

An Article about Numerical Simulation of Incremental Forging Processes

The advancement of the potential of incremental forging methods, for instance cross wedge rolling, axial closed-die rolling or ring rolling, the focus being on resource efficiency and lightweight design, is one research priority at the Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik – IWU (Fraunhofer institute for machine tools and forming technology) in Chemnitz. This complex technique puts very high demands on the numerical simulation, among other things due to the fact that simulation

calculation involves relatively high computation time. That is another reason why the application of process simulation still clearly lags behind the simulation of non-incremental methods like drop forging or extrusion. The following article provides an overview of the institute's work on the numerical simulation of the incremental methods of cross wedge rolling, axial feed cross wedge rolling, ring rolling and axial closed-die rolling.

Beitrag zur numerischen Simulation inkrementeller Massivumformverfahren

Dipl.-Ing. Markus Bergmann,
Dipl.-Ing. André Wagner,
Dipl.-Ing. Jürgen Steger und
Dr.-Ing. habil. Bernd Lorenz, Chemnitz

Mit Fokus auf Ressourceneffizienz und Leichtbau bildet die Weiterentwicklung des Potenzials der inkrementellen Massivumformverfahren, genannt seien Querwalzen, Axialgesenkwalzen oder Ringwalzen, einen Forschungsschwerpunkt am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz. Diese komplexen Verfahren stellen an die

numerische Simulation sehr hohe Anforderungen, unter anderem da die Simulationsrechnungen mit relativ hohem Rechenaufwand verbunden sind. Auch deshalb steht die Anwendung der Prozesssimulation noch deutlich hinter dem Stand der Simulation nicht-inkrementeller Verfahren wie Schmieden oder Fließpressen zurück. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über Arbeiten am Institut zur numerischen Simulation der inkrementellen Verfahren Querkeilwalzen, Axialvorschubquerwalzen, Ringwalzen und Axialgesenkwalzen.

Einleitung

Für viele Unternehmen gehört die Prozesssimulation heute zum Standardwerkzeug bei der Auslegung von Prozessen der klassischen Umformverfahren wie Schmieden oder Fließpressen. Inkrementelle Prozesse, die durch komplexe Werkzeugkinematiken gekennzeichnet sind und bei denen der Werkstoff vielfachen lokalen Plastifizierungen ausgesetzt ist, stellen eine besondere Herausforderung dar [1].

Durch parallelisierten Einsatz von Mehrprozessoren und Verringerung der Komplexität der Modelle werden Rechenzeiten reduziert und die Modellierung handhabbar gestaltet. Die erzielten Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für das Verständnis und die Auslegung der Prozesse und Werkzeuge und führen zu einer deutlichen Reduzierung der Aufwände für Entwicklung und Erprobung.

Am Fraunhofer IWU wird die Simulation inkrementeller Umformverfahren intensiv genutzt. So werden die Entwicklung neuer Ver-

fahren beziehungsweise Verfahrensvarianten, die Erweiterung von Verfahrensgrenzen, die Verringerung der Einsatzmassen und der Einsatz neuer, hochfester beziehungsweise schwer umformbarer Werkstoffe durch die Simulation maßgeblich begleitet.

Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die Beschreibung des Fließverhaltens der Werkstoffe dar, da die meisten inkrementellen Umformverfahren durch wechselnde Lastrichtungen sowie sehr große Umformgrade gekennzeichnet sind.

In zunehmendem Maße werden schwer umformbare Werkstoffe, das heißt Werkstoffe mit hohen Fließspannungen und geringer Duktilität inkrementell umgeformt, was die Frage der Materialmodelle noch stärker in den Fokus rückt.

Der vorliegende Beitrag stellt einige inkrementelle Umformverfahren vor, die mittels numerischer Simulation unter Nutzung der

Softwarepakete Simufact Forming und Forge am Fraunhofer IWU untersucht werden.

