

bild der Wissenschaft **plus**

Deutschlands erstes Wissenschaftsmagazin



Erfolgsformeln

Wie die Mathematik
Technik und Wirtschaft nach vorne bringt

bild der Wissenschaft

Mini-Abo!

Jetzt die nächsten drei Ausgaben mit 35% Rabatt testen und GRATIS Geschenk sichern.



Travelite Rucksack BASIC

Leichter Daypack mit 22l Volumen, 3 praktischen Reißverschlussaschen, extra gepolstertem Schultergurt und cleverer Außentasche für Getränkeflaschen.

Maße: 30x41x20cm
Keine Zuzahlung.



Ihr
Geschenk!

Sichern Sie sich jetzt bild der wissenschaft für nur 15,90 € im Miniabo und bestellen Sie am besten gleich hier:

bild der wissenschaft Phone 0711/72 52-201
Leserservice Fax 0711/72 52-399
Postfach 810580 oder unter
70522 Stuttgart www.direktabo.de

bild der wissenschaft. Verstehen, was dahintersteckt!



12092AP



Ralf Butscher,
Ressortleiter Technik
bild der wissenschaft

Liebe Leserin, lieber Leser,

Wussten Sie das? Ich nicht: Der Begriff „Mathematik“ stammt aus dem Altgriechischen und bedeutet „die Kunst des Lernens“. Das habe ich erst im Gespräch über das Heft, das Sie hier in Händen halten, von meiner Redaktionskollegin und promovierten Archäologin Karin Schlott erfahren.

Doch in den letzten Wochen und Monaten gab es für mich noch mehr zu lernen. Partner dieses Sonderheftes von bild der wissenschaft ist das Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM – eine Forschungseinrichtung, die es in sich hat. Und das gleich mehrfach.

Das Institut in Kaiserslautern ist nicht nur das größte in diesem Wissenschaftsbereich. Es ist sogar weltweit einzigartig. Das hat ein unabhängiger Audit den Wissenschaftlern in der Pfalz erst kürzlich attestiert. Nirgendwo sonst werden so viele technische Innovationen so erfolgreich durch mathematische Forschungsergebnisse ermöglicht und beflügelt.

Die 44 Seiten des Heftes belegen eindrucksvoll, welche entscheidende Rolle die Mathematik beim Fortschritt von Wissenschaft und Technik spielt. Ob es um medizinische Verfahren gegen Krebs, den Feinschliff von Edelsteinen, die Saugfähigkeit von Windeln oder die Beurteilung von Rentenversprechen geht – Mathematik ist überall der Schlüssel.

Und überall sind die Fraunhofer-Forscher mit an der Spitze. Weit über ein Dutzend eindrucksvolle Beispiele für deren Arbeit stellen wir Ihnen in diesem Sonderband vor. Und das ist nur eine kleine Auswahl dessen, was am ITWM an spannenden Projekten läuft – oft gemeinsam mit Unternehmen aus der Region oder der ganzen Welt.

Mathematik war in der Schule eines meiner Lieblingsfächer. Und auch später hatte ich stets eine Vorliebe dafür. Doch als wir mit unserem Team aus der Redaktion erstmals mit den Wissenschaftlern in Kaiserslautern zusammensaßen, kam auch ich aus dem Staunen nicht heraus – angesichts der Fülle und Vielfalt dessen, was die Fraunhofer-Forscher leisten. Ich bin sicher: Es wird auch Ihnen so gehen, wenn Sie in den Beiträgen dieses Heftes schmökern. Viel Spaß und Entdeckergefreude wünsche ich Ihnen dabei.

Herzlich, Ihr Ralf Butscher



ERFOLGSFORMELN

Die Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM sind weltweit führend auf ihrem Gebiet. Das belegen Beispiele aus verschiedenen Bereichen der mathematischen Forschung.

4 Problem findet Lösung

Wie Fraunhofer-Forscher die Grundlagen der Mathematik erweitern und technische Neuerungen anschieben

8 Mathe macht gesund

Bessere Überlebenschancen für Krebspatienten, dank einer Software des ITWM

12 Riesige Datenmengen bändigen

Künstliche Szenen, schneller und realistischer als je zuvor – ein Kick für die Filmbranche

14 Zwei Karat roh für ein Karat fertig

Mit Mathematik mehr aus Edelsteinen herausholen

17 Helene Krieg: Pumpen und Pieper

Eine Doktorandin peppt das Trinkwassernetz auf

18 Maschinen mit Grips

Wie Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen fit für den Einsatz gemacht werden

20 Große Schritte fürs kleine Geschäft

Simulationen verbessern Filter und Vliesstoffe

23 Arbeiten ohne zu schwitzen

Das Institutsgebäude in Kaiserslautern setzt Maßstäbe bei der Energieeffizienz

24 Die Methode bringt's

So machen Forscherteams bei Fraunhofer feinste Bewegungen berechenbar

26 Das Wunder von RODOS

Mensch, Auto und das Drumherum: das umfassende Modell für Fahrzeugentwickler

28 „Wir brauchen die klügsten Köpfe“

Institutsleiter Dieter Prätzel-Wolters über Erfolge und Perspektiven der Mathematik-Forschung am ITWM

32 Sprungbrett für Spin-offs

Der Weg guter Ideen an den Markt

34 Formel Grün

Wie pfiffige mathematische Algorithmen die Energiewende ans Ziel führen

38 Kampf den Kratzern

Die findigen künstlichen Augen aus der Pfalz

40 Tiefblick mit Terahertz

Eine junge Technik revolutioniert die Werkstoffprüfung

42 Der Riester-Check

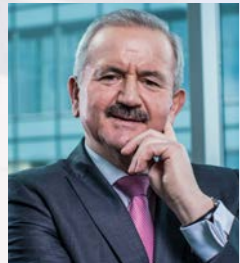
Die beste Altersversorgung für jedermann? Finanzmathematiker helfen bei der Wahl

43 Impressum

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der 1949 gegründeten Fraunhofer-Gesellschaft. Sie ist heute die führende Organisation für angewandte Forschung in Europa. Unter ihrem Dach arbeiten 72 Institute und Forschungseinrichtungen an Standorten in ganz Deutschland. Mehr als 25 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erzielen das jährliche Forschungsvolumen von 2,3 Milliarden Euro.

Kaiserslautern ist der Standort des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM. Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen in aller Welt sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen. Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787 bis 1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.



„Als Innovationstreiber der Wirtschaftsstandorte Deutschland und Europa ergreift die Fraunhofer-Gesellschaft Initiativen zur Lösung künftiger Herausforderungen und entwickelt daraus technologische Durchbrüche. Seit jeher zählt auch die Mathematik zu den zentralen Schlüsselfaktoren

des Fortschritts in der Wirtschaft und der Gesellschaft. Das Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM bildet mit seinen Kompetenzen in zahlen- und formelbasierter Modellierung, Simulation und Optimierung die Speerspitze dieser anwendungsorientierten Industrielösungen. Die im Fraunhofer ITWM entwickelten Modelle, Algorithmen und Softwareprodukte bedienen vielfältige Industriebedarfe im Bereich der Digitalisierung.“

Prof. Dr.-Ing. habil. Reimund Neugebauer
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

Problem findet Lösung

Ist Mathematik für die Anwendung geeignet? Aber ja, sagt man am Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik. Die Forscher dort treiben die mathematische Forschung voran und legen so die Basis für viele technische Neuerungen

von Bernd Müller

Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. So steht es zumindest in der Bibel. Es könnte allerdings sein, dass Gott, bevor er sich mit irdischen Dingen beschäftigte, erst etwas anderes erschuf: die Mathematik. Die knifflige Frage lautet: Sind die mathematischen Gesetze eine Eigenschaft der Natur – oder bloß eine Erfindung des Menschen, um die Welt zu beschreiben? „Mathematik ist das Alphabet, mit dessen Hilfe Gott das Universum beschrieben hat“, meinte der Astronom Galileo Galilei. Für den

Philosophen Ludwig Wittgenstein ist sie dagegen „eine Methode der Logik“, also etwas von Menschen Gemachtes. Ob die Mathematik eine Eigenschaft des Universums, eine Folge biologischer Evolution oder eine kulturell erworbene Fähigkeit ist, bleibt bis heute umstritten.

Mathematik ist Schlüsseltechnologie Unstrittig ist: Die Mathematik, wie sie der Homo sapiens betreibt, beschreibt unsere Welt vorzüglich. Schon die frühen Gelehrten in Mesopotamien und Griechenland

vor Tausenden Jahren nutzten sie, um ihre Umgebung zu beschreiben. Fortan wuchs die Mathematik an ihren Aufgaben. Schon immer war sie die Sprache der Naturwissenschaften und der Technik, mit der Industrialisierung wandelte sie sich zu einem zentralen Werkzeug für alle anderen Wissenschaften, die einen hohen Formalisierungsgrad haben – allen voran die Physik. In den letzten 20 Jahren folgte ein erneuter Wandel, diesmal rasant und tiefgreifend – dem Computer sei Dank, der die Mathematik in den Rang einer Schlüssel-



technologie gehoben hat. Der Computer ist vielleicht die reinste Form zu Technik gewordener Mathematik. Viele Innovationen sind nur noch mit Mathematik und Computer möglich. Digitalisierung, Big Data, künstliche Intelligenz wären ohne beide undenkbar. Und sollte es die Menschheit doch noch schaffen, den drohenden Klimakollaps abzuwenden, wird Mathematik dabei bestimmt eine wichtige Rolle spielen.

Wenn ein Mathematiker von anwendungs- oder praxisorientierter Mathematik spricht, ist es ratsam nachzufragen, was er damit meint. Forscht und lehrt er an einer Universität, wird er unter angewandter Mathematik in der Regel nur solche Probleme verstehen und lösen wollen, die einer eindeutigen mathematischen Analyse zugänglich sind. Er meint also Probleme, die sich mit Existenz- und Eindeutigkeitsaussagen für die Lösung und Konvergenzaussagen für die verwendeten numerischen Methoden beweisen lassen.

Effektive Lösung echter Probleme

Dadurch sind die in der mathematischen Literatur behandelten „Anwendungen“ oft stark idealisiert und nicht besonders praxisnah. Erst die Etablierung von

Technomathematik, Wirtschaftsmathematik also zwei Herangehensweisen, die unterschiedlicher nicht sein könnten. Auf der einen Seite steht die methodengetriebene Mathematik aus der Universität, die zur Lösung praktischer Probleme die Modelle so abschleift, dass man sie mathematisch behandeln kann. Auf der anderen Seite geht man vom Problem aus, schaut, welche Methoden darauf passen und entwickelt, wo nötig, auch neue methodische Konzepte. „Unsere Forschung ist nicht methodengetrieben, sondern problemgetrieben“, betont Dieter Prätzel-Wolters, Leiter des Fraunhofer ITWM. Keine Frage: Das Institut verfolgt den zweiten Weg. Was gerade benötigt werde, hänge von der Fragestellung ab. Das ITWM und das ebenfalls mathematisch orientierte Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI entwickeln neue Modelle und Methoden oder passen vorhandene an, verbessern sie und machen sie schneller.

Technomathematik, Wirtschaftsmathematik also zwei Herangehensweisen, die unterschiedlicher nicht sein könnten. Auf der einen Seite steht die methodengetriebene Mathematik aus der Universität, die zur Lösung praktischer Probleme die Modelle so abschleift, dass man sie mathematisch behandeln kann. Auf der anderen Seite geht man vom Problem aus, schaut, welche Methoden darauf passen und entwickelt, wo nötig, auch neue methodische Konzepte. „Unsere Forschung ist nicht methodengetrieben, sondern problemgetrieben“, betont Dieter Prätzel-Wolters, Leiter des Fraunhofer ITWM. Keine Frage: Das Institut verfolgt den zweiten Weg. Was gerade benötigt werde, hänge von der Fragestellung ab. Das ITWM und das ebenfalls mathematisch orientierte Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI entwickeln neue Modelle und Methoden oder passen vorhandene an, verbessern sie und machen sie schneller.

Dass diese Forschung weit entfernt davon ist, bloßer Transfer zu sein, wird in der akademisch geprägten, universitären Mathematik häufig verkannt. Aus dem Elfenbeinturm ist dann zu hören, dass eine solche praxisorientierte Mathematik keine richtige Mathematik sei. Oder dass die wirklich neue Mathematik an den Universitäten entwickelt werde, losgelöst von praktischen Anwendungen. Und dass sie, wenn überhaupt, erst mit Zeitverzögerung in der Industrie Anwendung finde. Doch die Erfolge und die hohe Nachfrage nach der Expertise der mathematikorientierten Fraunhofer-Institute sprechen eine andere Sprache.

Zuverlässig und objektiv

Mit Mess- und Versuchsdaten validierte mathematische Modelle liefern zuverlässige Vorhersagen und in höchstem Maß objektive Ergebnisse. Konsens besteht außerdem darin, dass Mathematik die Wissenschaft mit dem höchsten Abstraktionsgrad ist. Ihre Resultate sind in einer weitgehend genormten Sprache formuliert. Doch diese Sprache ist offenbar schwer zu erlernen. Wie sonst ist es zu erklären, dass das Kokettieren mit der eigenen Unzulänglichkeit („In Mathe war ich immer schlecht“) mit einem Augenzwinkern wohlwollend anerkannt wird?

Die Gesellschaft ist sich der Bedeutung der Mathematik zu wenig bewusst, hält Mathematiker für introvertierte Nerds. „Es wird aber besser“, findet Dieter Prätzel-Wolters. Er spüre heute mehr Interesse, wenn man sich als Mathematiker oute. Ganz wichtig ist dabei auch eine Veränderung des Mathematik-Unterrichtes an den Schulen und die Förderung des Nachwuchses. So veranstaltet das ITWM Modellierungswochen, wo Schülerinnen und Schüler der Oberstufe eine Woche lang



▲ Fesselndes Farbenspiel: Besucher bestaunen während einer Führung durch das Institutsgebäude die in ein leuchtendes Lichtspiel gehüllte Kuppel des Fahrzeugsimulators RODOS.

mathematische Modellierung an realen Beispielen lernen. Das führt zu einem Aha-Effekt: Mathematik ist überall und man kann sie tatsächlich praktisch anwenden.

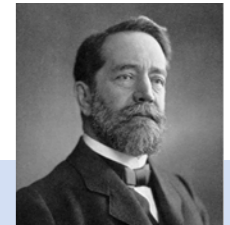
Leider nicht in der Politik. Die Entscheidungsträger dort hätten die Wichtigkeit angewandter Mathematik für Innovation und technischen Fortschritt noch nicht hinreichend erkannt, meint Prätzel-Wolters. Beispiel: Einen Fördertopf für die Mathematik im gleichen Umfang wie für die Nano- und Biotechnologie gibt es nicht. „So etwas bräuchten wir aber dringend“, stellt der ITWM-Leiter fest. Da helfe nur hartnäckige Aufklärung, etwa durch Gespräche auf EU-Ebene, um sich in Forschungsprogramme mit einzubringen.

Im Kern viel Tradition

Wie geht es mit der Mathematik weiter? So wie sie heute betrieben wird, besteht sie zu einem großen Teil aus bewährter Tradition. Im Vordergrund stehen altbekannte Gebiete wie Algebra, Geometrie, Topologie, Zahlentheorie, Analysis, Funktionentheorie, Numerik, Stochastik und Optimierung. Die Grundstruktur aus Axiomen, Definitionen, Lemmata, Theoremen,

Beweisen und Beispielen gehört quasi zur DNA der Mathematik und wird sich nicht ändern.

