

Alles Simulanten!

Was würde passieren,
wenn das
Umformen
rückwärts
ablaufen
würde?



„Und dann simulieren wir das.“

Egal, ob sie Fabriken oder Hüftprothesen planen, Lichtwege oder Fräsbahnen optimieren: Maschinenbau-Ingenieure kommen ohne diesen Satz nicht aus.

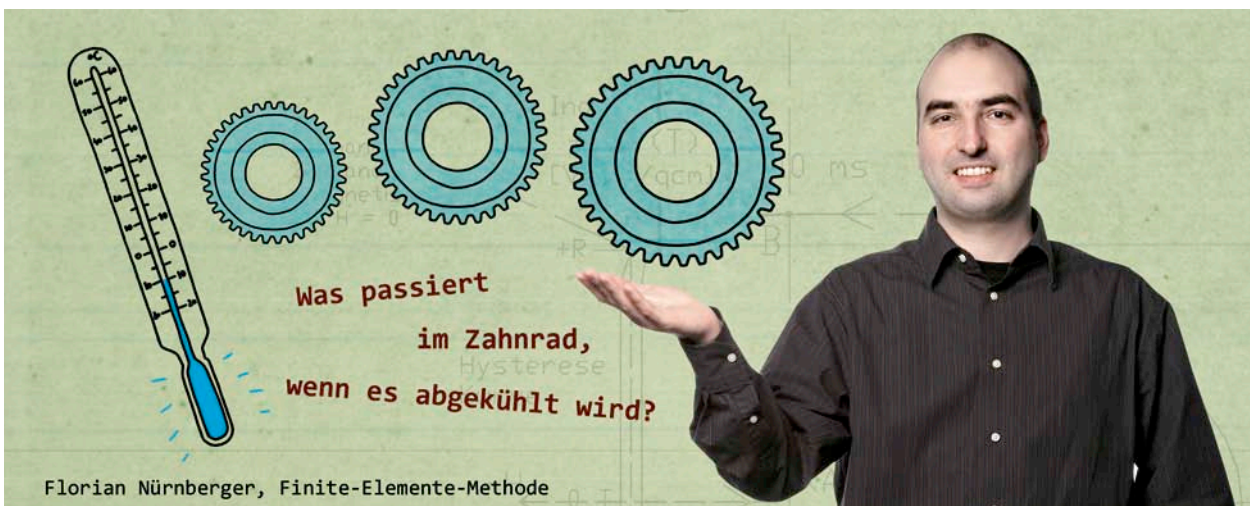
Warum?

Die Königsdisziplin unter den Simulationen ist die FEM, die Finite-Elemente-Methode. Ohne sie müsste ein Großteil der Forscher einpacken, und die Welt wäre über Nacht eine Welt mit schlechteren Tennisschlägern und schlechterem Parmesankäse; beides wird mit Hilfe von FE-Simulationen optimiert. Vor allem aber wäre die Welt sehr viel ärmer an Innovationen und an maßgeschneiderten Produkten, weil nichts „schnell mal“ am Rechner durchgespielt werden könnte; das Zusammenspiel komplexer Prozesse wäre holprig. Um sich vorzustellen, wie die Welt ohne FEM aussähe, braucht man fast so viel Phantasie wie für die Vorstellung einer Welt ohne Computer, denn im Automobil- und Schiffbau, in der Luft- und Raumfahrt wird die FEM immerhin schon seit 50 Jahren angewendet; im Maschinenbau insgesamt seit etwa 40 Jahren.

Sicher ist, dass es Florian Nürnbergers Promotion ohne FEM nicht geben würde. Der Bereichsleiter „Technologie der Werkstoffe“ am Institut für Werkstoffkunde hat sich folgender Herausforderung gestellt: Durch Abschrecken wird, wenn man alles richtig macht, ein heißes, geschmiedetes Zahnrad dreimal so hart wie ein schlecht abgeschrecktes. Aber wie macht man alles richtig, um ein außen möglichst hartes und innen vergleichsweise weiches und damit zähes Zahnrad zu bekommen? „Man hat drei Eigenschaften“, erklärt Nürnberger das Problem, „die sich alle gegenseitig beeinflussen: die Temperatur, die Eigenspannungen und die Mikrostruktur des Stahls. Und ohne Simulation hat man keine Chance, zu verstehen, was im Zeitverlauf während des Abkühlens im Zahnrad passiert, auch wenn man alle physikalischen Prozesse kennt.“

Ein klarer Fall für die FEM: Die Physik ist bekannt, die Geometrie ist bekannt, die Kräfte sind bekannt, und Nürnberger kennt sich aus mit ANSYS, einer weit verbreiteten FEM-Software. Einfach ist es damit noch lange nicht. Aber immerhin im Rahmen einer Promotion zu lösen.