Querwalzen

Querkeilwalzen bezeichnet ein Verfahren zum Umformen von zylindrischen Anfangsformen durch gegenläufig bewegte keilförmige Werkzeuge. Durch das radiale Einstechen der Walzkeile in die Anfangsform und das Verdrängen des Werkstoffes in axialer Richtung erfolgt eine Reduzierung des Anfangsdurchmessers entsprechend der im Werkzeug gespeicherten Form. Das Verfahren wird auf ebenen (Flachbackenquerwalzen) beziehungsweise zylindrischen (Rundbackenquerwalzen) Werkzeugträgern in den Temperaturbereichen der Kalt-, Halbwarm- oder Warmumformung angewendet. Das Querkeilwalzen ist sowohl in der Masseverteilung als auch für die Fertigung von rotationssymmetrischen Bauteilen etabliert [2, 3].

Bild 1 zeigt das Ergebnis der Simulation des Rundbackenquerkeilwalzens einer Vor-

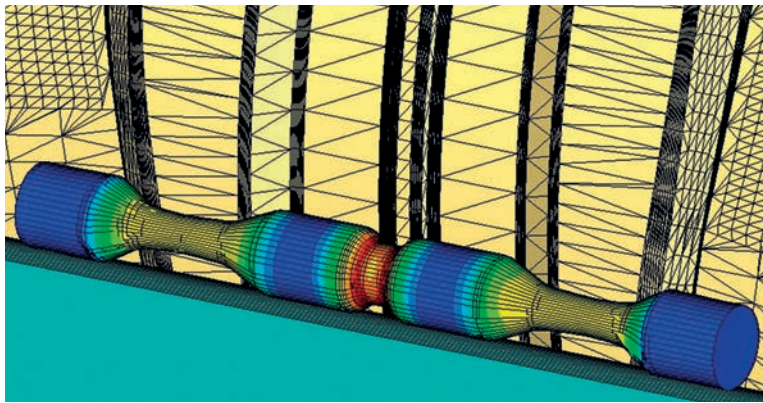


Bild 1: Rundbacken-Querkeilwalzen (Simufact.forming).

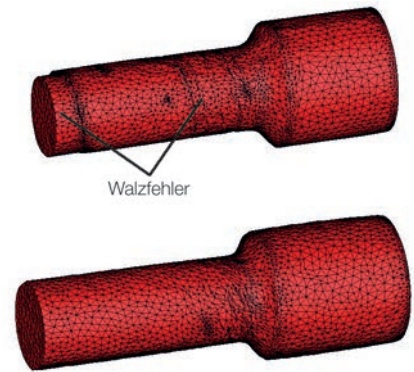
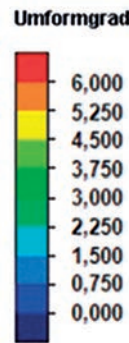


Bild 2: Querwalzsimulation, links Erstausslegung, rechts Variation Keilwinkel, Radien (Forge).

form. Das Halbzeug wird in den Walzspalt zwischen die Werkzeuge positioniert. Ein Stützlineal dient als Auflage und Positionierhilfe während des Prozesses. Die Berechnung erfolgt mit Schwerkraftdefinition, um die Werkstückposition während der Simulation des Prozesses möglichst realitätsnah abzubilden. Die Vernetzung des Halbzeuges erfolgt mit Hexaedern. Im dargestellten Beispiel weist das Halbzeug aus dem Werkstoff 1.0601 (C60) einen Ausgangsdurchmesser von 38 mm auf.

Der dargestellte Querwalzprozess wird in Simufact.forming numerisch stabil simuliert. Um die rotatorische Mitnahme des Halbzeugs zu gewährleisten und den Effekt von Mitnahmeriefen abzubilden, sind die Reibkoeffizienten mit Werten von 0,4 bis 0,7 relativ hoch angesetzt. Eine exaktere Modellierung erfordert eine richtungsabhängige Reibungsdefinition.

In Bild 2 sind die Ergebnisse der Simulation eines durch Flachquerkeilwalzen herzustellenden Bauteils als Kaltumformprozess dargestellt. Dabei wurde die Symmetrie der Umformung ausgenutzt, das heißt nur eine Hälfte des Teils wurde berechnet. Das Halbzeug aus dem Werkstoff AlMgSi1 hat einen Anfangsdurchmesser von 15 mm. Die Prozesssimulationen wurden mit Forge durchgeführt. Die gegenübergestellten Prozessergebnisse zeigen den Einfluss unterschiedlich ausgelegter Werkzeuge. In der oberen Darstellung sind für eine gegebene Werkzeugauslegung spiralförmige Walzfehler sichtbar. Durch Veränderung des

Keilwinkels und der Radien wird ein qualitativ verbessertes Umformergebnis erzielt (untere Darstellung).