Neuerungen bringt vor allem der Computer. So ist das wissenschaftliche Rechnen entstanden und die experimentelle Mathematik. Darin beschäftigen sich Forscher mit sehr komplexen Vorgängen wie hochdimensionalen Problemen, die mit Papier und Bleistift nicht berechenbar wären. Das hat für Mathematiker neue Betätigungsfelder geschaffen. Aber auch in den klassischen Gebieten der Mathematik hat der Computer neue Möglichkeiten dafür eröffnet, Hypothesen zu überprüfen und Beweise zu führen. Die experimentelle Mathematik hat auch hier ihren Stellenwert. Viele Mathematiker nutzen zudem Computerprogramme, um sich inspirieren zu lassen. Einen Gegensatz von klassischer und „Quanten-Wissenschaft“ wie in der Physik gebe es in diesem Fach nicht, sagt Dieter Prätzel-Wolters. Allerdings: „Die Mathematik wird immer mehr zum Motor für Innovationen. Sie bildet das Herzstück der heute so wichtigen Algorithmen und der Digitalisierung. Sie wird die Anwendungen revolutionieren.“ ●



Felix Klein Mathematik im Einklang

Die reine mathematische Lehre hier, die angewandte Mathematik zur Lösung von Problemen aus Technik und Alltag dort – diesen Gegensatz hat der Göttinger Professor Felix Klein nicht gesehen. Im Gegenteil: Für den 1849 in Düsseldorf geborenen Mathematiker ergänzten sich Theorie und Praxis perfekt. Der Erfolg gab ihm Recht. Nachdem Klein als Professor an die Universität Göttingen berufen wurde, entwickelte sich die dortige Fakultät zum Zentrum der mathematischen Forschung. Inzwischen ist auch Kaiserslautern ein Mekka der Mathematik. Der Wissenschaftler war daher der ideale Namensgeber für das 2008 gegründete Felix-Klein-Zentrum für Mathematik, einer institutionellen Verbindung zwischen dem Fachbereich Mathematik der TU Kaiserslautern und dem Fraunhofer ITWM. Der Schwerpunkt des Zentrums ist die Nachwuchsförderung, zum Beispiel mit Stipendien und einem Mentoren-Programm für Mathematik-Studierende. Die Kaiserslauterer Forscher haben auch die Schulmathematik im Blick: In sogenannten Modellierungswochen lösen Schülerinnen und Schüler Aufgaben aus dem ITWM-Projektalltag und lernen so die angewandte Seite der Mathematik kennen. Für berufserfahrene Forscherinnen und Forscher organisiert die Felix-Klein-Akademie Konferenzen und Workshops mit international anerkannten Wissenschaftlern – Weiterbildung auf hohem Niveau!

www.felix-klein-zentrum.de



◀ Beim Science Slam zur „Nacht, die Wissen schafft“ im Hörsaal des Fraunhofer-Zentrums unterhält Sven Krumke, Professor an der TU Kaiserslautern, die Zuhörer.

Mathe macht gesund

Eine Software zur Planung von Strahlentherapien verbessert die Überlebenschancen von Krebspatienten. Dahinter steht ein engagiertes Forscherteam am ITWM

von Bernd Müller

Das Team aus der Abteilung Optimierung (v.l.):
Karin Teichert, Philipp Süß, Karl-Heinz Küfer und Michal Walczak.

Suzanne Currie blickt konzentriert auf den großen Bildschirm. Wirbelsäule mit Rückenmark, Brustkorb mit Herz – auch ein Laie erkennt die Organe sofort. Und den dunklen Klumpen am Rückenmark, der so aussieht, als gehöre er dort nicht hin. „Ein Medulla-blastom“, erklärt Currie, ein bösartiger Tumor des Gehirns oder Rückenmarks. Mit Diagnosen wie bei der 31 Jahre alten Patientin ist die wissenschaftliche Leiterin des Beatson West Cancer Centre, der größten Krebsklinik in Schottland, häufig konfrontiert, erzählt sie in einem Webinar für Radiotherapieplanung im Januar 2018. 500 Strahlentherapien planen sie und ihre Kollegen jeden Monat – und treffen damit Entscheidungen über Leben und Tod. Ist die Röntgendosis hoch, verschwindet der Tumor, aber

gesunde Organe werden eventuell geschädigt. Ist sie zu niedrig, kommt der Tumor vielleicht wieder. Currie bewegt mit der Maus ein paar Schieberegler, die Strahlendosis in Niere und Lunge steigt leicht an, dafür sinkt die Dosisverteilung am empfindlichen Herz drastisch. Currie ist zufrieden: „Damit hat die Patientin gute Heilungschancen“, versichert die Medizinphysikerin.

Keine Wissenschaft, sondern Kunst

Karl-Heinz Küfer bekommt von dem Fall in Schottland nichts mit. Trotzdem wird es auch ein wenig sein Verdienst sein, wenn die Patientin überlebt. Denn die Software, mit der Suzanne Currie ihren Therapieplan optimiert, stammt aus der Abteilung Optimierung des ITWM, die Küfer leitet. Früher, so sinniert er, sei die Suche nach dem

optimalen Therapieplan wie die Suche von Gegenständen im Dunkeln gewesen. „Mit viel Erfahrung konnten nur langediente Spezialisten gute Lösungen für schwierige Fälle finden“, sagt Küfer. Ein Chefplaner in den USA habe ihm 2001 gesagt: „That’s no science, it’s an art“ (keine Wissenschaft, sondern Kunst). Heute hilft Mathematik, eine bessere Balance zwischen Therapiechance und Nebenwirkungen zu finden.

1996 wurde Karl-Heinz Küfer von einem Doktoranden eines Klinikums angesprochen: „Ich habe da ein numerisches Problem, könnt ihr das lösen?“ Konkret ging es um die Frage, wie man Strahlentherapie algorithmisch besser planen könne. Der Forscher fand die Frage interessant und dachte mit Kollegen über andere Möglichkeiten der Planungsweise nach. 1997 wurde er bei



Thomas Bortfeld vorstellig, einem der Väter der intensitätsmodulierten Strahlentherapie, damals noch am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und heute am Massachusetts General Hospital in Boston. Bortfeld nahm Papier und Bleistift und zeichnete die Umrisse eines huftförmigen Tumors, der um das Rückenmark wucherte. „Zeigt, dass ihr das etwas besser rechnen könnt“, sagte er. Ein Jahr später, 1998, fuhr Karl-Heinz Küfer erneut ans DKFZ: „Mit dem Beweis, dass wir es rechnen können. Ab dann waren wir im Geschäft“.

Mehr als zehn Jahre Anlauf

Die Deutsche Krebshilfe förderte das Projekt, das Bundesministerium für Bildung und Forschung schoss ebenfalls Mittel zu, 2001 wurde für die neuartige interaktive Strahlentherapieplanung von Karl-Heinz Küfer und Hans Trinkaus ein Patent beantragt, 2004 schloss man einen Verwertungsvertrag mit Siemens. Leider war es Siemens nicht mehr möglich, die neuartige Software in den Markt zu bringen, denn 2011 entschied der Konzern, die Strahlentherapiesparte aufzugeben. 2013 bis 2015 arbeitete das ITWM mit Raysearch Laboratories zusammen, einem schwedi-

schon Unternehmen. Seit 2016 kooperiert das Institut nun mit Varian Medical Solutions aus Palo Alto, dem Marktführer für intensitätsmodulierte Bestrahlungsgeräte.

Seit November 2017 ist das Produkt auf dem Markt, die Software verkaufte sich hervorragend, es gibt großartiges Feedback der Kunden. „Wir können mit Varian gemeinsam einen riesigen Markt erreichen, denn das Unternehmen verkauft in mehr als 150 Ländern“, freut sich Küfer.

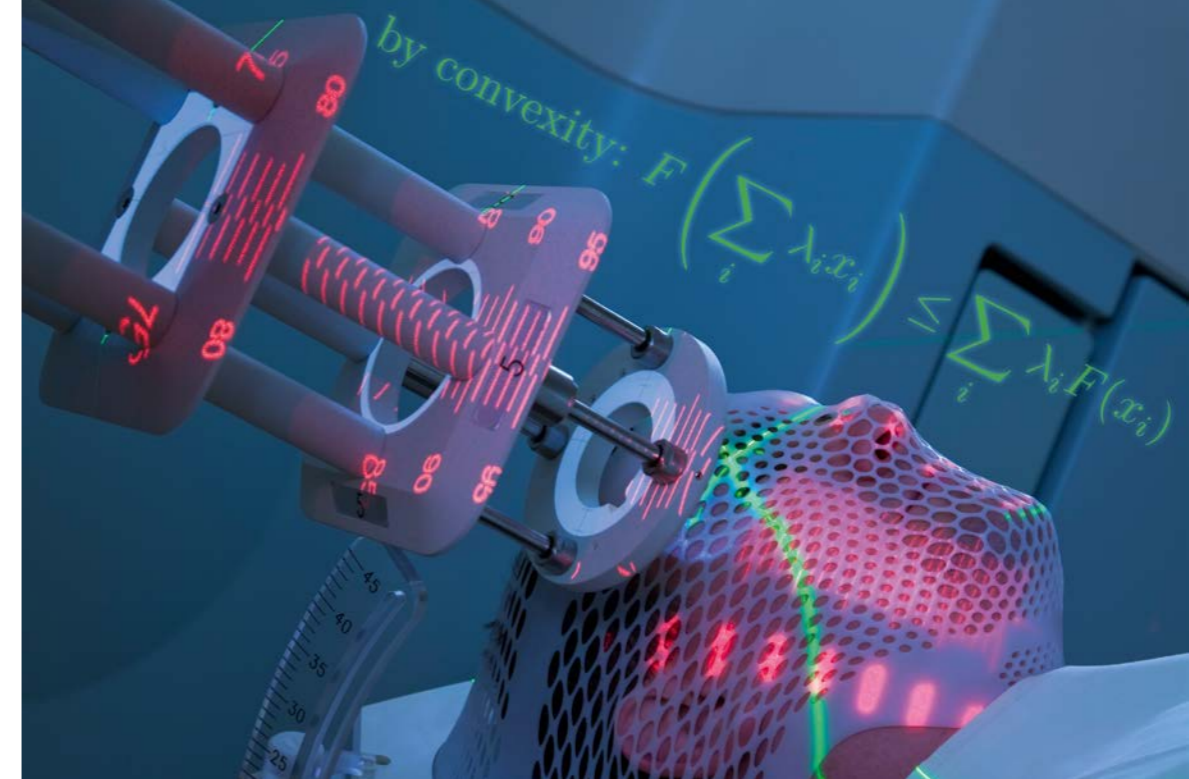
Das Ergebnis von mehr als 20 Jahren Arbeit ist eine interaktive und leicht zu bedienende Software. Sie verkürzt die Dauer der Strahlentherapieplanung erheblich. Früher saßen Therapieplaner vor Schnittbildern aus dem Computertomografen und versuchten in stundenlanger Tüftlei mit viel Erfahrung und Geduld durch Markieren kranker Bereiche im Bild ein dreidimensionales Bestrahlungsprofil zu entwerfen. Es soll den Tumor zuverlässig zerstören, empfindliche Gewebe wie Sehnerv oder Rückenmark aber möglichst wenig belasten. Küfer: „Wir wollen die Therapieplaner nicht arbeitslos machen, aber ihnen ihre Arbeit erleichtern und sie für den Patienten sicherer gestalten.“ Die Prinzipien der Software-Bedienung sind

so einfach, dass Ärzte die finale Planung mithilfe der Software künftig auch selbst durchführen könnten. Voraussetzung ist eine Vorbereitung des Modells durch einen Medizinphysiker, was nur ein Viertel der bisherigen Zeit benötigt.

Regler für die Wunschdosis

Der Zeitgewinn ist möglich, weil die Software in Echtzeit Strahlentherapiepläne überlagern und rekombinieren kann. Der Planer verbessert mit einem Schieberegler zum Beispiel das Dosisniveau des Sehnervs und beobachtet dabei, wie sich die Dosis einige Millimeter daneben auch im Sicherheitssaum des Tumors verringert. Während dieses Schiebens werden im Hintergrund durch einen mathematischen Algorithmus die Einstrahlprofile so verändert, dass die Wunschdosis am Regler erreicht wird, aber sich alle anderen relevanten Dosisniveaus im Tumor sowie in gesunden Strukturen möglichst wenig verschlechtern.

Die mathematische Methode heißt mehrkriterielle Optimierung. Sie erlaubt es, verschiedene, teilweise sogar widersprüchliche Ziele in eine möglichst gute Balance zu bringen. Sogenannte Pareto-Lösungen haben die Eigenschaft, dass bei



◀ Die Strahlentherapie ist ein wichtiges Mittel gegen Krebs. Doch ihre Planung ist eine komplexe Aufgabe.

der Verbesserung einer Zielgröße mindestens eine andere Zielgröße verschlechtert werden muss. Die Software-Lösung des ITWM berechnet relevante Pareto-Lösungen und erlaubt es dem Planer auf diesen Lösungen in Echtzeit zu navigieren.

Wie clever das umgesetzt ist, merkt man erst, wenn man es selbst ausprobiert. Wenn man weiß, welches Dosisniveau idealerweise erreicht werden sollte – dies ist notwendiges Erfahrungswissen aus der Radiotherapieplanung – kann auch ein weniger versierter Radiotherapieplaner in einigen Minuten eine vertretbare Lösung finden.

Die entscheidende Frage für die Patienten und ihre Ärzte: Steigt die Überlebensrate dank der neuartigen Methode

der Radiotherapieplanung tatsächlich? „Das wäre die Krönung“, sagt Küfer. Die relevante Größe ist die Fünf-Jahres-Überlebenswahrscheinlichkeit. Für eine statistische Aussage sind die Fallzahlen aber zu gering, das Werkzeug ist noch zu neu. Sicher ist allerdings, dass Nebenwirkungen wie Gedächtnisverlust oder Taubheitsgefühl deutlich seltener geworden sind.

Viele neue Ideen

Das Optimierungsteam am ITWM hat bereits etliche neue Ideen, wie man die Bedienerfreundlichkeit und Funktionalität der Software weiterentwickeln könnte. Ein Gedanke ist eine Art Photoshop, wo man ins Bild klicken und an jedem Punkt die Strahlendosis variieren kann. Ein Histogramm zur Einstellung der Dosis, das ähnlich wie das Helligkeitshistogramm in dem von vielen Grafikern benutzten Bildverarbeitungsprogramm funktioniert, hat das Team schon 2013 patentieren lassen. Demnächst soll es mit einem Software-Update in Serie gehen.

Ein weiteres Patent bezieht sich auf die statistische Dosisverteilung, also auf die Fragestellung, wieviel Prozent einer Organstruktur wieviel Dosis bekommt. Es liegt außerdem nahe, sich auch über die vierte Dimension – die Zeit – Gedanken zu machen. Heute wird der Patient über Wochen immer mit dem gleichen Dosisprofil bestrahlt. Denkbar wäre, die

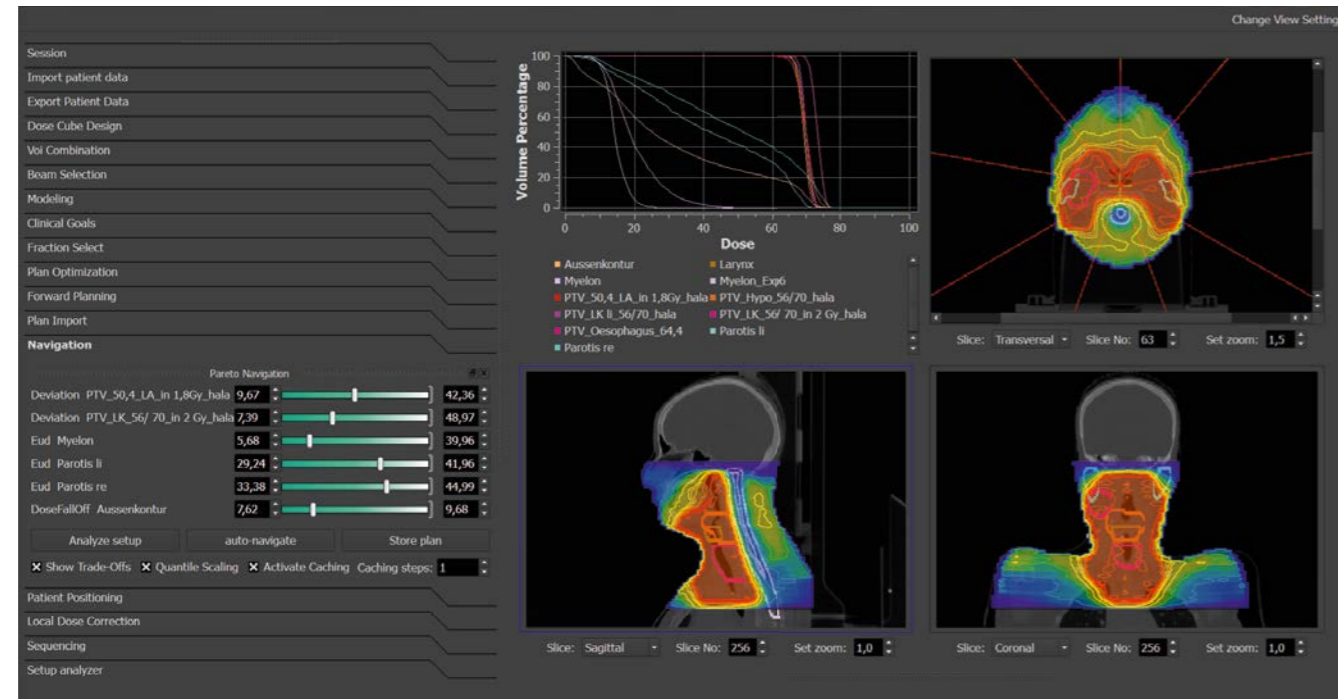
Intensität bei jeder Behandlung zu variieren, sodass empfindliche Bereiche seltener von der Strahlung getroffen werden.