Um zu verstehen, wie die FEM funktioniert, eignet sich das aller-einfachste, mechanische Beispiel, das trotzdem nicht ohne Oberstufen-Mathematik auskommt: Wenn man ausrechnen will, wie sich ein Balken durchbiegt, auf dem ein Gewicht liegt, teilt man diesen Balken in Gedanken in Abschnitte: den linken Abschnitt mit Auflager, den rechten Abschnitt mit Auflager, den mittleren mit dem Gewicht. Alle drei Abschnitte werden durch „Elemente“ und die vier „Knoten“ – das sind die Endpunkte und die Verbindungspunkte der Elemente – dargestellt.



Dann teilt man der FEM-Software mit, dass es sich um ein Biegeproblem mit eben diesen Knoten und Elementen handelt, gibt die Geometrien, die Kräfte und das Material ein – und das Programm wählt die entsprechende Steifigkeitsmatrix aus, die das prinzipielle Durchbiegeverhalten dieses Balkens repräsentiert. Dann wählt das Programm die Gleichung für die potenzielle Energie dieses „Balkensystems“ aus – und löst sie wie eine klassische Optimierungsaufgabe: Ein System stellt sich immer so ein, dass die potenzielle Energie minimal wird. Und das Minimum einer Gleichung errechnet man, indem man deren Ableitung gleich null setzt. Aus diesem Ergebnis lassen sich schließlich die gewünschten Größen ablesen: wie sich die vier Knoten verschieben, wie sich also der Balken an diesen Positionen durchbiegt.

„Für statische Probleme ist die FEM gar kein Aufwand“ sagt Nürnberger, „aber wenn es dynamisch wird, wenn Bewegungen mitgerechnet werden müssen, dann wird es richtig aufwendig“. Und aufwendig heißt auch: zeitaufwendig. Da gehen gut und gern für eine Simulation einige Tage ins Land.

Die Black Box

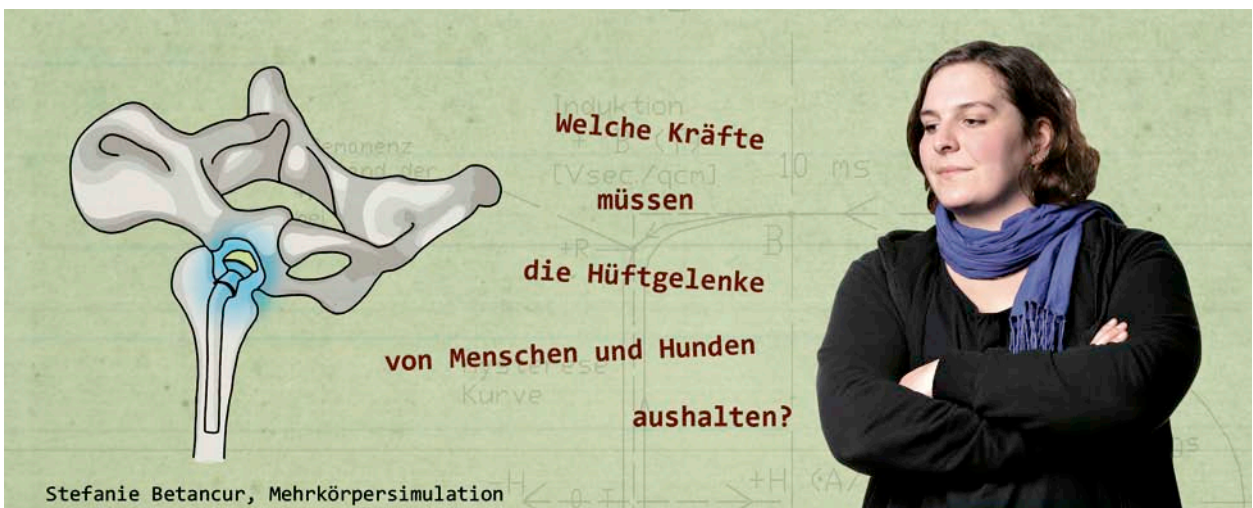
Manchmal hat man diese Zeit nicht, manchmal kennt man die genauen physikalischen Prozesse gar nicht. Dann braucht man etwas anderes. Zum Beispiel Künstliche Neuronale Netze. Bei Florian Nürnberger und seinem Härteprozess funktioniert diese Alternative so: Er stellt Nervenzellen im Rechner durch einfache Funktionen dar, verbindet sie miteinander, versieht sie mit variabler Gewichtung. Dann füttert er dieses Netzwerk mit den Ergebnissen aus einem guten Dutzend Experimente, so dass es den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen erlernen kann, ohne diesen Zusammenhang freilich „verstehen“ zu können. Einmal gelernt, liefert das Netzwerk in der Folge auch die Ergebnisse zu neu eingegebenen Eingangsgrößen.