Durch Simulationsstudien können neben den Parametern des Umformprozesses auch Einflussfaktoren wie die Werkstückpositionierung oder maschinentechnische Effekte analysiert werden. Beispielhaft dafür ist in Bild 3 die Rückwirkung eines unsymmetrischen Werkzeugeingriffs in Folge des Voreilens eines Werkzeugträgers beziehungsweise einer unzureichend definierten Lage des Halbzeugs während des Prozesses dargestellt. Links im Bild sind die Werkzeugkonturen in der Symmetrieebene durch die Linien dargestellt und rechts im Bild zeigt die Prozesssimulation, dass eine verstärkte Werkstoffaufstauung erzeugt wird. Diese entsteht am voreilenden Werkzeug. Mit der FE-Simulation lassen sich damit weitere, nicht-unmittelbar umformprozessbezogene Faktoren erfassen. Im Beispiel aus Bild 3 können kritische Grenzen in Bezug auf die Synchronität der Maschinenschlitten erkannt werden, Toleranzen für Prozessbedingungen wie zum Beispiel Einlegegenauigkeit abgeleitet werden oder Ursachen für Walzfehler, in diesem Fall der einer Überwalzung, erklärt werden. Die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen bilden die in der Praxis auftretenden Effekte sehr gut ab.

Das Axialvorschubquerwalzen ist eine Querwalztechnologie, bei der die Umformung über die Relativbewegung der Walzen und

des zylindrischen Werkstücks realisiert wird. Während der Axialbewegung des Werkstücks dringen die sich gleichsinnig drehenden Walzen in radialer Richtung gesteuert in das Werkstück ein und formen im Prozessverlauf die gewünschte Endkontur [4].

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Verfahrens für kleine und mittlere Stückzahlen ist die Prozessauslegung mittels numerischer Simulation ein wichtiger Baustein für die breite Anwendung des Verfahrens.

Das Modell zur numerischen Simulation des Axialvorschubquerwalzens besteht aus den zwei vormgebenden Walzen, dem Halbzeug und einem Manipulator. Der Manipulator, der fest mit dem Halbzeug verbunden ist, hat einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Mittelachse des Halbzeugs und wird mittels einer Linearbewegung positioniert. Durch die Bewegung des Manipulators in axialer Richtung wird eine definierte Länge des Halbzeugs umgeformt.

Bild 4 zeigt das Simulationsergebnis eines Axialvorschubquerwalzprozesses. Zur besseren Veranschaulichung ist nur eine im Eingriff befindliche Walze dargestellt. Das Werkstück wird rotatorisch mitgenommen und durch den Manipulator (graue Platte) axial bewegt. Gut erkennbar ist die auch in der Praxis auftretende Staubbildung vor der Walze, das heißt entgegengesetzt zur mittels des Manipulators realisierten Vorschubbewegung.

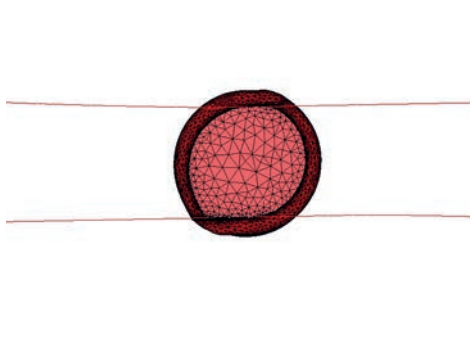


Bild 3: Querwalzsimulation, unsymmetrischer Werkzeugeingriff (Forge).