Und: Die von Karl-Heinz Küfer geleitete Abteilung Optimierung hat jenseits der medizinischen Physik eine Reihe weiterer Anwendungsbereiche für die Methode der mehrkriteriellen Optimierung im Blick – zum Beispiel für die Planung komplexer Produktionsprozesse.

Interessant für die Industrie

Seit gut zehn Jahren entwickeln die Wissenschaftler am ITWM mehrkriterielle Optimierungssoftware für die chemische Industrie, um Energieeintrag, Qualität, Durchsatz und Umwelteigenschaften in der Produktion zu optimieren – mit Erfolg: Die Kosten für Energie können dadurch an großen Produktionsanlagen merklich gesenkt werden. Um wieviel? „Das ist leider geheim“, sagt Küfer.

Veröffentlicht ist aber dieses eindrucksvolle Beispiel: In einer Anlage der Lonza AG, einem Schweizer Hersteller von Spezialchemikalien, sind die Energiekosten um mehr als 17 Prozent gesunken. Seit 2007 ist auch der Chemiekonzern BASF Auftraggeber des ITWM. Auf der Forschungspressekonferenz 2017 gab es für die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ITWM ein Sonderlob – für die Entwicklung disruptiver Planungsmethoden, von denen Kunde, Umwelt und Unternehmen profitierten.



◀ Der Prototyp einer am ITWM entwickelten Software zeigt die Computertomografie eines Patienten mit Kopf-Hals-Tumor. Darauf ist farbig die errechnete Dosisverteilung zu sehen, außerdem die Einstrahlrichtungen (oben rechts) und die grafisch dargestellte Dosisstatistik für die einzelnen Strukturen (oben Mitte). Links befinden sich Schieberegler, die je einer Struktur zugeordnet sind. Bewegt man einen Regler nach links, wird die Dosisverteilung optimiert.



◀ Tobias Götz und sein Team haben die realitätsnahe Visualisierung von am Computer erzeugten Bildern bedeutend vorangebracht.

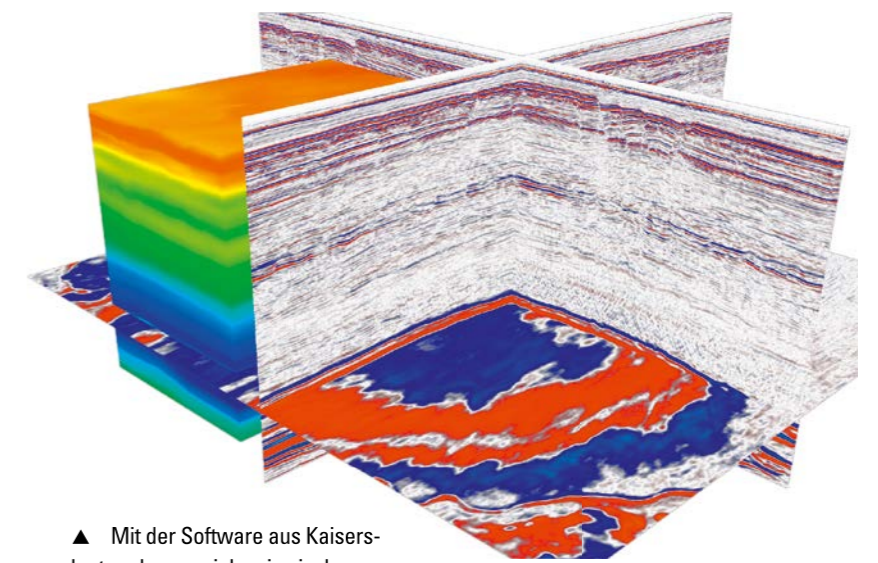
lässliche Dichtungen nötig? Solche Fragen beantwortet die Software auf Knopfdruck. Das ist die Besonderheit: Mit den bisher verfügbaren Programmen mussten die Entwickler mehrere Minuten warten, wenn sie die Kameraperspektive wechselten oder unter die Haube blicken wollten. Denn jedes Mal musste die Software den Weg aller Wassertropfen für diesen Ausschnitt neu berechnen. Nicht so bei der Software des ITWM-Teams. Mathematische und softwaretechnische Kniffe beschleunigen die Berechnung enorm, sie dauert nur noch eine Zehntelsekunde.

Prozessoren am Limit

Um den Trick zu verstehen, etwas Computertechnik: Jeder Computer hat mindestens einen zentralen Mikroprozessor, CPU genannt. Supercomputer haben sogar viele Tausend CPUs, was wissenschaftliche Berechnungen oder Simulationen enorm beschleunigt. Für die Visualisierung – die Berechnung und Ausgabe eines scharfen und realistischen Bildes auf dem Monitor – sind dagegen üblicherweise separate Grafikprozessoren zuständig. Doch diese stoßen bei großen Datenmengen an ihre Grenzen und schaffen es irgendwann nicht mehr, daraus die gewünschten Bilder in Echtzeit zu berechnen.

Die Kunst des ITWM-Teams besteht darin, die Visualisierungssoftware CPU-tauglich zu machen – und zwar so, dass möglichst viele Prozessoren parallel arbeiten. Doch doppelt so viele CPUs bedeuten nicht die doppelte Leistung, weil mit der Parallelisierung der Kommunikationsaufwand zwischen ihnen drastisch wächst. Es kommt also darauf an, die Berechnung so geschickt in kleine Häppchen zu zerlegen, dass die Mikroprozessoren weitgehend autark und ohne viel Datenaustausch mit ihren Nachbarn rechnen können.

Das gleichzeitige Rechnen mit vielen CPUs nutzt das Team des Competence Center High Performance Computing auch für das „Raytracing“ (Strahlenverfolgung). Damit erzeugen Filmstudios



▲ Mit der Software aus Kaiserslautern lassen sich seismische Daten so aufbereiten, dass Öl- und Gasfelder sichtbar werden.

erstaunlich echt wirkende künstliche Szenen. Eine imaginäre Lichtquelle sendet Lichtstrahlen aus, die an Oberflächen in Richtung des Betrachters reflektiert werden, der vor dem Bildschirm sitzt. Damit lassen sich zum Beispiel glänzende Oberflächen sehr realistisch nachahmen.

Allerdings: So leicht lässt sich das Auge nicht täuschen, irgendwie sehen selbst die besten Bilder in Filmen oder Computerspielen künstlich aus. Der Grund ist, dass Raytracing-Software die globale Beleuchtung nicht einkalkuliert – das Licht, das von der Sonne und anderen indirekten Lichtquellen kommt und vielfach gestreut wird, bevor es das Auge erreicht. „Dieses indirekte Licht ist aber wichtig für einen natürlichen Eindruck“, erklärt Valentin Fütterling, der darüber promoviert.

Machtvoll ans globale Licht

Mit geballter CPU-Power können die Forscher nun auch das globale Licht berechnen. Das Ergebnis ist verblüffend: Das Bild eines Audi R8 lässt sich nicht mehr von einem Foto unterscheiden. „Man kann sogar so weit an das Fahrzeug heranzoomen, dass man die TÜV-Plakette lesen kann“, sagt Tobias Götz und scrollt am Mausrädchen. Auch hier reagiert der Computer blitzschnell und zeigt das Bild aus jeder beliebigen Perspektive sofort an. Diese Anwendung hat das Team vor vier Jahren für einen Autobauer realisiert. Die Ingenieure füttern die Software mit Infor-

mationen darüber, wo welche Materialien wie Glas, Kunststoff, Lack sind, und erhalten auf Knopfdruck eine Vorstellung, wie das Fahrzeug unter diversen Beleuchtungssituationen aussieht. Die Filmbranche nutzt eine ähnliche, aber langsamere Software von Intel. „Unser Algorithmus schlägt den von Intel deutlich“, sagt Götz. „Leider schlägt Intel uns beim Marketingbudget.“ Dennoch sei man in Hollywood aufs ITWM aufmerksam geworden.

Bodenschätzen auf der Spur

Die Öl- und Gas-Industrie gehört zu den ersten Branchen, die diese Technik bereits nutzt. Dort visualisiert das Team seismische Daten, in denen Geologen nach Öl- und Gasfeldern suchen. Dafür werden Schallwellen in den Untergrund geschickt, die an verschiedenen Gesteinsschichten reflektiert werden. Auch da eignet sich die Raytracing-Methode, um Lage und Dicke des Gesteins zu visualisieren. Eigens dafür hat das Institut mit Partnern aus der norwegischen Branche ein Spin-off gegründet: Sharp Reflections. Die Firma sitzt im Business- and Innovation Center Kaiserslautern und vermarktet die Software zur Aufbereitung seismischer Daten – und künftig hoffentlich für weitere Anwendungen: „Wir haben noch viele Ideen, wo wir das Know-how einsetzen können“, sagt Fütterling: „Etwa in der Medizin zur Auswertung von Daten aus Computer- oder Kernspintomografen.“ ●

Riesige Datenmengen bändigen

ITWM-Wissenschaftler wollen die Filmbranche aufmischen – mit einer Software, die künstliche Szenen schneller und realistischer denn je berechnet

von Bernd Müller

Es regnet in Strömen. Der VW Golf rast in eine Wasserlache, Schauer von Tropfen stieben meterweit, wie eine Wolke kleiner Pingpong-Bälle. „Das sind 1,5 Millionen Wassertropfen“, sagt Tobias Götz stolz. 1,5 Millionen Tropfen auf der Straße sind relativ wenig, im Com-

puter sind es relativ viele. Denn die Szene, die der Informatiker nun noch einmal in Zeitlupe ablaufen lässt, spielt sich in einer Software ab, die ein Team am ITWM entwickelt hat. Es beschäftigt sich mit der Visualisierung von realen Dingen, häufig im Zusammenhang mit Autos.

Interessant ist die Fahrt durch die Pfütze für Automobilentwickler nicht, weil sie so spektakulär aussieht – sondern weil man per Mausklick an das Fahrzeug heran- und sogar unters Blech zoomen kann. Wohin spritzen die Wassertropfen im Motorraum? Wo sind besonders ver-



Zwei Karat roh für ein Karat fertig

Wie ein Edelsteinproduzent durch geschickt eingesetzte Mathematik mehr aus Rohsteinen herausholt

von Wolfgang Hess

Diamonds are a girl's best friend", hauchte Marilyn Monroe 1953 erstmals ins Mikro. Doch auch Smaragd, Rubin, Saphir oder Tansanit – von Fachleuten lapidar Buntsteine genannt – machen etwas her. Auch damit lässt sich ordentlich Geld verdienen. Das größte Handelsunternehmen in Europa für Buntsteine ist die Paul Wild OHG mit Sitz in Kirschweiler bei Idar-Oberstein.

Früh hat das Unternehmen eigene Minen in Brasilien gekauft. In den letzten Jahren erweiterte die Firma ihre Minenbeteiligungen in allen wichtigen Buntsteinregionen der Welt. Und sie beschäftigt eine Handvoll der besten Edelsteinschleifer in Deutschland, die besonders anspruchsvolle Kunden wie Bulgari oder Tiffany mit ihrem Handwerk beglücken. Doch die Edelsteinproduktion in Deutschland

ist seit Jahren rückläufig. Produziert wird aus Kostengründen überwiegend in Asien. Auch Paul Wild besitzt Produktionsstätten in Thailand.

Eine clevere Idee

Clever überlegte Unternehmer Markus Paul Wild – Betriebsinhaber in der dritten Generation –, ob die Ausbeute von Schmucksteinen aus Rohedelstein nicht

zu verbessern sei, wenn man den Produktionsprozess automatisieren und mithilfe der Mathematik gute Schliffbilder zur bestmöglichen Verwertung finden könne. Mit diesem Gedanken trat er 2003 an Karl-Heinz Küfer heran, damals Senior Researcher am ITWM, und schilderte seine Ziele: fünf bis zehn Prozent mehr Karat – das Gewichtsmaß für Edelsteine – wolle er durch eine mathematische Optimierung aus den Rohlingen herausholen. Bis dahin galt unter Fachleuten die Faustformel: Für ein Karat geschliffenen und polierten Buntstein sind drei Karat Rohstein erforderlich.

Eine Maschine für die Mathematik

Übereinstimmung bestand darin, dass es dazu nicht nur einer mathematischen Optimierung bedurfte, die sich in der Software zur Bearbeitung von Edelsteinen niederschlagen würde, sondern auch einer Maschine, die die mathematisch ermittelten Daten dreidimensional und punktgenau umsetzen kann. Selbst der beste Edelsteinschleifer wäre dazu nicht in der Lage. Mag seine Kunstfertigkeit auch noch so bewundernswürdig sein, er arbeitet nach seiner Intuition und nicht nach mathematischen Algorithmen. „Das Spannende ist, dass für die Bearbeitung der von Herrn Wild an uns herangetragenen Fragestellungen neue Mathematik gebraucht wurde“, betont Karl-Heinz Küfer. „Dass Mathematik immer noch entsteht, ist vielen nicht klar. Die meisten glauben, sie sei einfach da.“

Mathematisch sind Edelsteinschliffe eine geometrische Aufgabe. Wenn sich Mathematiker damit beschäftigen, müssen sie erst verstehen, welche Regeln einen fertigen Stein ausmachen und auf welche Weise das größtmögliche Volumen aus einem Rohstein herauszubekommen ist. Doch das reicht nicht. „Um Wilds Problem zu lösen, mussten wir wissen, unter welchen technischen Randbedingungen Schleif- und Poliermaschinen arbeiten können und welche mineralogischen Gegebenheiten beim Schliff zu berücksichtigen sind“, sagt Küfer.

Der Forscher, seit 2004 Abteilungsleiter Optimierung am ITWM und seit 2010 nebenbei außerplanmäßiger Professor an der TU Kaiserslautern, spricht beim Auftrag der Firma Paul Wild gerne von Inno-

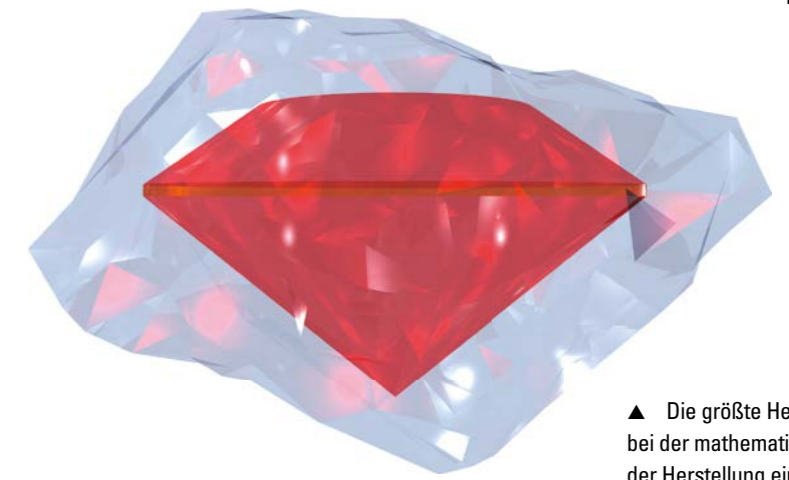
vation durch Mathematik. Denn hier ist durch Mathematik ein völlig neuer Fertigungsprozess entstanden, der eine größere Produktvielfalt ermöglicht. „Unsere Arbeit hat zu einem deutlichen Mehrwert geführt. Durch unsere Methodik lassen sich jetzt aus der Rohware 40 bis 50 Prozent mehr als Edelstein verkaufen als vorher.“ Damit lautet die neue Formel nun: Zwei Karat roh für ein Karat fertig.

Im Ergebnis führt das dazu, dass sich Maschinen und Equipment auf Dauer auch dann rechnen, wenn sie ungleich teurer sind als das Handwerkszeug des Schleifers. Diese Entwicklung könne, meint Karl-Heinz Küfer, sogar dafür sorgen, dass die Produktion hochwertiger Steine aus Asien nach Deutschland zurückgeholt werde.

Trickreiche Inszenierung

Diamanten inszenieren die Edelsteinschleifer durch geschickte Lichtbrechung – fachmännisch ausgedrückt: durch ihr Feuer. Bei Farbsteinen inszeniert man dagegen die Schönheit der Farbe. Der Verarbeitungsprozess untergliedert sich in vier Schritte: Sägen, Vorformen, Facettieren und Polieren. „Wir am ITWM haben uns zunächst mit dem Vorformen und Facettieren mathematisch beschäftigt und inzwischen auch das Polieren in eine Maschine integriert“, sagt Küfer.

Die Facettenstruktur hängt von der Edelsteinart ab, von der Außenkontur und von der Größe. Darüber hinaus gibt es Proportions- und Winkelvorgaben sowie Farbverschiebungsregeln und Regeln, wo Metall- oder Luft einschließen liegen müssen, um die Strahlkraft beim



▲ Die größte Herausforderung bei der mathematischen Planung der Herstellung eines Schmuckedelsteins ist die virtuelle Einbettung seiner Gestalt in den Rohling.