Das Verfahren selbst ist längst etabliert: Die Post beispielsweise nutzt Künstliche Neuronale Netze, die Handschriften lesen lernen. Große Stahlwerke sammeln oft all ihre Daten in solchen Netzwerken und können dann bei einem Anstich am Hochofen quasi auf Knopfdruck entscheiden, wofür sich der aktuel-

le Stahl eignet und ob er eventuell nachbehandelt werden muss.

Die Zurückdenker

Adrian Santangelo hat auch keine Zeit. Und die physikalischen Prozesse hinter seiner Simulation kennt er nicht nur nicht – es gibt sie nicht. Denn er simuliert etwas, was in der Natur nicht vorkommt. Ungefähr so, als würde er eine zerbrochene Tasse wieder heile simulieren, um zu sehen, wie die Tasse ursprünglich aussah. Santangelo ist Ingenieur am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen. Und Umformer müssen sich gelegentlich überlegen, wie die sogenannte Vorform aussehen muss, damit nach dem Umformen in der tonnenschweren Presse genau das erwünschte Bauteil herauskommt. Üblicherweise nutzen sie dafür die FEM. „Aber man muss ja eine mögliche Vorform schon in die FEM hineinstecken, um herauszubekommen, ob sie geeignet ist. Wenn nicht, startet man mit einer veränderten Vorform einen neuen Versuch.“ Und noch einen Versuch und noch einen... Schon vor einigen Jahren hat dieses Vorgehen am IFUM für so großen Unmut gesorgt, dass einer der Wissenschaftler



Stefanie Betancur, Mehrkörpersimulation

die Rückwärtssimulation in zwei Dimensionen entwickelte, die allerdings nur für rotationssymmetrische Körper – etwa Flansche oder annähernd Zahnräder – galt. Santangelo will sie jetzt dreidimensional und damit für alle Umformgeometrien anwendbar machen. Dafür hat er die Theorie zum Werkstofffluss entlang besonderer Verdrängungsbahnen weiterentwickelt und das Modell erweitert. „Es ist nicht leicht zu erklären, denn was wir simulieren, gibt es physikalisch gesehen ja gar nicht“, gibt er zu, während er einige schematische Darstellungen zeigt. Tatsächlich läuft darin alles rückwärts: Das Umformwerkzeug hebt sich ein Stück aus dem Gesenk, und Material von den äußersten Punkten füllt den entstehenden Hohlraum zwischen Werkstück und Werkzeug aus, dann hebt sich das Werkzeug ein weiteres Stück, und noch eins... Die Simulation soll in Zukunft keine Stunde dauern, und die Vorform, die dort herauskommt, kommt vorn in die FEM wieder hinein – als realitätsnahe Ausgangsbasis.