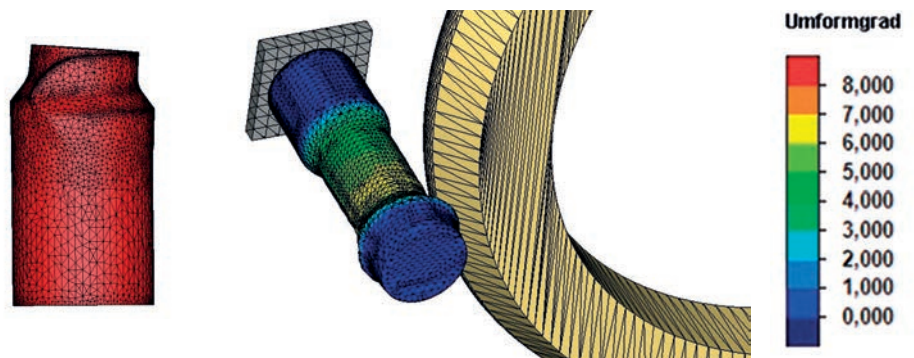


Bild 4: Simulation Axialvorschubquerwalzen (Simufact.forming).

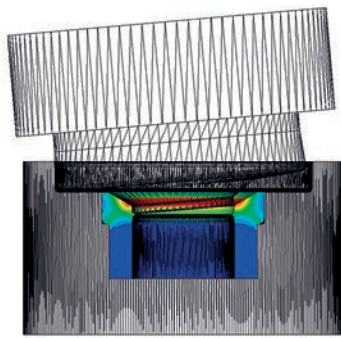


Bild 5: Simulation des Axialgesenkwalzens eines Ventilsitzes (Simufact.forming).

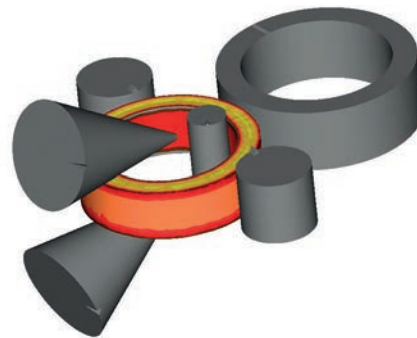
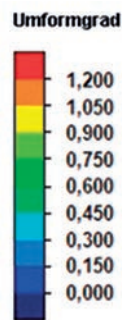
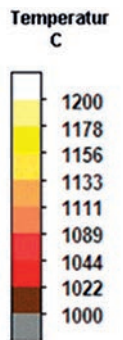


Bild 6: Temperaturgradient am Werkstück im Ringwalzprozess (Simufact.forming).



Bilder: Autoren

Wesentliche Herausforderungen bei der Modellierung von Querwalzverfahren hinsichtlich der Ergebnisqualität und Aussagefähigkeit der Prozesssimulation sind neben der Materialbeschreibung folgende Schwerpunkte:

- Reproduzierbarkeit im Prozess

Der Realprozess reagiert sensibel auf kleine Schwankungen der Prozessbedingungen. Unter anderem in Folge von Toleranzen der Anfangsform, der Temperatur beziehungsweise des Temperaturgradienten und der Abweichung der Einlegeposition ist von einer Streuung der Umformergebnisse auszugehen. Durch eine Reihe von Variantenrechnungen können diese Abweichungen simulativ untersucht werden.

- Reibung (Ermittlung und Implementierung)

Ein wesentlicher Aspekt der Modellablenkung ist die Reibungsdefinition [5]. Die in der Praxis an den Werkzeugen mittels Riefen und Rauheit eingebrachten Reiboberflächenabschnitte führen zu richtungsabhängigem und über das Werkzeug nicht konstantem Reib- beziehungsweise Fließverhalten. Es existieren verschiedene Ansätze, um diese komplexen Reibbedingungen im Simulationsmodell abzubilden. So kann mit lokal unterschiedlichen Reibwerten modelliert werden [6] oder grobe Oberflächenstrukturen als geometrische Elemente im Werkzeug integriert werden.

- Werkzeugverschleiß

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt beim Querwalzen ist die sich über die Standzeit des Werkzeugs verändernde Werkzeuggeometrie infolge der Verschleißerscheinungen. Eine den Verschleiß berücksichtigende Prozesssimulation durch Anpassung der Werkzeuggeometrie ist je nach Anforderung notwendig. Ähnliches gilt für den Einarbeitungsprozess.

- Schädigungsvorhersage

Neben den Walzfehlern, wie in Bild 2 dargestellt, sind Werkstoffschädigungen wie Oberflächenrisse oder Kernrisse bei Quer-

walzprozessen relevant. Unterschiedliche Schädigungsmodelle werden unter anderem zur Untersuchung dieser Versagensarten angewandt [7, 8, 9].