Facettieren nicht zu reduzieren. Diese Vorgaben skizzierte Markus Paul Wild auf einem Blatt Papier. Und damit ging es dann los mit der Forschung.

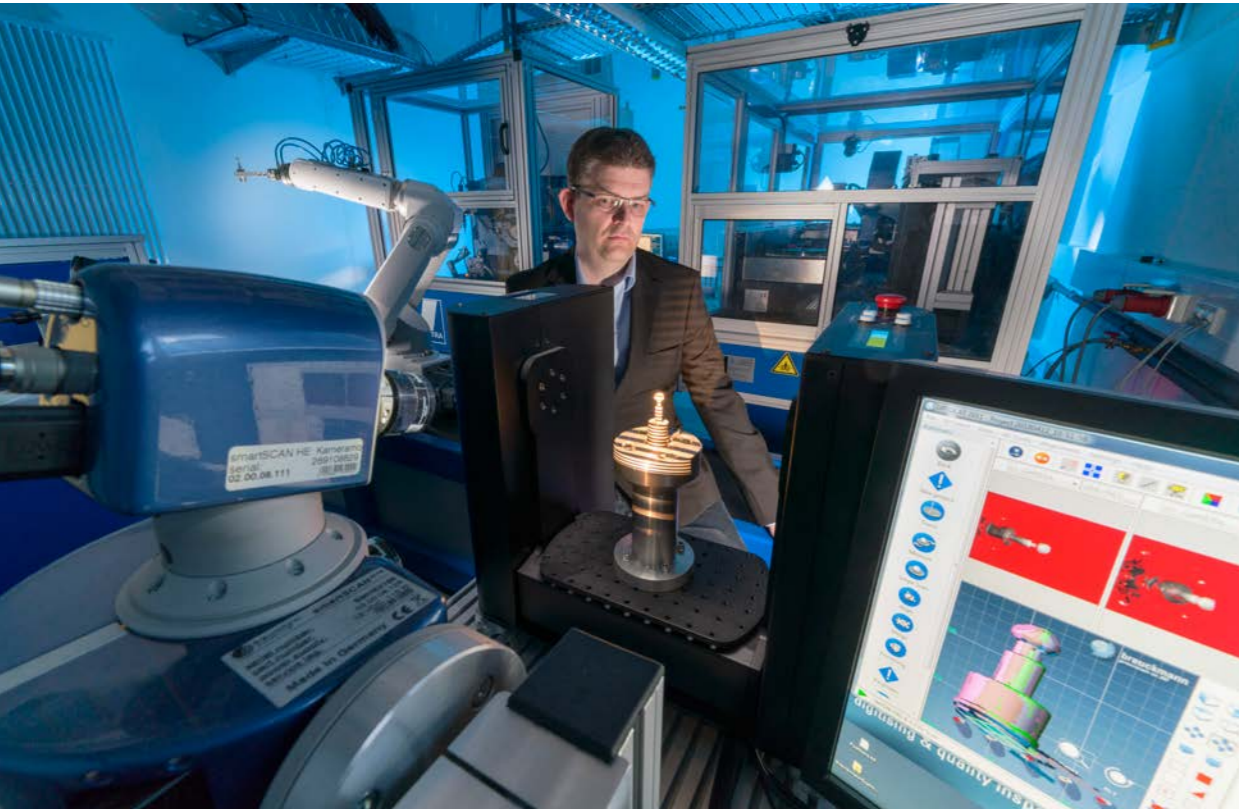
Die Suche nach dem Top-Modell

Die ITWM-Wissenschaftler suchten sich ein mathematisches Modell, in das die Frage nach einer optimalen Edelstein- ausbeute hineinpasst. „Wir wählten den sogenannten Bi-Level-Ansatz zur Lösung von semiinfiniten Optimierungsaufgaben“, sagt Küfer. Und fügt ähnlich kryptisch hinzu: „Die Frage nach dem optimalen Volumen eines Steins, dessen Rand durch Funktionen beschrieben werden kann, lässt sich als parametrische Design-Centering-Aufgabe formulieren.“ Weniger akademisch ausgedrückt heißt das: In einer ersten Stufe muss algorithmisch geprüft werden, ob ein Designvorschlag in den vorhandenen Rohstein passt. In einer zweiten Stufe macht das Verfahren dann Vorschläge für diese Lageparameter.

Ein grundsätzliches Problem war, dass für jeden Facettierungsvorschlag eine Bi-Level-Aufgabe gelöst werden muss. Das zweite Problem war die Größe jeder Bi-Level-Aufgabe, die wesentlich durch die Oberflächendarstellung des Rohsteins bestimmt wird. Küfer: „Einen mittelgroßen Stein konnten wir mathematisch durch etwa 400 000 Dreiecke beschreiben.“ Man hätte also im schlimmsten Fall Bi-Level-Aufgaben mit 400 000 Gleichungen für Millionen von Facettierungsvorschlägen rechnen müssen. „Wir hätten Wochen gerechnet für jeden Stein – selbst bei unserer Rechnerkapazität.“

Helene Krieg Pumpen und Pieper

Die Mathematikerin promoviert am ITWM. Hier beschäftigt sie sich mit einem ganz praktischen Thema: der Wasserversorgung



◀ Einblick ins Edelsteinlabor: ITWM-Forscher Andreas Dinges prüft die Prozesssteuerung. Die Anlage läuft automatisch. Sie vermisst zuerst den Stein, danach berechnet der Computer optimale Einbettungen, Proportionen und Facettenmuster.

Die Forscher haben die Oberfläche vereinfacht, indem sie den Stein als glatten Eichkörper mit nur vier bis sechs Funktionen beschrieben haben. Dann haben sie mit diesem stark vereinfachten Stein, welcher Form und Proportion, nicht aber das Facettenbild wiedergibt, optimiert. Beim folgenden Facettieren achteten Küfer und sein Team darauf, dass wenig Volumen verlorengeht. „Typischerweise ist es möglich, sehr nahe am Volumen des Eichkörpers zu bleiben“, erklärt der Forscher. „Mit dieser Maßnahme haben wir die eigentliche Volumoptimierung von der Festlegung eines regelgerechten Facettierungsmusters abgetrennt und so sehr viele Vergleichsrechnungen eingespart.“

Der Rohling auf der Kimme

Der zweite Ansatz nahm den Rohstein auf die Kimme: „Wir starteten zunächst mit einer groben Beschreibung des Rohsteins und brauchten dazu nur wenige Gleichungen“, berichtet Küfer. „Dann bestimmten wir für diesen sehr groben Stein einen größtmöglichen einbeschriebenen Schmuckstein. Passt dieser in den Originalstein – was wir leicht überprüfen

konnten – haben wir die beste Lösung gefunden.“ Verfeinert wird die Berechnung nur dann, wenn es nicht passt. Im Ergebnis heißt das: Die Optimierer benötigen für einen formvollendeten Buntstein statt der ursprünglich 400 000 Gleichungen nur noch 25 bis 30.

Jahrelanges Kopfzerbrechen am Institut war nötig, um ein gutes Zusammenspiel zwischen dem glatten Eichkörper und der anschließenden Facettierung zu finden. „Mathematisch braucht man zwar nur die Facetten fein genug zu machen, um das Problem zu lösen“, sagt Küfer. Doch in der Realität müssen die Facetten eine gewisse Größe haben, damit der Kunde den Edelstein als formvollendet wahrnimmt. Diese Mindestgröße erfordert möglicherweise zu tiefe Schnitte in den Eichkörper, die das Volumen und damit den Preis reduzieren.

Inzwischen haben die Mathematiker am ITWM das Problem weitgehend gelöst. Allerdings funktioniert bei Edelsteinen in Tropfen- oder Kissenform die optimale Annäherung nicht immer befriedigend, weshalb das Team für diese Formen einen aus der Welt der Computerspiele stammenden Kollisionsalgorithmus nutzt. Er

prüft für das Paar von facettiertem Stein und Container, ob sie sich durchdringen. „Diese Notwendigkeit stört mich bis zum heutigen Tag“, meint Küfer und skizziert so, wie anspruchsvoll Mathematiker sind.

Verbesserte Maschinengeneration

Im zweiten Teil des Auftrags von Paul Wild wurden Produktionsmaschinen entwickelt, die die in der Optimierungssoftware berechneten Schlibfbilder umsetzen. Die erste Maschine steht bei der Firma, eine zweite, neuere im Untergeschoss des ITWM. Diese verbesserte Maschinengeneration wurde teilweise durch strategische Mittel der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert. Der Grund ist die Perspektive, auch bei anderen Edelsteinherstellern Interesse für die Rohsteinoptimierungssoftware und -produktion zu wecken.

An einer dritten Maschinengeneration wird gearbeitet. Sie entsteht wiederum bei Paul Wild und soll deutlich kompakter werden. „Wir hoffen, dass wir Ende 2018 erste Tests machen können“, sagt Karl-Heinz Küfer und offenbart damit, dass die Optimierung der Buntsteinproduktion nicht nur die Mathematik herausfordert, sondern auch den Maschinenbau. ●

Mathematik-Studium mit Nebenfach Biologie, Masterarbeit in Umweltphysik – mit dieser Kombination setzt man sich dem Verdacht aus, nicht so recht zu wissen, was man will. Bei Helene Krieg ist das anders. Schon nach wenigen Minuten wird klar, dass ihre Fächer und Vorlieben mit der aktuellen Arbeit im besten Einklang stehen. Am ITWM forscht die 28-Jährige zur Energieeffizienz von Wasserpumpen.

Die Trinkwasserversorgung stammt vielerorts noch aus der Nachkriegszeit. Oft wurde sie mit dicken Leitungen und starken Pumpen bestückt, die für heutige Verhältnisse überdimensioniert und Energiefresser sind. Die Wasserwerke würden daher gern ab und zu die eine oder andere Pumpe abschalten. Doch mit welcher Strategie? Bei jedem Schaltvorgang gibt es in der Leitung Druckstöße, das verringert die Lebensdauer der Motoren. Außerdem schwankt der Wasserbedarf und das Betriebspersonal muss sich gut überlegen, welche Pumpen verzichtbar sind.

Mit dieser Herausforderung trat das Institut für Strömungsmechanik der TU Kaiserslautern ans ITWM heran. 2014 startete das Projekt „H2Opt“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die Abteilung Optimierung – ab 2015 unterstützt durch die Doktorandin Helene Krieg – hat dann getan, was sie am besten kann: optimieren. Nämlich die Pumpenfahrpläne, nach denen Wasserwerke Pumpen ein- und ausschalten. Dahinter liegt ein Algorithmus, der alle Parameter wie Wasserverbrauch oder Druck im System für die Infrastruktur des Wassernetzes kombiniert und in Windeseile Betriebskombinationen durchrechnet.

Das Personal erhält eine Übersicht der besten Kompromisse bezüglich Zielen wie Energieeffizienz und Anzahl der Schaltvorgänge und kann daraus einen Betriebsplan auswählen. Dabei gilt es, zwischen einem energetisch effizienten Betrieb mit vielen Schaltvorgängen oder einem materialschonenden Betrieb bei etwas höherem Energieverbrauch abzuwägen.

Die Entscheidung, welches Ziel wichtiger ist, kann nur der Mensch treffen. Denn sie erfordert Vertrautheit mit den Betriebsanforderungen und Kenntnis der Ziele. Die Software hilft dabei, indem sie Optimierungspotenziale sichtbar und Betriebskombinationen vergleichbar macht. Auch nach der Auswahl kann das Personal einen Betriebsplan weiter auf die tagesspezifischen Anforderungen hin verändern. Der neue Ablauf wird direkt in die Präsentation der berechneten Pläne einbezogen.

Das Projekt wurde 2017 abgeschlossen, die Software wird derzeit beim Energieunternehmen EWR Netz GmbH in Worms er-



probt. Damit endet die Arbeit aber nicht. In ihrer Promotion entwickelt Helene Krieg ein mathematisches Modell, um die Auslegung der Pumpen in neuen Versorgungsnetzen zu optimieren.

Das ist zum Beispiel interessant in Neubaugebieten, wo sich durch immer weitere Gebäude der Verbrauch und der Wasserdruck in den Leitungen verändern. Um flexibler zu werden, ordern Wasserversorger zunehmend Pumpen mit variabler Drehzahl. Den Produzenten der Pumpen bringt das den Vorteil, dass sie weniger Pumpentypen herstellen und bevorraten müssen. Auch hier

kann Mathematik zur Verbesserung beitragen: Mit einem weiteren Modell werden Vorschläge erzeugt, welche Pumpentypen die Hersteller unter den veränderten Bedingungen anbieten sollten. „Mit meinem theoretischen Wissen von der Uni praktische Fragen zu beantworten – das macht mir einfach Spaß“, sagt die Doktorandin.

Und wo bleibt da das einstige Nebenfach, die Biologie? In der Freizeit kartiert die junge Forscherin für den Naturschutzbund Deutschland (Nabu) die Bestände des Wiesenpiepers – eines Vogels, der vom Aussterben bedroht ist. Vorsitzender der Nabu-Gruppe Weilerbach bei Kaiserslautern ist ein Kollege, der bis vor einem Jahr ebenfalls noch am ITWM war. Gemeinsam gehen die Naturschützer im Frühjahr auf Pieper-Pirsch oder setzen Krötenzäune. Helene Krieg: „Man kann ja nicht nur Mathematik machen.“ ●

„Mit meinem theoretischen Wissen von der Uni praktische Fragen zu beantworten – das macht mir einfach Spaß“

Maschinen mit Grips

Nicht so schlau wie ein Gehirn – aber fast: Algorithmen des Machine Learning bieten riesiges Anwendungspotenzial. Das ITWM ist an der Spitze der Entwicklung

von Bernd Müller

In zehn Jahren wird ein Computer Schachweltmeister.“ Diese Prognose machte 1957 der Wirtschaftsnobelpreisträger Herbert Simon. In den Anfangszeiten der Künstlichen Intelligenz waren die Erwartungen hoch. Computer, so der Glaube, würden menschlichen Gehirnen schon bald überlegen sein.

Nach der Euphorie kam die Ernüchterung. Erst 1997 schlug ein Computer den damals amtierenden Schachweltmeister Garri Kasparov und bis heute ist der Mensch dem Rechner weit überlegen, wenn es nicht gerade um Schach, sondern

etwa um die Lösung von komplexen Aufgaben in unkontrollierten Umgebungen ohne feste Regeln geht. Einen ähnlichen Hype gab es in den 1980er-Jahren um Neuronale Netze, die in begrenztem Umfang lernfähig sind wie das Gehirn. Auch da machte sich später Ernüchterung breit.

Riesige Computer-Experimente

Doch seit einigen Jahren herrscht wieder Aufbruchstimmung in beiden Disziplinen. Das Zauberwort heißt Deep Learning. So bezeichnet man riesige Computer-Experimente, bei denen man Unmengen

von Daten in den Computer schüttet. Mit diesen Daten wird ein Neuronales Netz trainiert, aber mit viel mehr „Neuronen“ als bei früheren Versuchen. Das Neuronale Netz lernt selbstständig aus den Daten und kann durch diese „Erfahrung“ Probleme lösen. Große Bekanntheit erlangt hat AlphaGo: ein Programm von Google für den chinesischen Brettspielklassiker Go, das inzwischen alle menschlichen Champions vom Brett gefegt hat.

Jetzt schickt sich Deep Learning an, Aufgaben zu lösen, die auch für Unternehmen interessant sind – auch dank der

◀ Blick in die Tiefe: Die Analyse großer Datenmengen bietet neue Einsichten: Janis Keuper und Michael Bortz (v.l.).

Arbeit am ITWM und immer schnellerer Computer. Doch es gibt ein Problem: Trotz flotterer Rechner dauert das Training eines Neuronales Netzes immer noch sehr lange, vor vier Jahren typischerweise eine Woche. Und heute? „Auch eine Woche“, gibt Janis Keuper zu. „Denn die Probleme sind viel komplexer geworden. Sonst würde es nur eine Stunde dauern.“

Um den wachsenden Anforderungen nicht immer hinterherzuhecheln, will der ITWM-Informatiker das Deep Learning deutlich beschleunigen. Dazu lässt er das Neuronale Netz auf großen Rechnerverbänden mit vielen Knoten parallel rechnen – jeder Knoten bestückt mit einem oder mehreren Mikroprozessoren.