Von Hüften und Hunden

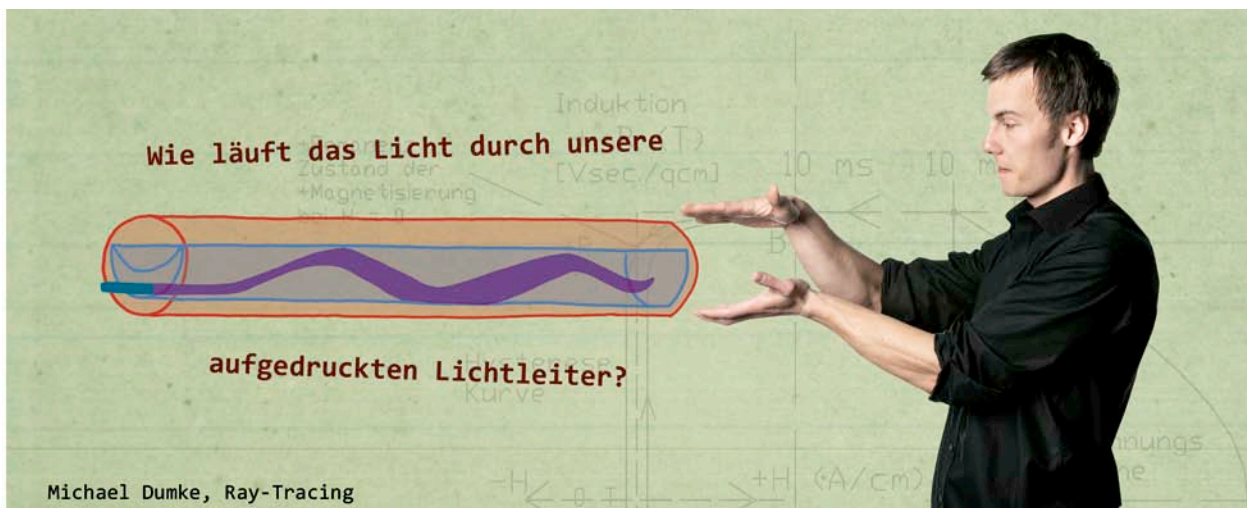
Gleich gegenüber von Adrian Santangelo sitzt Stefanie Betancur, Experte

für Hüftprothesen bei Mensch und Hund. Natürlich ist sie keine Orthopädin, sondern ebenfalls Ingenieurin in der Abteilung für CA-Techniken, also für computergestützte Techniken. In ihrer Mehrkörpersimulation (MKS) geht es um Hüftknochen und -gelenke, um die Bewegung der Probanden und um Prothesen. Bei der Mehrkörpersimulation vom Hund übrigens ist das IFUM führend, es ist das erste Institut, das eine solche MKS vom Hund entwickelt hat. Hüftprothesen für Hunde haben nicht nur einen immer größeren Markt, Hunde sind in der Medizin auch die Modelltiere, wenn es um die Prothesenentwicklung beim Menschen geht.

Betancurs Problem sind: Muskeln. „Wir wollen die Kräfte nachbilden, die beim Gehen in den Gelenken wirken. Die Knochen, Gelenke und Muskeln bilden unsere Modelle, auf die wir die Theorien der Mechanik anwenden können. Man kriegt allerdings nicht automatisch die richtigen Kräfte raus, weil nicht klar ist, wie sich die Muskeln in Realität verhalten.“ Das Zusammenspiel von experimentellen Daten und Simulationen ist daher ausgefeilt: An der TiHo, der Stiftung Tierärztliche Hochschule in Hannover, laufen Testpersonen und

Testhunde über ein spezielles Laufband, das die Bodenreaktionskräfte für alle Füße beziehungsweise Pfoten aufnimmt, während über besondere reflektierende Marker die Bewegung optisch erfasst wird. Diese Daten werden genutzt, um dem Simulationsmodell beizubringen, wie sich die Muskeln kontrahieren müssen, um die realistischen Bewegungen nachzuahmen. So entsteht ein Modell, mit dessen Hilfe die Gelenkkräfte berechnet werden können. Dieses Modell wiederum wird mithilfe einzelner, real in Gelenken gemessener Kräfte validiert, die in einer öffentlich zugänglichen Datenbank hinterlegt sind. „Für Hunde gibt es leider keine direkte Datenbank, sondern nur Daten aus einer einzigen Veröffentlichung“, bedauert Betancur. Das validierte Modell von Mensch und Hund schließlich kann Aussagen liefern über die individuellen Gelenkkräfte bei künftigen Hüftprothesenträgern.

Die Frage bleibt: Was haben Gelenkkräfte mit Hüftprothesen, was hat das Thema als solches mit einem Institut für Umformtechnik zu tun? Tatsächlich ist das Ziel der Wissenschaftler, Prothesen patientenoptimiert, also individualisiert, umformtechnisch herzustellen. Ein Schritt auf dem Weg ist



die Simulation (mithilfe der FEM) der Knochenumbauprozesse in der Nähe der Prothese, und dafür wird auch der Input aus der MKS von Stefanie Bencancur gebraucht.

Der Strahlverfolger

Im Sonderforschungsbereich „Gentelgige Bauteile im Lebenszyklus“ geht es darum, ein Bauteil und die Informationen, die es betreffen, zu verbinden – und zwar so, dass die Bauteilinformationen selbst Teil des Bauteils werden. Michael Dumke vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik verfolgt für sein Teilprojekt das Ziel, informationstragende Strukturen mit Bauteilen zu verschmelzen. Diese „informationstragenden Strukturen“ sind in eine Metallblechvertiefung aufgedruckte Lichtwellenleiter, bestehend aus Mantel und Kern. Das am ITA neu entwickelte Verfahren ermöglicht es, den Wellenleiter in seinem Verlauf an die Geometrie der Bauteile anzupassen. Kern- und Mantelmaterial unterscheiden sich lediglich durch ihren Brechungsindex; man könnte sagen: Der Mantel lässt das Licht nicht raus.