Axialgesenkwalzen

Axialgesenkwalzen bezeichnet ein Verfahren, bei dem ring-, scheiben- oder zylinderförmige Ausgangsgeometrien zu einer Zwischen- oder Endform verarbeitet werden. Es wird beispielsweise zur Fertigung von Flanschen, Felgen und Antriebsrädern angewendet. Ein konturiertes Oberwerkzeug walzt das Werkstück in eine Gesenkkontur. Ober- und Unterwerkzeug sowie Werkstück befinden sich dabei in einer gleichsinnigen, (nahezu) synchronen Drehbewegung, während über eine axiale Zustellbewegung, die üblicherweise im Oberwerkzeug umgesetzt wird, das Werkstück in das Gesenk gedrückt wird. Das Oberwerkzeug ist gegenüber dem Unterwerkzeug um einen kleinen Winkel von zirka 5° geneigt. Diese Neigung bewirkt, dass während der Umformung immer nur ein relativ kleiner Bereich des Werkstücks in Umformkontakt ist und die Gesamtumformung als Folge kleiner partieller Umformschritte realisiert wird [10].

Zur Generierung eines Prozessmodells sind neben den Geometriedaten von Werk- und Halbzeug, die Rotationsgeschwindigkeit der synchron rotierenden Werkzeuge und die Vorschubgeschwindigkeit des Oberwerkzeugs abzubilden.

In Bild 5 ist im Querschnitt die Ausformung eines Ventilsitzes aus 1.4718 (X45CrSi9-3) dargestellt. Die Anfangsgeometrie entspricht einem dickwandigen, rohrförmigen Halbzeug, welches wie dargestellt im oberen Bereich umgeformt wird. Die Werkzeuggestaltung konnte im Vorfeld der Werkzeugfertigung mittels Prozesssimulation so optimiert werden, dass kein weiterer Änderungszyklus erforderlich war.

Für das Axialgesenkwalzen ist das Werkstofffließverhalten ein zentraler Betrachtungsgegenstand, um Prozesskräfte exakt auszugeben. Weiterhin ist die Berücksichtigung von Maschinen- und Werkzeugsteifigkeit für eine Reihe von Anwendungen zweckmäßig.

Hierbei steigen jedoch die Rechenzeiten jeweils stark an.

Ringwalzen

Das Ringwalzen ist ein Verfahren, das in der Praxis in unterschiedlichen Konfigurationen zum Einsatz kommt und bei dem in der Regel aus einem gelochten Halbzeug, welches wiederum mittels Stauchen und Lochen unmittelbar zuvor bereitgestellt wird, ein einfaches oder konturiertes ringförmiges Bauteil hergestellt wird.

Dieses Verfahren ist durch eine Reihe von an der Umformung aktiv und passiv beteiligten Werkzeugen, meist eine Kombination von Zylinder- und Kegelwalzen, gekennzeichnet. Alle im Eingriff befindlichen Werkzeuge haben eine spezifische Kinematik. Das Ringwalzen ist auf Grund der großen Anzahl kinematisch zwangsbewegter Werkzeuge hinsichtlich des Modellierungsaufwands anspruchsvoll. Je nach Softwaresystem stehen unterschiedliche Möglichkeiten, teilweise auch spezifische Module der kinematischen Modellierung insbesondere für die Stützwalzen zur Verfügung.

In Bild 6 ist das Ergebnis der Simulation eines Ringwalzprozesses mit einem Ring aus 1.0570 (St52) mit 520 mm Enddurchmesser dargestellt. Die Farbskala charakterisiert die Temperaturen am Ring. Das Ringwachstum und die Parameterwechselwirkungen zeigen erfahrungsgemäß gute Übereinstimmungen mit der Praxis. Die Möglichkeit der Simulation der gesamten Prozesskette mit den dem Ringwalzen vorgelagerten Prozessen Stauchen und Lochen ist eine wertvolle Hilfe bei der Prozessauslegung.