Vertrackte Operationen

Und dort wartet schon die nächste Schwierigkeit. Teilt man nämlich die Rechenarbeit in viele kleine Häppchen, leidet das Ergebnis. Für Mathematiker: Die Knoten führen Matrixmultiplikationen aus. Nicht-quadratische Matrizen degenerieren allerdings, wie der Fachmann sagt, wenn man sie in Teilrechnungen zerlegt. Oder aber der Kommunikationsaufwand zwischen den Knoten explodiert. Heutige Supercomputer haben Tausende Knoten, doch beim Deep Learning bringt schon eine Handvoll von ihnen keinen Geschwindigkeitszuwachs mehr. Schon bei einem Dutzend Knoten sinkt das Rechentempo sogar.

Bis jetzt. Denn das ITWM-Team hat Auswege aus dem Dilemma gefunden. So arbeiten die Mathematiker an neuen numerischen Methoden zur Aufteilung der Matrixoperationen. Außerdem verschlanken und beschleunigen sie die Kommunikation zwischen den Knoten, damit die Daten rechtzeitig dort sind, wo sie für die nächste Rechenoperation gebraucht werden. Die Abteilung ist an einigen Projekten beteiligt, die sich damit beschäftigen, unter anderem an dem EU-Projekt „EPIGRAM“ zur Entwicklung von sogenannten Exascale-Rechnern.



▲ Geballte Rechenkraft: Verteilt auf verschiedene Serverräume stehen den Forschern am ITWM etliche reale und virtuelle Server sowie viele Rechencluster zur Verfügung.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung gab Geld für ein Rechencluster mit 16 Einzelrechnern zum Bau eines Prototyps. Darauf laufen Neuronale Netze mit 15,93-facher Geschwindigkeit, also ganz nahe am maximal möglichen Rechentempo. Schon bald werde man Rechner mit 1000 Knoten nutzen, sagt Janis Keuper: „Damit wollen wir mindestens die 900-fache Geschwindigkeit schaffen.“ Das stößt die Tür für das Deep Learning weit auf. Dienstleister könnten dann Neuronale Netze in der Cloud anbieten, jedes Unternehmen und irgendwann auch jeder private Nutzer könnte dann sein künstliches Gehirn mieten.

Virtuelles Testlabor

Deep Learning als Methode des Maschinellen Lernens hat auch bereits Einzug in der Industrie gehalten. Michael Bortz aus der Abteilung Optimierung nutzt es, um Prozesse in Chemiefabriken zu verbessern. Die sind heute gespickt mit Sensoren, die Temperatur, Druck, Strömung und vieles mehr messen. Die Preisfrage ist, welche Parameter man ändern muss, damit das Endprodukt reiner, billiger oder in höherer Ausbeute aus der Anlage kommt. Weil man dabei viele Kriterien gegeneinander abwägen muss, sprechen Mathematiker von einem „mehrkrite-

riellen Problem“. Als mathematische Methode nutzt Bortz die Pareto-Verteilung, die auch der erfolgreichen Software zur Radiotherapieplanung des Instituts zugrunde liegt (siehe S. 8, „Mathe macht gesund“).

Michael Bortz hat eine Software entwickelt, in der die Verfahrenstechniker mit der Maus an Schieberreglern ziehen können, um so den Prozess in der Anlage zu ändern. „Jede Einstellung ist wie ein Experiment, das man noch nie gemacht hat“, erklärt der ITWM-Wissenschaftler. Was geht und was geht nicht? Die Software sagt es per Knopfdruck auf Basis der Erfahrungen, die sich Machine-Learning-Algorithmen mit echten Daten aus der Anlage angeeignet haben.

Die erzielten Ergebnisse sind verblüffend. Durch eine Änderung von Prozessparametern lässt sich die Ausbeute der Chemikalie – im Beispiel ein Grundstoff für die kosmetische Industrie – um zehn Prozent steigern, ohne dass die Reinheit darunter leidet.

Diese Resultate habe man den Experten eines Chemiekonzerns gezeigt und die hätten es erst geglaubt, nachdem sie es ausprobiert hatten, berichtet Bortz: „Unsere Kunden dürfen sich was wünschen und es geht in Erfüllung – das ist fast wie Weihnachten.“



$$(\rho A) \partial_{tt} \mathbf{r} = \partial_s (T \partial_s \mathbf{r} - \partial_s ((EI) \partial_{ss} \mathbf{r})) + \mathbf{f}_{\text{ext}}, \quad \|\partial_s \mathbf{r}\| = 1$$

Große Schritte fürs kleine Geschäft

Vliesstoffe und Filter saugen und säubern besser, wenn sie mit den Simulationswerkzeugen des ITWM optimiert wurden

von Bernd Müller

Eine Babywindel ist ein echtes Hightech-Produkt – schauen Sie mal.“ Beherzt zerfleddert Simone Gramsch eine nagelneue Pampers-Windel und legt Schicht für Schicht frei: erst die oberste Vliesschicht (sie sorgt für Reißfestigkeit), dann eine dünne Wattelage (sie verteilt die Flüssigkeit) – und schließlich den in eine Schicht aus weißen Flocken eingebetteten Superabsorber.

„Diese Windel für ein sechs Monate altes Baby schluckt 600 Milliliter Flüssigkeit“, sagt die Wissenschaftlerin. Zur

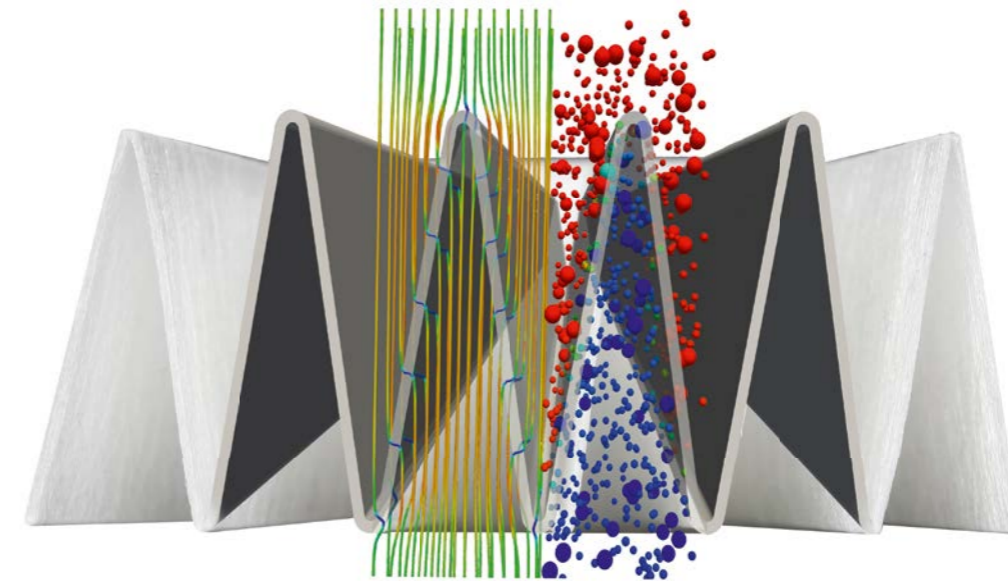
Demonstration gießt sie Wasser auf das Wundermaterial, das sich dadurch zu einem enormen Schneeball aufbläht – kein Kleinkind könnte auf einmal so viel Pippi machen. Und falls doch, gäbe es außen noch eine dichte Plastiksicht, die auch festere Ausscheidungen sicher verpackt.

Boom bei Senioren-Windeln

Simone Gramsch ist Expertin für Windeln. Nicht weil sie Mutter von zwei Kindern ist, sondern weil sie sich mathematisch mit den Materialien beschäftigt, die

darin stecken. Ihr Augenmerk gilt vor allem den Vliesen, die die Flüssigkeit absorbieren. Dass Windeln heute nur noch halb so viel Vliesmaterial benötigen wie vor 20 Jahren, aber die gleiche Flüssigkeitsmenge aufnehmen können, ist auch Gramschs Forschung am ITWM zu verdanken. Und die Arbeit geht weiter, denn die Wirkung der Absorber soll noch besser werden.

Der Markt für Windeln wächst mit acht Prozent pro Jahr – aber nicht wegen steigender Geburtenraten, sondern wegen der immer älter werdenden Bevölkerung.



◀ Optimale Faltenfilter: Die sind bei Herstellern beliebt, da sie eine große Oberfläche auf kleinem Raum bieten. Ihr Verhalten lässt sich per Software nachbilden. Bild links: die ITWM-Forscher Stefan Rief, Simone Gramsch und Ralf Kirsch (v.l.).

„In Japan werden schon mehr Windeln für Senioren verkauft als für Babys“, berichtet Gramsch. Und nicht nur dort werden Vliese benötigt. Auch Sitzbezüge aus Mikrofasern und Dachhimmel im Auto bestehen aus solchen Materialien, ebenso der Mundschutz des Arztes.

Gleichungen für den Vliesstoff

Die Mathematikerin befasst sich mit der Herstellung solcher Vliesstoffe sowie mit der numerischen Simulation der Prozesse, die dabei in der Maschine ablaufen. Dort wird heißer Kunststoff aus Düsen gepresst, der in der Luft erstarrt und anschließend auf einem Band zu Vlies verfestigt wird. „Mathematisch ist das hochinteressant“, sagt Simone Gramsch – und kompliziert. Die Bewegung mit den Kräften, die insbesondere die Luft auf die haarfeinen Kunststoff-Filamente ausübt, beschreibt sie mit partiellen Differentialgleichungen. Anderswo im Produktionsprozess kommen stochastische Differentialgleichungen zum Einsatz.

Seit 2009 entwickelt Gramschs Team Softwaretools wie VisFiD und FIDYST, um diese Gleichungen zu lösen. Dass die mathematischen Modelle exzellent mit der Realität übereinstimmen, belegen Messungen. Das ITWM hat dazu einen eigenen Computertomografen angeschafft, der Strukturen kleiner als ein Mikrometer sichtbar macht.

Auch die Kunden sind immer wieder überrascht. Simone Gramsch berichtet von einer Simulation, die nicht mit der Realität an der Maschine eines großen Vliesherstellers übereinstimmte. Wie

sich herausstellte, war die Simulation korrekt, doch die Realität war verkehrt. Denn die Bediener der Maschine hatten aus Bequemlichkeit Gummimatten an die Maschine gelegt, die die Luftzufuhr behinderten, ohne der Produktionsleitung Bescheid zu sagen. Die Konsequenz: Die Anfangsbedingungen der Simulation stimmten nicht mehr.

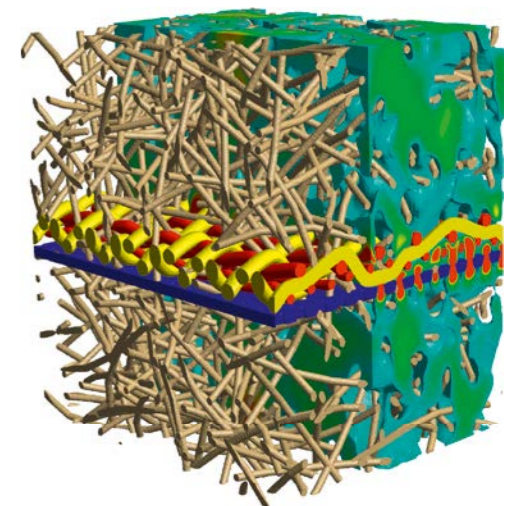
Der Wunsch: Lösung per Knopfdruck

So ein Aha-Effekt sei aber nicht selbstverständlich, warnt Gramsch: „Dass ein physikalisches Modell da ist, bedeutet nicht, dass man es simulativ sinnvoll nutzen kann.“ Dazu müssten Physiker und Mathematiker zusammenarbeiten – und Informatiker. „Denn die Kunden interessieren sich nicht für unsere Modelle. Sie möchten nur einen Knopf drücken und die Lösung haben.“ Am ITWM sind alle nötigen Forschungsdisziplinen vertreten – eine große Stärke des Instituts.

Eine weitere Stärke ist, dass das Institut strategisch wichtige Themenfelder möglichst umfassend besetzt und dazu Know-how aufbaut. So ist Simone Gramsch nicht die Einzige am Institut, die sich mit Vliesstoffen beschäftigt. „Die Kollegin befasst sich mit dem ersten Schritt – der Herstellung der Fasern und Vliese“, sagt Stefan Rief. „Bei mir geht es um die Nutzung solcher Materialien.“ Rief, seit 18 Jahren am Institut, befasst sich generell mit porösen Materialien, und besonders Filze haben es ihm angetan.

Sein derzeitiges Forschungsgebiet sind Entwässerungsfilze für die Papierherstellung. Die nasse Papierbahn läuft ty-

pischerweise getragen von einem Filz zwischen zwei Walzen durch den sogenannten Prozessspalt. Dabei wird das Wasser aus dem Zellulosebrei gepresst, manchmal auch zusätzlich aktiv herausgesaugt. In einem rasanten Kreisprozess wird ein Teil des aufgenommenen Wassers wieder entfernt, dann läuft der Filz erneut durch die Walzen. Die Hersteller der Filze stecken allerdings in einem Dilemma: Beim Kontakt mit dem Papier soll der Filz in Sekundenbruchteilen möglichst viel Wasser aufnehmen.



▲ Digitale Strömung: So sieht es in der Simulation aus, wenn Wasser durch einen virtuellen Pressfilz fließt.



◀ Die ITWM-Wissenschaftlerin Simone Gramsch vergleicht einen realen Vliesstoff mit einer Simulation der FIDYST-Software. Diese wurde am Institut entwickelt, um die Produktion von Vliesstoffen zu berechnen.

Kollegen simuliert haben. Kirsch nimmt ein akkurat gefaltetes Filtrvlies und biegt es im Kreis. In eine Metalldose gesteckt ist das ein Ölfilter fürs Auto. Mit Schaumstoff kombiniert ist es ein Luftfilter.

Das Problem mit den Falten

Schmutzpartikel im Öl oder in der Luft können den Filter verstopfen. Doch die Standzeit ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal, denn Autobesitzer wollen nicht bei jeder Inspektion sämtliche Filter tauschen müssen. Ein weiteres Problem der Hersteller: Durch die Faltenlegung wird das Verhalten des Filtermaterials komplizierter. Außerdem wird bei der Fertigung ein Stützgewebe in die Vlieslagen gepresst, das dort für eine Verdichtung des Materials sorgt. Kirsch hat Simulationswerkzeuge entwickelt, die diese Verdichtung einkalkulieren und berücksichtigen, dass sich ein gefalteter Filtereinsatz anders verhält als ein flacher. Sie errechnen das Optimum aus effizienter Filterung, geringem Druckverlust und langer Lebensdauer. Dazu modelliert der Algorithmus nicht jedes Teilchen, wie in den Simulationen von Gramsch und Rief, sondern Verläufe von Konzentrationen der Partikel.

Wer nutzt diese Software? Das dürfte er nicht sagen, meint Ralf Kirsch. „Der Wettbewerbsdruck in der Branche ist hoch und entsprechend wichtig ist die Geheimhaltung bei der Produktentwicklung. Das respektieren wir natürlich“. Die Automobilindustrie sei begeistert und bestätige, dass die Filter nach der Optimierung am ITWM besser seien. „Trotzdem gibt es immer noch Firmen, die unser Werkzeug nicht nutzen, sondern auf herkömmliche Simulationsmethoden setzen oder sogar rein empirisch vorgehen“, berichtet Kirsch. Für Simone Gramsch ist das kein Problem: „Wir machen nun mal nicht das, was alle machen, sondern kümmern uns gerne um die komplizierten Fälle.“ ●

Die Hersteller der Papiermaschinen und Entwässerungsfilze experimentieren seit Jahrzehnten, indem sie verschiedene Fasertypen mit komplexen Grundgeweben vernadeln. Dafür gibt es fast unendlich viele Kombinationsmöglichkeiten. Sie alle auszuprobieren ist unmöglich. Zudem stellen die Produzenten die Filze nur in großem Maßstab her. Jedes einzelne Experiment ist also auch entsprechend kostspielig und nur auf Pilotmaschinen realisierbar – aber nicht auf Papiermaschinen, die rund um die Uhr im Produktionsmodus sind.

In dieser Bredouille kam ein Vertreter der Heimbach-Gruppe vor einigen Jahren auf einer Messe mit Stefan Rief ins Gespräch. Das Unternehmen im rheinischen Düren-Mariaweyer produziert technische Textilien, vorwiegend für die Papierindustrie. Rief nahm die Herausforderung an und entwickelte in fünf Jahren Arbeit ein Simulationsmodell, das die Deformation durch die Pressprofile in Kombination mit der Wasserströmung in dem komplexen Schichtsystem aus Papier und Filz beschreibt. Ergebnis ist die Software FeltSim, die heute bei Heimbach im Einsatz ist.

