Aufblas-Stahlwerkes. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1973
3. M. Philipp: Schibildung beim Walzen von Grobblech. Tagungsband zum XIX. Verformungskundlichen Kolloquium, 2000
4. M. Philipp, O. K. Harrer, W. Schwenzfeier, R. Wödlinger and Chr. Fischer: Turn-up and turn-down phenomena in plate rolling. 5<sup>th</sup> International ESAFORM Conference, Krakow, 2002
5. O. K. Harrer, T. Kvackaj und I. Pokorny: Numerical Simulation of Billet Rolling. Acta Metallurgica Slovaca Kosice, 2001
6. G. Finstermann: Rechnerische Simulation des Biegerichtens gebeulter Bleche und Bänder. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1989
7. G. Schleinzner: Residual Stress Formation During the Roller Straightening of Rails. VDI Verlag, 2000
8. J. Weiser: Analyse der Eigenspannungsentstehung beim Rollenrichten von Schienen. Ph. D. Thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997
9. W. Guericke: Modell zur Simulation elastisch-plastischer Biegeverformungen für technologische Bearbeitungsprozesse. Technische Mechanik 14, (1994) 155-176
10. G. Wollendorfer: Die Krümmungswaage - Ein neuartiges Messverfahren zum Bestimmen der Geradheit von Langgut. VDI Verlag, 2000.
11. Th. Hatzenbichler, W. Schwenzfeier und G. Wollendorfer: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Formkörpern aus flächigem Material. Patentanmeldung in Österreich M 2578