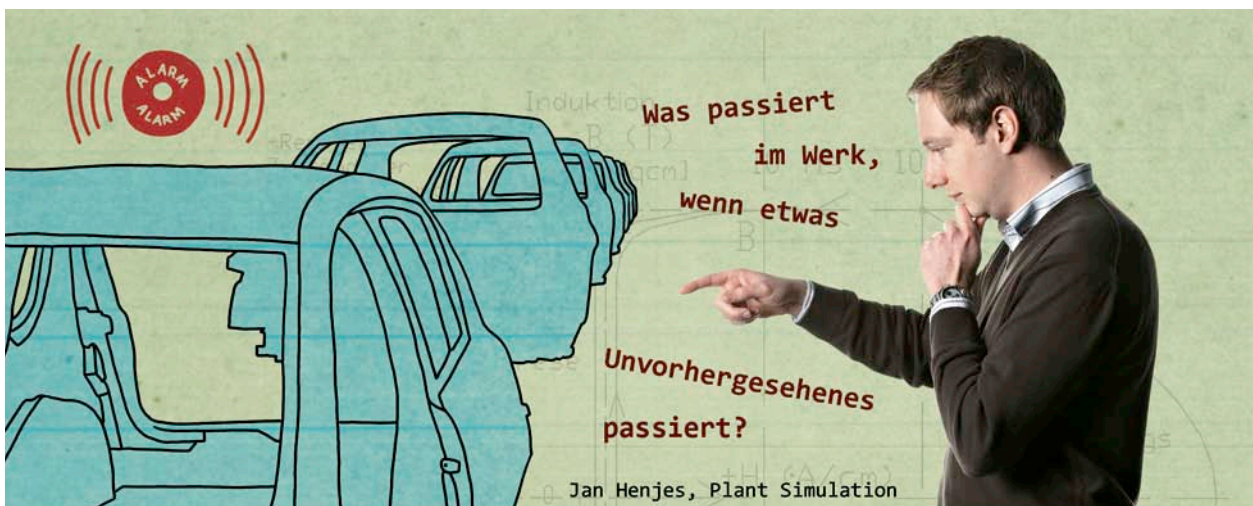
Durch die Annäherung der Wellenleiterquerschnittsfläche an ein

kreisähnliches Profil und durch eine hohe Formstabilität des Querschnitts kann Dumke Leistungsverluste deutlich minimieren. Wie aber genau das Licht – Dumke nutzt einfarbig rotes – durch den Leiter vorankommt, wie groß die Verluste sind, je nach Einfallswinkel, und wie der optimale Querschnitt aussieht, das ist schwer zu sagen und wird deshalb simuliert. Der ITA-Ingenieur erstellt dafür ein CAD-Modell, also ein dreidimensionales Computermodell von seinem aufgedruckten Leiter und überführt es in die Ray-Tracing-Software Zemax. Die betrachtet Licht zwar als ein geometrisches Strahlenbündel und weder als Wellen- noch als Teilchenphänomen. Aber mit ein paar gezielten Anpassungen der Welleneffekte lässt es sich erreichen, dass sich die Lichtwelle wie ein Strahl mit geometrischer Optik beschreiben lässt.

„Was-wäre-wenn“- Spiele fürs Werk

Jan Henjes verfolgt keine Lichtstrahlen. Er will ganze Fertigungen darstellen und optimieren. Der Wirtschaftsingenieur vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen arbeitet, wie die meis-