FeltSim ist indes nicht die erste und einzige Software, die das Team entwickelt hat. Eine andere ist das Programm

GeoDict: ein digitales Materiallabor, mit dem sich unter anderem Filter optimieren lassen. Hier war der Treiber die Firma Mann + Hummel aus Ludwigsburg bei Stuttgart, mit der die Arbeitsgruppe seit 1996 zusammenarbeitet. GeoDict ist auch kommerziell ein Erfolg. Weiterentwickelt und vertrieben wird es von der Firma Math2Market: einem Spin-off ehemaliger ITWM-Mitarbeiter, das die Kommerzialisierung der Software für das virtuelle Materialdesign übernommen hat (siehe S. 32, „Sprungbrett für Spin-offs“).

Viele Kompetenzen vereint

Die Simulationssoftware ist auch ein gutes Beispiel dafür, wie wichtig es ist, unterschiedliche Kompetenzen unter einem Dach zu vereinen. Geodict ist nämlich in der Lage, über eine Software-Schnittstelle die Ergebnisse aus den Simulationen von Simone Gramsch einzulesen. Variiert sie den Herstellungsprozess des Vliesmaterials, kann ihr Kollege damit gleich das Verhalten als Filter simulieren.

„Aller guten Dinge sind drei“, schmunkelt Ralf Kirsch. Der Mathematiker aus der Abteilung Strömungs- und Materialsimulation sitzt am Ende der „Nahrungskette“: Er beschäftigt sich mit der Funktion realer Produkte, die seine beiden

Arbeiten ohne zu schwitzen

Äußerst sparsam und obendrein noch schick: Das Institutsgebäude in Kaiserslautern setzt Maßstäbe bei Energieeffizienz und Arbeitsatmosphäre

von Bernd Müller

Der Gebäudekomplex, in dem die Forscher des ITWM arbeiten, ist spektakulär: Großzügige Atrien mit haushohen Bananenstauden und Balkonen mit Besprechungsiseln wechseln sich ab mit gemütlichen Bürotrakten, die wie Häuser im Haus wirken. Richtig interessant wird es aber, wenn man sich mit Klaus Linck in die Eingeweide des Bauwerks begibt. Der Ingenieur ist Technischer Leiter und hat als einer der wenigen einen Schlüssel zu Räumen, die normale Mitarbeiter nie zu Gesicht bekommen.

Strom und Wärme vom Keller

Zum Beispiel zum Keller, wo zwei Blockheizkraftwerke Tag und Nacht vor sich hin surren: Sie produzieren einen Großteil des im ITWM erzeugten Stroms. 2017 lieferte die Anlage 1,6 Millionen Kilowattstunden Strom und 2,7 Millionen Kilowattstunden Wärme. Im Sommer dient die Wärme über ein Absorptionsverfahren zum Erzeugen von Kälte. Unterstützung erhalten die beiden Kleinkraftwerke von einer 150 Kilowatt starken Vakuumsolarröhren-Anlage auf dem Dach.

Mittels „freier Kühlung“, also ohne nennenswerten Aufwand an zusätzlicher Energie, und einem 600 Kubikmeter großen Wasserspeicher wird auch Kälte eingesetzt. Die Abwärme der Serverräume heizt zudem die Atrien, die die einzelnen Gebäudeabschnitte miteinander verbinden. Selbst wenn draußen minus 20 Grad Celsius herrschen, ist es dort noch angenehme 17 Grad Celsius warm. An normalen Wintertagen kommt es sogar vor, dass



Mitarbeiter zum Erwärmen der Büros die Fenster zu den Atrien öffnen.

Egal wonach man Klaus Linck fragt, die Antwort ist: „Das haben wir auch.“ Schon öffnet sich der nächste Kellerraum mit der neuesten Energietechnik. Nur eine Klimaanlage für die Büros, „Denkzellen“ genannt, gibt es nicht. Aber auch das ist durchdacht. Jedes Büro wird mit 40 Kubikmeter Frischluft pro Stunde versorgt. Bevor sie die Denkzellen erreicht, fließt die Luft durch einen Erdkanal, der sie im Winter vorwärmt und im Sommer kühlt. Selbst an Details haben die Planer gedacht: So sind die Schiebefenster der Büros verkehrt herum eingebaut, damit sie die Wärmestrahlung in die Atrien reflektieren und

das „Brüten“ der Mitarbeiter über der Mathematik nicht zu wörtlich wird.

Lohnt sich der Aufwand? Als der Bau entworfen wurde, kalkulierte man fürs Budget eine normale Technik-Ausstattung. Das Kostenplus musste durch geringere Energiekosten und den Wegfall etwa von Dämmung und Heizkörpern hereingeholt werden. Das gelang. Mit 50 Kilowattstunden Wärme pro Quadratmeter und Jahr ist das Institut sehr energieeffizient. Und mit einem Gesamt-CO₂-Ausstoß für Strom, Gas und Fernwärme von 1000 Tonnen in 2017 ist es sehr klimafreundlich. Doch das ist kein Grund für Klaus Linck, sich zurückzulehnen: „Wir suchen immer nach Möglichkeiten, noch effizienter zu werden.“ ●

Die Methode bringt's

Gesundheit am Arbeitsplatz, Einfüllen von Bier ins Glas, Fahren auf nassem Untergrund: Neue Simulationmethoden machen dynamische Vorgänge berechenbar. Gemeinsam treiben Forscher verschiedener Fraunhofer-Institute die Entwicklung voran

von Bernd Müller

In die Knie gehen, Kiste greifen und dann mit geradem Rücken aus den Oberschenkeln aufrichten. So hebt man richtig. An Industriearbeitsplätzen helfen solche simplen Regeln allerdings nicht weiter. Dazu sind die Bewegungen zu komplex und vielfältig, die Lasten zu unterschiedlich. Um Gesundheitsschäden zu vermeiden, beobachten und bewerten Arbeitsmediziner die Bewegungen. Mitunter nutzen sie Sensoren, die am Körper befestigt sind und die Bewegungen aufzeichnen. Auch nicht mehr ganz neu sind

digitale Menschmodelle. Sie hatten bisher den Nachteil, dass sie nur sehr einfache Aussagen zur Ergonomie erlaubten, zum Beispiel ob eine Kiste mit Bauteilen in Reichweite des Armes ist.

„Marktübliche Modelle können bei der Biomechanik zu wenig“, klagt Joachim Linn, stellvertretender Leiter der ITWM-Abteilung Mathematische Methoden in Dynamik und Festigkeit. „Daher entwickeln wir im Projekt EMMA-CC etwas Besseres.“ Das Kürzel steht für „Ergo-dynamic Moving Manikin with

Cognitive Control“. Der Avatar aus dem Projekt ist ein mathematisches Modell von Kopf, Rumpf und Gliedmaßen des menschlichen Körpers. Damit kann man dessen Bewegungen nach den Gesetzmäßigkeiten der Biomechanik simulieren.

Strategische Allianzen

Die Modelle des Instituts sind aber nur ein Teil des Projekts. Die Fraunhofer-Gesellschaft fördert es in ihrem Programm „Marktorientierte Strategische Vorlauforschung“ (MAVO), das die

wissenschaftlichen Grundlagen in innovativen, für die Gesellschaft vielversprechenden Themen legt. An MAVOs sind immer mehrere Fraunhofer-Institute beteiligt, in diesem Fall sechs. Das Stuttgarter Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA steuert Messungen zu Muskelbewegungen bei, das Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK in Berlin befasst sich mit der bisher selten gestellten Frage, welcher kognitiven Beanspruchung Industriearbeiter ausgesetzt sind. Denn am Fließband ist nicht nur Muskelkraft gefragt. Auch das Wahrnehmen, Erinnern und Reagieren belasten.

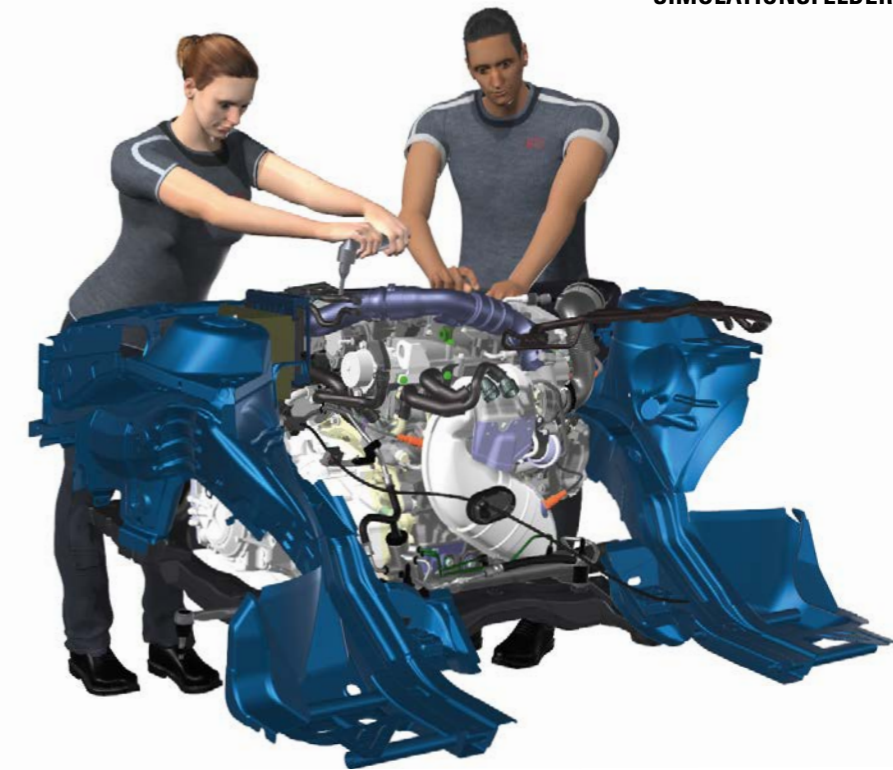
2015 startete das Projekt. Auf der Hannovermesse 2018 wurde Bilanz gezogen. Ein Resultat ist eine Software, die in der Produktionsplanung die Gestaltung von Arbeitsplätzen erleichtert – vorausschauend. Der Planer kann Belastungen vorgeben und daraus Arbeitsabläufe und nötige Hilfsmittel ableiten. Das ist unter anderem wichtig für die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, die in der Industrie an Bedeutung gewinnt. „Künftig sollen Mitarbeiter und Arbeitsmediziner mit der Software gemeinsam den optimalen Arbeitsplatz planen“, sagt Linn. So könnte das Modell für Personen mit körperlichen Einschränkungen andere Bewegungen mit geringeren Lasten berechnen.

Die Software IPS IMMA, die von der ITWM-Ausgründung flexstructures betrieben wird, hat ihre Feuertaufe in Tests bei deutschen und schwedischen Autoherstellern bereits bestanden. In Hannover wurde sie als Messeneinheit erstmals in Deutschland vorgestellt.

Herkulesaufgabe an der Pfütze

Die Bewegung eines Menschen zu simulieren ist anspruchsvoll – aber überschaubar. Je mehr Objekte sich in einer Simulation bewegen, um so komplizierter wird es. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn ein Auto durch eine tiefe Pfütze fährt und die Was-

◀ Eine heikle Aufgabe für Ingenieure: Wie spritzen Wassertropfen vom Asphalt und durch die Luft, wenn das Auto durch eine Pfütze fährt? Die Mathematiker bei Fraunhofer in Kaiserslautern haben dafür eine pfiffige Lösung gefunden.



▲ Hand in Hand am Motorblock: Im Fokus des Projekts EMMA-CC stehen die digitale Modellierung und Simulation menschlicher Tätigkeiten am Arbeitsplatz.

sertropfen in die Karosserie spritzen. Die Bewegung des Autos und der Tropfen sowie deren Wechselwirkung mit der vorbeiströmenden Luft – für die mathematische Modellierung ist das eine Herkulesaufgabe. Genau diesen Anwendungsfall hat Jörg Kuhnert aus der Abteilung Transportvorgänge des ITWM für einen Autohersteller ausgeführt – auch das ein Beispiel für eine erfolgreiche Kooperation im Fraunhofer-Verbund. Die Forscher in Kaiserslautern arbeiten mit Kollegen am Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI in Sankt Augustin zusammen.

Kuhnert und seine Kollegen setzen aber nicht auf die Methode der finiten Elemente, die Ingenieure in der Automobil- und Luftfahrtindustrie als Standardverfahren verwenden, sondern auf die Finite-Pointset-Methode (FPM). Beim klassischen Verfahren wird ein Gitternetz über Karosserie oder Flugzeuggeometrie gelegt und das Strömungsverhalten in jedem Gitterbaustein berechnet. Nachteil: Allein die Vernetzung kann für komplexe Geometrien Wochen dauern, die Simulation selbst nochmals Tage oder Wochen. „Unseren Kunden dauert das zu lange“, sagt Kuhnert.

Der gelernte Maschinenbau-Ingenieur, seit 1996 am Institut und nach eigener

Einschätzung ein „Urgestein“, entwickelt im Team seit dem Jahr 2000 die FPM: eine generalisierte Differenzenmethode. Sie kommt ohne Vernetzung aus und ist schon deshalb erheblich effizienter einsetzbar – Wochen schrumpfen unter Umständen zu wenigen Stunden. Es gebe noch weitere gitterfreie Methoden, sagt Kuhnert, doch die könnten seinem Verfahren bei der Flexibilität der Software und der physikalischen Genauigkeit nicht das Wasser reichen. „Die Software unseres größten Konkurrenten ist schnell und bunt, aber die Qualität der Ergebnisse ist schlecht.“

In der Autoindustrie ist das lange bekannt. Die nutzt Lizenzen der ITWM-Software. Etwa um das Befüllen des Tanks zu simulieren und das Zurückspritzen des Kraftstoffs bei steigendem Druck im Tank zu verhindern. Jetzt knöpft sich Kuhnert die Lebensmittelbranche vor. 2018 haben die Forscher im Team erstmals die Software MESHFREE vorgestellt. Interessant ist sie für Kunden, die Lebensmittel mischen, rühren, extrudieren oder Flaschen säubern und befüllen – überall wo sich Stoffe komplex bewegen. Hingucker auf dem Messestand war ein Video, das unter anderem eine physikalisch realistische Simulation des Bierzapfens zeigt. ●

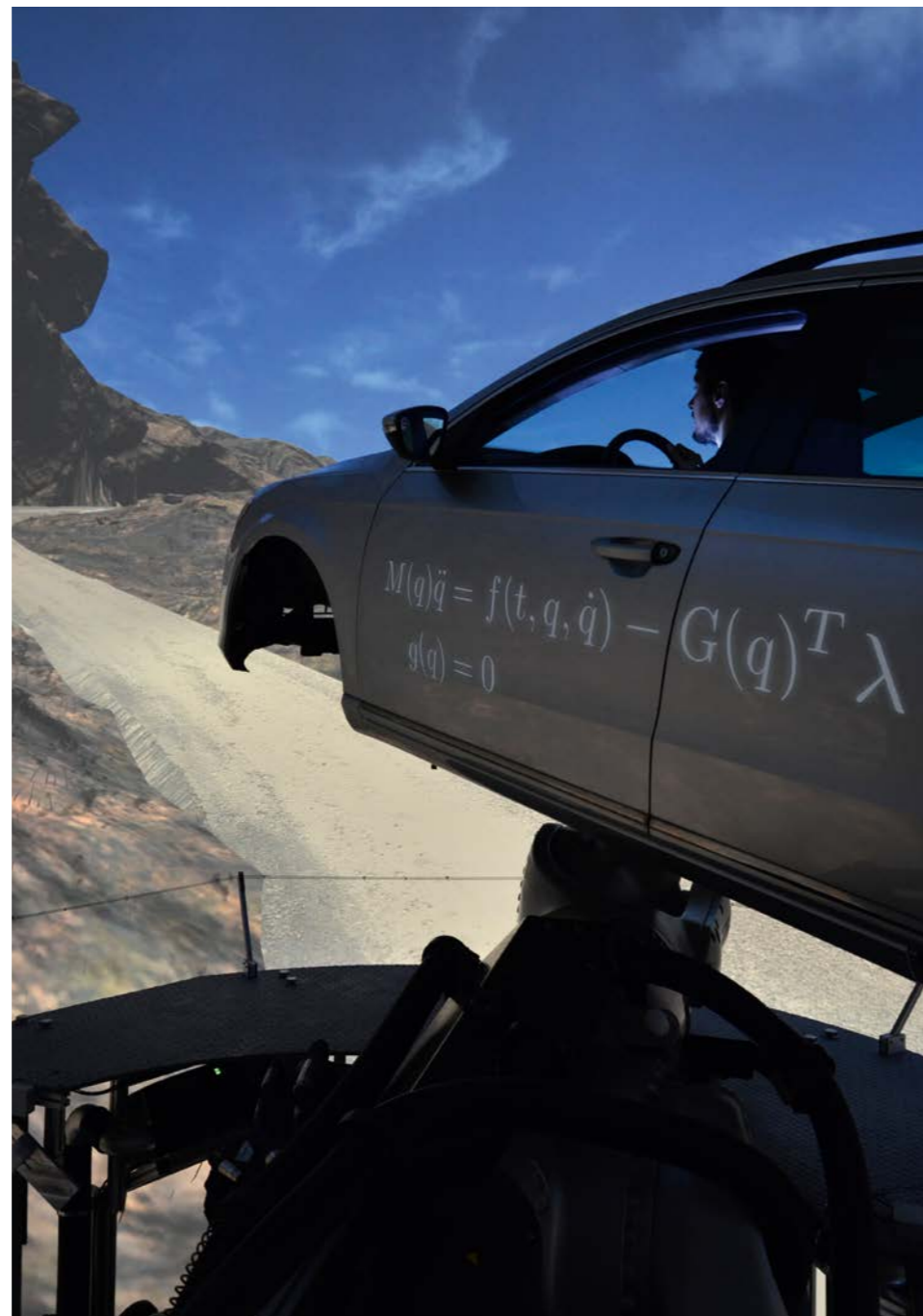
Das Wunder von RODOS

Bevor ein neues Automodell vom Band läuft, wird es auf Herz und Nieren simuliert. Doch dabei fehlt die Interaktion von Mensch, Fahrzeug und Umgebung. ITWM-Forscher ändern das

von Bernd Müller

Anschnallen und los geht's. Der Bagger setzt sich in Bewegung, holpert in die Baugrube, rüttelt über Kies und kippt nach hinten beim Ansetzen der Schaufel. Mensch und Material werden in dem 15-minütigen Einsatz bis an die Grenzen belastet. Sorgen machen muss sich der Pilot aber nicht. Denn die Tour de Tortur findet virtuell in einem Fahrzeugsimulator statt. Unter einer Kuppel in einem der großzügigen Atrien des ITWM, getaucht in orange fluoreszierende Farbe, ist das Cockpit des Baggers auf einem fünf Meter langen Roboterarm befestigt. Er wuchtet Führerkabine und ganze Autos bis zu einer Tonne Gewicht hin und her, auf und ab. So realistisch, dass viele Hersteller von Pkw oder Nutzfahrzeugen ihre Produkte im „Robot based Driving and Operation Simulator“ (RODOS) testen lassen. Angelockt werden sie aber nicht nur vom Simulator – ähnliche Anlagen gibt es auch in Entwicklungszentren einiger großer Automobilhersteller. „Interessant ist, dass hier Mensch, Fahrzeug und Umwelt wie in der Wirklichkeit interagieren“, sagt Klaus Dreßler.