Neben dem Ringwalzen sind auch Scheibenwalzprozesse, welche große Ähnlichkeiten hinsichtlich der Kinematik zum Ringwalzen aufweisen, mittels Prozesssimulation abbildbar. Eine wesentliche Herausforderung bei der Simulation von Ringwalzprozessen ist die Berücksichtigung von Erholungsvorgängen. Der Werkstoff ist während einer Ringumdrehung signifikanten Erholungsvorgängen unterworfen, die das Fließverhalten des Werkstoffs beeinflussen. Wie in anderen Prozessen haben auch hier das Wärmeübergangs- und

das Reibsystem großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Fazit

Im Fraunhofer IWU hat sich die numerische Simulation zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Forschung und Entwicklung inkrementeller Massivumformprozesse entwickelt. Die zur Verfügung stehenden Softwarelösungen ermöglichen eine komfortable Modellierung. Die Generierung von numerisch stabilen Simulationen ist für eine Fülle von inkrementellen Umformprozessen heute institutionell möglich. Durch Parallelisierung der Berechnung reduzieren sich die Rechenzeiten wesentlich. Die vorgestellten Prozesse können, betrachtet man die reine Rechenzeit,

in 24 bis 96 Stunden numerisch simuliert werden.

Aufbauend auf dem Stand kommerzieller numerischer Simulationslösungen sind eine Reihe von Erweiterungen zur weiteren Steigerung der Aussagefähigkeit der Prozesssimulation einzugrenzen. Je nach Verfahrenscharakteristik ist eine Beurteilung der Ergebnisse der Prozesssimulation vorzunehmen.

Mit der Fortentwicklung der Simulationslösungen gelingt es in zunehmendem Maß, inkrementelle Umformprozesse realitätsnah und mit immer akzeptabler werdendem Aufwand abzubilden und gesicherte Erkenntnisse zu gewinnen. ■

Literatur

- [1] Groche, P.; Fritsche D.; Tekkaya, E. A.; Allwood J. M.; Hirt G.; Neugebauer R.: Incremental Bulk Metal Forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 2, 2007, S. 635-656.
- [2] Pater, Z.: Development of Cross-Wedge Rolling Theory and Technology, Steel Research International. Special edition: Metal Forming 2010, 81 (2010), S. 25-32.
- [3] Neugebauer, R.; Lorenz, B.; Steger, J.; Holstein, D.: Cross wedge rolling used for preforming of titanium aero engine vanes, Steel research international, Special Edition, 79/2008, S. 375-381.
- [4] Ficker, T.; Hardtmann, A.: Entwicklung des Axial-Vorschub-Querwalzens an der TU Dresden – ein historischer Überblick von Anfang der 1970-er Jahre bis heute; Verlag Meisenbach; www.utfscience.de, II/2012T.
- [5] Li, Q.; Lovell, M.: On the critical interfacial friction of a two-roll CWR process, J. Mater. Process. Technol. 160/2005, S. 245-256.

- [6] Mangin, P.; Langlois, L.; Bigot, R.: Role of Surface Texture on Workpiece Angular Deformation in Cross Wedge Rolling, Special Issue Bulk Metal Forming, ICTP 2011, S. 155-164.
- [7] Zhi, Jia; Jie, Zhou; Jin-jin, Ji; Ying-yan, Yu; Chuan, Xiao: Influence of tool parameters on internal voids in cross wedge rolling of aluminum alloy parts, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 22, Supplement 1, 2012, S. 21-26.
- [8] Qiang, Li; Lovell, M.R.; Slaughter, W.; Tagavi, K.: Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 125-126, 2002, S. 248-257.
- [9] Toscanelli, O.; Colla, V.; Olano, Z.I.: Finite Element Simulation of Hot Cross Wedge Rolling of Steel Products, Computer Modeling and Simulation (EMS), 2010, S. 546-551.
- [10] Marczinski, H.-J.: Axial closed-die rolling, an economic hot-forming method due to high precision and flexibility, Journal of Materials Processing Tech., 09/1992, 34, S. 495-502.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der vorgestellten

Arbeiten des Verbundprojekts REFORM 033R027A im Rahmen des Förderschwerpunkts r^2 „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“.



Dipl.-Ing.
Markus Bergmann



Dipl.-Ing. André Wagner



Dipl.-Ing. Jürgen Steger



Dr.-Ing. habil.
Bernd Lorenz