ten seiner Kollegen aus dem Bereich „Fertigungsplanung und -organisation“, mit der Materialflussoftware **Plant Simulation**. Was passiert, wenn nächste Woche mit einem anderen Modell aus Früh-, Spät- oder Nachschichten auf Kundenwünsche reagiert werden muss? Was, wenn die Taktzeiten an der Lackierstraße erhöht werden oder eine Anlage für die Dauer einer Schicht nicht auf Volllast laufen kann? Diese Fragen beispielsweise hatte Volkswagen Nutzfahrzeuge den Ingenieuren gestellt, denn das bei VWN vorhandene Fertigungsinformationssystem bildete zwar die tägliche Fertigung ab, mit „Was-wäre-wenn-Spielen“ konnte es aber nicht dienen. Also schufen Jan Henjes und sein Kollege Peter Blümel ein System mit intuitiv nutzbarer Bedienoberfläche, das modular in das bei VWN bestehende Simulationsmodell eingefügt werden konnte, und mit dem die Mitarbeiter jetzt verschiedene Szenarien des Produktionsablaufs durchspielen können. „Damit lässt sich auch testen, ob es beispielsweise sinnvoll ist, an Engpass-Stellen auf Vorrat zu arbeiten oder mit mehr Beschäftigten den Rückstand hinterher aufzuholen – und welche Auswirkungen das jeweils auf den Durchsatz von Fahr-



zeugen und auf die Liefertreue hat“, erklärt Henjes. Dabei wurde auch die aufwendige „Just-in-Sequence“-Anforderung der Porsche-Panamera-Lieferkette berücksichtigt: Die damals neu in die VWN-Fertigung aufgenommenen Panamera-Karosserien müssen in genau festgelegter Reihenfolge das Werk verlassen.

Auf der Spur der Ameisen

Was haben Ameisen, Handlungsreisende und die spanende Fertigung eines komplexen Bauteils gemeinsam? Der Handlungsreisende, der viele Städte ansteuern will, und der Prozessplaner, der viele Löcher mit unterschiedlichen Werkzeugorientierungen bohren muss, stellen sich die gleiche Frage: Welche Reihenfolge ist die beste? In der Mathematik und Informatik werden solche Herausforderungen als „Traveling-Salesman“-Problem bezeichnet. Die Aufgabe ist nicht schnell lösbar, da bereits eine geringe Anzahl von zu besuchenden Städten zu einer sehr hohen Anzahl von Lösungsmöglichkeiten führt. Die Ameisen allerdings kennen die Lösung, zumindest annähernd. Und Patryk Hoppe, der wie Jan Henjes

zur „Fertigungsplanung und -organisation“ des IFW gehört, kennt sie auch: Ameisen bilden in kürzester Zeit Ameisenstraßen, weil sie sich an Duftstoffen orientieren, die sie selbst absondern. Wenn zwei Wege ans Ziel führen, einer aber kürzer ist als der andere, sind dort anfangs theoretisch gleichviele Ameisen unterwegs, auf dem kürzeren ist dann aber die Ameisendichte höher. Damit ist dort auch der Duft stärker, und das Phänomen „Ameisenstraße“ hat begonnen: Bald nutzen alle Ameisen den kürzeren Weg. Auf diese Weise finden die Ameisen auch die kürzesten Wege zwischen Städten oder Bohrlöchern – innerhalb einer Simulation mit vielen Durchläufen. Diese Ameisensimulation hat Hoppe auf die spanende Fertigung übertragen. Das Schöne daran: Sie ist erstens sehr einfach und liefert zweitens in wenigen Sekunden ein Ergebnis. Nicht garantiert das beste Ergebnis – aber ein sehr gutes Ergebnis, und genau darum geht es. Hoppe hat diese Art der Optimierung neben mehreren anderen genutzt, um den besten Werkzeugweg automatisch und kollisionsfrei für eine Werkzeugmaschine zu entwickeln. „Und der beste Weg“, hat er festgestellt, „ist definitiv nicht der naheliegende di-

rekte Weg, der üblicherweise genommen wird: Einmal außen rum, dann im Zickzack die Innenlöcher anfahren.“ Ameisen sind manchmal einfach schlauer.

Die Selberdenker

Simuliert wird noch viel mehr – allein in diesem Magazin findet man noch die Rekonturierung von instandgesetzten Turbinenkomponenten (S. 26), einige Methoden, Fräsprozesse und Produktionsprozesse computergestützt zu planen und zu steuern (S. 43) und die Simulationen für Bohrtechnik, Antennen und Elektronikkomponenten in der Hochleistungsbohrtechnik (S.32).

Zur Beruhigung all derer, die Sorge um das Selberdenken in der Wissenschaft haben, bietet sich als Schlussatz ein Satz aus dem Standard-Werk „FEM für Praktiker – Band 1, Grundlagen“ von Günther Müller und Clemens Groth an. Sie schreiben am Ende ihrer Einleitung: „Es bleibt zu beachten, dass die Anwendung der FEM eine erhebliche Ausbildung erfordert und noch lange nicht die Kenntnis und Beurteilung der Hintergründe den Programmen ausschließlich überlassen werden kann.“