Der Leiter der Abteilung Mathematische Methoden in Dynamik und Festigkeit muss es wissen. Nach seiner Promotion beim Gründer des ITWM, Helmut Neunert, zog es den Physiker und Mathematiker erst zu LMS, heute zu Siemens gehörend, und dann zu mehreren Autoherstellern, wo er sich mit Simulationen für die Entwicklung von neuen Automodellen befasste. Dort hat er mitgeholfen, dass das heute nur noch eineinhalb Jahre



dauert – statt acht Jahren wie zu seinen Anfangszeiten in den 1990er-Jahren. Mit diesem Know-how gerüstet, kam er 2003 zurück ans Institut, um die Abteilung aufzubauen und die Kunst der Simulation weiter voranzutreiben.

Überall wird simuliert

Denn dabei ist die Automobilindustrie neben der Luftfahrtbranche an vorderster Front: Es gibt nichts, was an einem neuen Fahrzeug nicht vor Anlauf der Serienproduktion erschöpfend im Rechner getestet worden wäre. „Doch“, kontert Dreßler: „Nutzungsvariabilität, Umgebungseinflüsse und der Mensch“. Wenn Energieverbrauch und Emissionen eines virtuellen Fahrzeugs simuliert werden, ist es immer dieselbe Straße. Es regnet und schneit nie, der GTI-Fahrer mit Bleifuß wird gleich behandelt wie der vorsichtige Rentner. Die Interaktion mit der Umwelt findet in diesen Simulationen nicht statt.

Anders in den Simulationen, die Dreßlers Team entwickelt: Sie stellen ganze Fahrmanöver nach. Wenn ein Auto durch ein Schlagloch fährt, ist es immer ein anderes Schlagloch – und es ist auch nicht immer derselbe VW Golf, sondern es sind eine Million Golf-Fahrzeuge mit unterschiedlichen Ausstattungen und auf vielen Straßen dieser Welt. Fahrer, Nutzungsart, Geografie, Wetter, Verkehrssituation: Die ganze Vielfalt an Nutzungsmöglichkeiten wird abgebildet. „Da sind wir führend“, versichert der Abteilungsleiter.

Paderborn oder Kuala Lumpur

Dazu treibt das Team einen enormen Aufwand. In repräsentativen Städten kennen die Wissenschaftler sämtliche Straßen und ihren Zustand, außerdem die Wetterverhältnisse übers Jahr. Mit diesem Wissen fahren sie im Rechner Routen nach, zum Beispiel für Volkswagen rund um Hannover mit dem VW Crafter. Der Transporter wird von vielen Handwerkern und Postzustellern genutzt, entsprechend unterschiedlich sind die Touren: mal sternförmig aus der Stadt ins Umland und wieder zurück pendelnd und mal in geschlossenen Schleifen durch die Stadt von Briefkasten zu Briefkasten.

Das Institut hat eine georeferenzierte Datenbank für das Straßennetz vieler Re-



▲ Wissenschaftler auf Achse: Um 3D-Umweltdaten als Basis für realitätsnahe Simulationen zu erfassen, hat das Team ein Fahrzeug mit modernster Lasermesstechnik entwickelt.

gionen der Welt aufgebaut. Ein einziger Knopfdruck genügt, und die Autos in der Simulation fahren in Paderborn oder in Kuala Lumpur.

Durch diese Routen werden die Fahrzeuge Hunderttausende Kilometer weit gejagt. Dabei simulieren die Forscher Kraft- und Energieflüsse in Fahrzeugkomponenten wie Achsen, Reifen und Karosserie, um daraus Aussagen über Akustik, Spritverbrauch, Betriebsfestigkeit und Lebensdauer abzuleiten. Nur wer die Umwelt einkalkuliert, kann verlässliche Aussagen treffen – doch keine kommerzielle Simulationssoftware kann das. Auch bei der Modellierung der Mechanik ist das ITWM weit vorn. Sehr kompliziert zu berechnen sind zum Beispiel die Einflüsse auf die Reifen. Die beste Methode dazu habe sein Team entwickelt, sagt Dreßler.

Die Verzahnung der Umwelt- und Fahrzeugsimulation mit der Kognition von Testpersonen im RODOS ist einzigartig – aber erst der Anfang. Das große Thema der kommenden Jahre in der Autoindustrie ist das autonome Fahren. Da macht sich das Fehlen von Umweltmodellen besonders schmerzlich bemerkbar. Ob ein Objekt am Straßenrand ein Baum ist oder ein Fußgänger, der gleich auf die Straßen

treten wird, erkennen die Algorithmen noch unzuverlässig. Schuld daran ist nicht ihre unzulängliche Technik, sondern dass es keine geeigneten Daten zum Trainieren gibt.

3D-Scanner auf großer Fahrt

Die Lösung steht in einer Garage beim Institut: ein Vito, dessen Dach gespickt ist mit Kameras, Laserscannern und Kreiselkompass, innen voller Elektronik. Der Wagen soll in ausgewählten Regionen fahren und dreidimensionale Infos zur Umgebung sammeln, vergleichbar mit den Autos von Google. Doch den Forschern geht es nicht um schöne 3D-Ansichten in einer Karten-App, sondern um Daten, die mit maschinellem Lernen klassifiziert werden – damit sich ein Baum als Baum und ein Fußgänger als Fußgänger erkennen lässt. Diese Daten trainieren Algorithmen, die in Automobilen der Zukunft den Fahrer ersetzen sollen.

So viel technischer Aufwand ist typisch für ein Fraunhofer-Institut – aber nicht unbedingt für das ITWM, wo sonst eher mit dem Kopf und dem Computer gearbeitet wird. Doch der Einsatz lohnt sich. „Man wird von der Industrie und von anderen Instituten geschätzt“, sagt Klaus Dreßler. „Und ich finde es spannend, im richtigen Leben zu stehen.“ ●

„Wir brauchen die klügsten Köpfe“

Die Mathematik als Schlüssel zu erfolgreichen technischen Neuerungen: Institutsleiter Dieter Prätzel-Wolters erklärt, was es dazu braucht und welche Perspektiven sich künftig für die mathematische Forschung bieten

Das Gespräch führte Ralf Butscher



Herr Prätzel-Wolters, was begeistert Sie an der Mathematik?

Es ist die Kombination aus mehreren Faktoren. Zum einen die Mathematik als freies Spiel des Geistes: Strukturen und Methoden entstehen aus sich selbst heraus. Das hat eine eigene Schönheit und Ästhetik. Es gibt auch viele Bezüge zu Kunst und Musik. Wenn ein Beweis steht, um den man lange gerungen hat, ist das etwas Besonderes. Hinzu kommt die Bedeutung der Mathematik als Innovationstreiber und Motor der Wirtschaft. Sie ist zu einem entscheidenden Instrument für die Gestaltung des technischen Fortschritts geworden. Das belegen etwa die über 2000 Projekte, die wir am ITWM bislang bewältigt haben.

Wie finden Sie ihre Forschungsthemen?

Viele Themen kommen über unsere Kunden zu uns. Wir haben einen hohen Anteil an Industrieprojekten, gemeinsam mit Unternehmen. Die haben konkrete Probleme, die wir bearbeiten und lösen.

Wie gehen Sie dabei vor?

Zunächst müssen wir die Probleme der Firmen in die Sprache der Mathematik übersetzen. Dazu braucht es ein Modell. Oft stellt sich dabei heraus, dass es das im bestehenden Fundus der Mathematik nicht gibt – weil die Aufgabe zu komplex ist oder bestimmte Randbedingungen in der Praxis nicht erfüllt sind. Aus dieser Quelle sprudeln viele spannende Fragen, die in die mathematische Forschung einfließen. Welche Methoden wir dafür einsetzen, hängt vom konkreten Problem ab.

Was ist Ihnen besonders wichtig?

Dass wir an der Front der Grundlagenforschung dranbleiben. Denn um am Markt erfolgreich zu sein, brauchen wir einen Vorsprung – etwa gegenüber Softwarehäusern, die wie wir Algorithmen entwickeln.

Wie erreichen Sie diesen Vorsprung?

Die Basis dafür ist eine enge und intensive Zusammenarbeit mit Kol-

leginnen und Kollegen, zum Beispiel aus dem Fachbereich Mathematik der TU Kaiserslautern aber auch von anderen Universitäten und aus anderen Disziplinen. In der Regel haben wir 50 bis 60 Doktoranden am Institut. Und wir beteiligen uns an etlichen öffentlich geförderten Forschungsprojekten, etwa von BMBF, DFG oder EU.

Lassen sich mathematische Erkenntnisse patentieren?

Das ist ein wichtiges Thema für uns, da wir unsere Ergebnisse verwerten wollen, etwa durch Lizenznahmen. Allerdings gilt im Patentrecht der Grundsatz, dass abstrakte oder intellektuelle Methoden wie mathematische Formeln oder Algorithmen nicht patentierbar sind. Das geht nur im Kontext einer technischen Anwendung. Ein prominentes Beispiel aus der Fraunhofer-Gesellschaft ist die Audiokodierung MP3. Dahinter steckt ein Mathematik-Algorithmus, der selbst nicht patentiert ist – das technische Verfahren aber schon.

Gibt es solche Erfolge am ITWM?

Hier am Institut haben wir zum Beispiel ein Verfahren zur Optimierung der Radiotherapieplanung entwickelt. Die Technik wird derzeit vom Weltmarktführer Varian Medical Systems aus den USA für mehr als 20 000 Bestrahlungseinheiten weltweit ausgerollt.

Können Sie Ihr Vorgehen an einem typischen Beispiel erläutern?

Zunächst kommt ein Kunde zu uns mit einem Problem – etwa eine Firma, die einen Filter für bestimmte Zwecke auslegen will. Dazu liefert uns der Kunde Daten aus Messungen an vorhandenen Filtern. Wir modellieren den Filtertyp und berechnen seine Eigenschaften. Die erzielten Resultate zeigen uns, wie gut unser Modell ist, das wir daraufhin optimieren. Am Ende kann der Kunde dann im Detail sehen, wie die Absorption in dem Filter je nach Auslegung verläuft.

PROF. DR. DIETER PRÄTZEL-WOLTERS

studierte Mathematik, Physik und Wirtschaftswissenschaften in Hamburg und Bremen, wo er in Mathematik promovierte. 1987 wechselte der gebürtige Emdener (*1950) als Professor für Technomathematik an die TU Kaiserslautern. Im Jahr 2000 übernahm er die Leitung des kurz zuvor gegründeten Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM. Bis 2016 hatte Prätzel-Wolters zehn Jahre lang den Vorsitz des wissenschaftlich-technischen Rates und der Hauptkommission der Fraunhofer-Gesellschaft inne und war Mitglied von Präsidium und Senat. Seit 2011 trägt er den Verdienstorden des Landes Rheinland-Pfalz. 2015 wurde er mit der „Fraunhofer-Münze“ für herausragende Verdienste um die Fraunhofer-Gesellschaft ausgezeichnet.

Wo liegen ihre Schwerpunkte?

In der Modellierung, Algorithmenentwicklung, Simulation und Optimierung. Wir nutzen dabei das ganze Spektrum der Mathematik und suchen uns problemgetrieben die am besten geeigneten Methoden zur Lösung aus: kontinuierliche und diskrete Methoden, algebraische und analytische Verfahren, numerische und stochastische Algorithmen. Wir sind dabei in fast allen Branchen aktiv. Basis ist der Querschnittscharakter der Mathematik. Eine bestimmte Art von Modell lässt sich etwa beim Gestalten von Funknetzen anwenden – und in ähnlicher Form, um den Stoffwechsel zu simulieren. Diese Vielseitigkeit macht unseren wirtschaftlichen Erfolg robust. Gerät eine Branche in Bedrängnis, sind wir noch gut in anderen Branchen unterwegs. Unser Kompetenzkern verändert sich nicht, die Forschungsthemen schon.

Inwiefern ändern sich die Themen?

Im Vordergrund stehen bei uns Themen für die klassischen Bereiche Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau, Pharma, Chemie, Medizintechnik, Erze, Eisen und Stahl. Daneben gibt es immer Hype-Themen, auf die wir Schwerpunkte setzen. Derzeit sind das etwa Big Data, Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen. Die Kompetenzen dafür sind

bei uns längst vorhanden, denn viele Hype-Themen sind nicht neu. So hieß Maschinelles Lernen vor 20 Jahren Neuronale Netze. Heute ermöglichen leistungsfähigere Rechner und neue Methoden andere und sehr erfolgreiche Ansätze wie Deep Learning. Das greifen wir in unseren Projekten auf.

Was sind derzeit Ihre größten Herausforderungen?

Für uns ist der Arbeitsmarkt die größte Herausforderung. Die Konkurrenz um kluge Köpfe nimmt ständig zu. Wir brauchen die klügsten Köpfe. Sie sind unser Potenzial, denn wir haben wenig Labore und Maschinen. Doch es ist schwer, kompetente und hochmotivierte Mitarbeiter zu bekommen. Daher investieren wir viel in die Förderung des eigenen Nachwuchses, etwa durch Stipendienprogramme. Eine andere wichtige Aufgabe ist es, unseren wirtschaftlichen Erfolg zu verstetigen. Er basiert nicht nur auf der Zusammenarbeit mit großen Unternehmen, sondern auch mit kleinen und mittelständischen Firmen. Sie tragen ein Drittel zu unseren Erträgen im Industriebereich bei. Wir arbeiten zudem intensiv mit Firmen aus der Region zusammen. Ein großer Teil unserer Erträge kommt allerdings aus dem Ausland. Da spüren wir die Globalisierung.

Welchen Stand hat das ITWM im internationalen Vergleich?

Vor etwa zwei Jahren hat uns ein Strategie-Audit attestiert: Das ITWM ist weltweit einzigartig. Es gibt kein anderes Institut, das in vergleichbarem Umfang und mit ähnlichem Erfolg technische Innovationen durch mathematische Forschungsergebnisse unterstützt und ermöglicht. Das ist ein Ritterschlag. Bei der Techno- und Wirtschaftsmathematik sind wir weltweit das größte Institut – beim Umfang der Projekte, der Zahl an Beschäftigten und der Diversität in den Anwendungsfeldern. Allgemein ist die angewandte Mathematik in Deutschland international hervorragend aufgestellt.

Das Institut gibt es seit 1995, seit 2001 ist es Teil der Fraunhofer-Gesellschaft. Was hat das bewirkt?

Wir hatten uns zum Ziel gesetzt, die Mathematik aus dem Elfenbeinturm herauszuholen und hinab in die Industrie zu tragen. Das ist uns in einem Umfang gelungen, den niemand für möglich gehalten hatte. Wir haben für 2018 einen Haushalt von 28 Millionen Euro, von denen über 50 Prozent aus Projekten mit der Industrie kommen. Das wird in der Community wahrgenommen. Auch in der Fraunhofer-Gesellschaft haben wir viel bewirkt: Da sind wir ein gefragter Kooperationspartner. Ob Mikro-technik, Materialien oder Produktion: Überall geht die Entwicklung hin zur Virtualisierung und Digitalisierung. Reale Prüfstände und Experimente werden durch Software ersetzt, reale Prozesse in digitalen Zwillingen abgebildet. Und da haben wir Kernkompetenzen – in Modellierung, Simulation und Optimierung. Das hat bei Fraunhofer zu einer besonderen Sichtbarkeit des ITWM geführt.

Wie ist die Einbettung in die Region?

In Kaiserslautern sind wir ein wesentlicher Teil der „Wissenschaftsmeile“, zu der neben zwei Fraunhofer-Instituten unter anderem die Technische Universität und eine Reihe von Instituten der Kaiserslauterer Science and Innovation Alliance gehören. Inzwischen gibt es auch etliche Unternehmen, die sich hier ansiedeln und gemeinsame Forschungsprojekte starten.

Da steht es sicher gut um die Berufsaussichten von Mathematikern?

Die sind exzellent. Mathematik-Absolventen sind in vielen Bereichen gefragt: in klassischen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen ebenso wie bei Versicherungen, Banken und an Universitäten oder in außeruniversitären Forschungsgesellschaften wie Max-Planck, Helmholtz und Fraunhofer.

Wie vermittelt die Schule jungen Menschen diese Perspektiven?

Leider läuft im Mathe-Unterricht vieles falsch. Ich glaube, dass die formale Seite, das Einüben von Techniken, dort nach wie vor zu stark im Vordergrund steht. Mathematische Inhalte werden kaum mit Bezug zur Realität vermittelt. Es könnte viel mehr mit Computern gearbeitet werden: mit spannenden Mathematik-Programmen, die auf das Niveau der Schüler zugeschnitten sind und das Fach anschaulich machen. Stattdessen gibt es die berühmt-berüchtigten Textaufgaben. Doch die sind wirklichkeitsfern und so konstruiert, dass jeder Schüler erkennt: Das hat nichts mit meinem Leben zu tun. Wie es besser geht, zeigen unsere Modellierungswochen.

Was verbirgt sich hinter den Modellierungswochen?

Dort bearbeiten Schüler der gymnasialen Oberstufe eine Woche lang Modellierungsaufgaben aus der Praxis. Wir stellen ihnen Probleme, die sich zum Teil aus der Forschung ergeben. Schüler und Lehrer bearbeiten die Aufgaben gemeinsam in Gruppen und präsentieren am Ende ihre Ergebnisse. Was wir oft hören, ist: „Das hätte ich nie gedacht, dass man Mathematik so praktisch anwenden kann.“ Diese Herangehensweise eröffnet einen neuen Blick auf das Fach. Das Entscheidende: Die Jugendlichen bekommen das Problem in der Sprache des Anwenders formuliert und nicht schon als mathematisches Problem. Daher müssen sie es zunächst in die Mathematik übersetzen.

Wie sehen die Aufgaben aus?

Vor ein paar Jahren fragten wir zum Beispiel nach Kriterien für ein optimales Trainingsprogramm eines Kugelstoßers, Entscheidungsmaßstäben für den optimalen Standort eines Einkaufszentrums, das Für und Wider zum Bau einer Ampelanlage auf Basis einer Verkehrszählung oder bei der Ermittlung der Beweglichkeit eines Beins bei künstlichen Hüftgelenken bestimmen. Dabei wird

nur das Thema vorgegeben. Die Schülerinnen und Schüler müssen überlegen, welche Mathematik, die sie kennen, dazu passt – und selbst ein Modell entwickeln.

Hat das Konzept Schule gemacht?

Es hat sich inzwischen zu einem Selbstläufer entwickelt. Modellierungswochen gibt es in vielen deutschen Bundesländern, ebenso in Südtirol. In einem etwas anderen Format finden sie auch in England und Australien statt. Doch seinen Ursprung hat das Konzept in Kaiserslautern, wo die Idee vor über 25 Jahren entstanden ist.

Welche Ziele hat das ITWM?

Wir sind konservativ optimistisch und sagen: Wir haben viel erreicht – und müssen zunächst Sorge tragen, dass das Erreichte erhalten bleibt. Dazu setzen wir auf die Gewinnung von Nachwuchs und den engen Kontakt zur Grundlagenforschung. Essenziell für uns, wie auch für alle anderen Fraunhofer-

Institute, ist die Attraktivität in der Wirtschaft. Die wollen wir sichern und ausbauen. Das Institut ist immer gewachsen und ich bin sicher: Das wird sich fortsetzen. Doch Wachstum ist kein Selbstzweck. Bei uns erfolgt es stets aus den Abteilungen und Bereichen heraus, wo Projekte erfolgreich laufen. Die Basis ist die Innovationskraft der Mathematik. Der Trend zur Digitalisierung hilft dabei. Er basiert auf Daten, Modellen und Algorithmen – und das können wir. Hype-Themen wie Big Data, Kognitive Robotik, Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen werden das Wachstum noch befeuern.

Wo wollen Sie künftig stehen?

Wir planen für die nächsten fünf Jahre mit 100 bis 200 neuen Arbeitsplätzen – ausschließlich in den bereits bestehenden Bereichen. Deshalb benötigen wir einen Neubau. Dazu sind wir in Gesprächen mit der Fraunhofer-Gesellschaft und dem Land Rheinland-Pfalz. ●



Vielfältig vernetzt

Erfolgreiche Forschung braucht ein stabiles Netzwerk und innovative Partner – das ITWM hat diese inner- und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Das mathematische Institut ist Mitglied im Fraunhofer-Verbund „IuK-Technologie“ sowie Gast im Verbund „Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS“. Die themenbezogenen Fraunhofer-Allianzen „Automobilproduktion“, „Batterien“, „Big Data“, „Cloud Computing“, „Leichtbau“, „Numerische Simulation von Produkten, Prozessen“, „Textil“, „Verkehr“ und „Vision“ sind weitere Knotenpunkte. Zudem ist das Fraunhofer ITWM an drei von vier Fraunhofer-Forschungsclustern beteiligt: Da geht es um kognitive Internet-technologien, programmierbare Materialien und zukunftsweisende Laserquellen. Die Beteiligung am Leistungszentrum Simulations- und Software-basierte Innovation und an der Science and Innovation Alliance Kaiserslautern stabilisiert den Transfer vor Ort – in Wissenschaft und Wirtschaft.



Sprungbrett für Spin-offs

Viele Innovationen des ITWM haben das Zeug zum kommerziellen Erfolg. Von Mitarbeitern gegründete Start-ups übernehmen dann Weiterentwicklung und Vertrieb

von Bernd Müller

An ein Ereignis erinnert sich Andreas Wiegmann, Geschäftsführer von Math2Market, noch gut: Vor einigen Jahren hatte sein Unternehmen einem Kunden die Simulationssoftware GeoDict angeboten. Doch den Zuschlag bekam ein Wettbewerber mit einem deutlich schlechteren Produkt. Einige Jahre später kehrte der Kunde reumütig zu Math2Market zurück und meinte: „Herr

Wiegmann, Sie haben damals einfach zu wenig versprochen.“ So sei das eben: „Die Konkurrenz verspricht das Blaue vom Himmel und wir sind zu bescheiden.“

Heute unterschätzt niemand mehr die junge Firma aus Kaiserslautern. Neben fleXstructures ist Math2Market eines der Vorzeige-Spin-offs des ITWM. Ausgründungen sind bei Fraunhofer gern gesehen, weil sie vielversprechende Entwicklungen

marktreif machen und mehr Energie in den Vertrieb stecken können. Im Fall von Math2Market mit vollem Erfolg: 2017 setzte man dort 2,5 Millionen Euro um, 2018 sollen es über 3 Millionen werden. Das jährliche Wachstum lag die letzten fünf Jahre immer über 30 Prozent.

Als Andreas Wiegmann 1999 an das ITWM kam, hatte er bereits einiges an Simulations-Know-how von seinen be-

◀ Andreas Wiegmann und sein Team von Math2Market machen mit der grafischen Benutzeroberfläche GeoDict die Struktur von Batterien oder Gestein fassbar.

ruflichen Stationen in Seattle und Berkeley im Gepäck. Auch am Institut gab es schon gute Software, sogenannte Solver, etwa um das Filtern von Öl aus Wasser zu berechnen. „Als Wissenschaftler schreibt man die Software für sich selbst, die Kollegen kommen damit oft nicht klar“, sagt Wiegmann. Doch Industriekunden haben andere Ansprüche: Sie wollen eine intuitive Benutzeroberfläche, die Algorithmen dahinter interessieren sie nicht. Aus dieser Erkenntnis entstand 2001 GeoDict: eine grafische Oberfläche für Programme des ITWM. „Damit haben wir die Software für einen großen Kreis nutzbar und die Entwicklung nachhaltig gemacht.“

Flexibler Ausstieg

GeoDict gedieh und bald war klar, dass die Weiterentwicklung allein im Institut nicht mehr zu stemmen war. 2011 gründete Wiegmann mit zwei Mitstreitern vom ITWM die Math2Market GmbH. Weil das Produkt ausgereift war und vom ersten Tag an Umsatz brachte, benötigten die Jungunternehmer kein Startkapital. Heute ist das Unternehmen mit mehr als 150 Kunden weltweit in mehreren Branchen erfolgreich. Mann + Hummel optimiert mit GeoDict seine Öl- und Luftfilter, Volkswagen die Elektroden von Batterien und Brennstoffzellen, Shell berechnet die Durchlässigkeit von Gesteinsproben für die Öl- und Gasförderung. Und das Institut für Verbundwerkstoffe in Kaiserslautern legt damit Faserverbundwerkstoffe aus.

Math2Market ist sein Lebenswerk, daran lässt Andreas Wiegmann keinen Zweifel. Auch weil trotz vieler Reisen und manchen 100-Stunden-Wochen genügend Freiraum für eigene Forschungsideen bleibt. Bei einem Kunden in Japan, der Drahtgewebe für Flugzeuge als Schutz gegen Blitzschläge herstellt, sei ihm eine Idee gekommen, wie man die Kontaktwiderstände in Drahtgeweben simulieren könne: „Auch wenn ich es nicht mehr selbst umsetze, habe ich doch noch viel mit Mathematik zu tun“, sagt der Unternehmer.



▲ Kabel und Schläuche haben es in sich: fleXstructures-Chef Oliver Hermanns erklärt, was sein Produkt alles kann.

Weitere Geschäftsideen gibt es genug. So steht seit Kurzem ein 3D-Drucker in der Firma. Damit will das Team testen, ob sich die im Rechner optimierten Materialien direkt ausdrucken lassen. Für die Kunden brächte das digitale Materiallabor eine enorme Zeitersparnis.

Biegen ohne Brechen

Diese verspricht seinen Kunden noch ein weiteres Unternehmen aus dem ITWM: fleXstructures ging 2012 an den Start. Die Vorgeschichte: 2004 haben Joachim Linn und Thomas Stephan mit zwei Kollegen des Fraunhofer Chalmers Research Centre for Industrial Mathematics FCC – einem Institut mit 50-prozentiger Fraunhofer-Beteiligung in Göteborg – mit der Entwicklung der Software IPS Cable Simulation begonnen, um das Verbiegen von Kabeln und Schläuchen zu simulieren. Das hilft Autoherstellern beim Planen der Verlegung von Bremsleitung und ABS-Datenleitung zwischen Karosserie und Rädern. Die Leitungen müssen lang genug sein, um Feder- und Lenkbewegungen mitzumachen – aber nicht zu lang, damit sie nicht durchhängen.

Als Fahrzeugtechnik-Ingenieur Oliver Hermanns 2007 ans ITWM kam, kannte er das Problem aus seiner Zeit in der Autoindustrie. Die von ITWM und FCC entwickelte Lösung war wie dafür geschaffen, es zu lösen. Den Sprung in die Selbststän-

digkeit musste Hermanns 2008 wegen der Wirtschaftskrise abblasen. Erst 2012 gelang die Ausgründung – allein und zuerst nur mit 20 Prozent seines Arbeitsvertrags. Doch nach einem halben Jahr war klar: Das Produkt schlägt ein. Hermanns verließ das ITWM. „Der Markt war beeindruckt“, sagt er. Laut Audi spart das Programm in der Verlegeplanung acht Monate.

Alle deutschen und viele ausländische Automobilhersteller – rund 80 Kunden – nutzen die Software. fleXstructures hat 17 Mitarbeiter und traumhafte Wachstumszahlen: im Schnitt 76 Prozent Umsatzplus pro Jahr. „Damit stehen wir in der Liste der 500 am schnellsten wachsenden Unternehmen in Deutschland“, sagt Hermanns. Anders als Math2Market, das die ITWM-Technik gekauft hat und über zehn Jahre abbezahlt, bekommen ITWM und FCC einen Teil der Lizenzeinnahmen aus Verkauf und Wartungsverträgen. Haben Kunden Probleme oder Wünsche, spielt sie die Firma ans Institut zurück, und man legt gemeinsam die Entwicklungsstrategie fest.

fleXstructures vertreibt weitere Module von ITWM und FCC: etwa ein Tool zur Bewegungsplanung von Robotern und eines, das Fabrikplanern bei der ergonomischen Auslegung von Arbeitsplätzen hilft. „Wo Fraunhofer mit Forschung und Entwicklung aufhört, beginnen wir mit Marketing, Verkauf, Engineering und Training für Industriekunden“, sagt Hermanns. ●



Formel Grün

Die Energiewende stellt Stromanbieter, Stadtwerke, Netzbetreiber und Technikentwickler vor neue Aufgaben, die sich nur mithilfe der Mathematik bestmöglich lösen lassen

von Frank Frick

Eine Überschrift in der Sächsischen Zeitung vom 9. Juli 2015 behauptet: „Erneuerbare Energien sind unberechenbar.“ Wörtlich genommen, hieße das: Es ist sinnlos, dass sich Mathematiker und Informatiker mit dem Strom beschäftigen, den Windkraft- und Solaranlagen produzieren. Doch die Realität ist eine völ-

lig andere: Hochqualifizierte Rechen- und Programmierkünstler sind unerlässlich, um die Energiewende intelligent umzusetzen – und so zum Erfolg zu führen.

Um diese Behauptung nachvollziehen zu können, muss man einige Besonderheiten der Ware Strom kennen. Der Handel damit erfolgt überwiegend an der Börse

und ist geprägt davon, dass Stromproduktion und Stromverbrauch zur gleichen Zeit stattfinden müssen. Am sogenannten Terminmarkt einigen sich die Handelspartner Jahre oder Monate, bevor der Strom überhaupt erzeugt wird, auf einen Preis dafür: Der Produzent liefert einem Stadtwerk oder einem anderen Kunden

◀ Bei der Versorgung von Haushalten, Fabriken und E-Autos hängt alles zusammen. Mathematiker wie Matthias Klein und Tina Hill machen das System handhabbar.

etwa über das ganze kommende Kalenderjahr hinweg in jeder Viertelstunde die gleiche Leistung. Der Kunde kauft Strom so weit im Voraus, um sich abzusichern, dass er den Strom für die besonders nachgefragten Zeiten später nicht kurzfristig und extrem teuer einkaufen muss. Umgekehrt trägt er aber auch das Risiko, dass der Strom später billiger zu haben ist, als es Monate im Voraus abzusehen war.

Einen Tag voraus

Neben dem Terminmarkt gibt es den Spotmarkt. Dort wird Strom im sogenannten Day-Ahead-Handel einen Tag vor seiner Lieferung verkauft. Dabei schließen Stromproduzent und Abnehmer um 12 Uhr durch Gebot und Zuschlag Geschäfte, wobei alle 24 Stunden des Folgetags separat gehandelt werden. Außerdem kann im Intraday-Handel auch Strom im Viertelstunden-Takt feilgeboten werden, wobei die Verträge spätestens eine halbe Stunde vor Lieferbeginn geschlossen sein müssen.

„Wir entwickeln Rechenmodelle, die ein Stadtwerk oder einen anderen Energieversorger möglichst gut darüber informieren, wie groß sein finanzielles Risiko beim Handel im Termin- oder Spotmarkt ist“, erklärt Andreas Wagner. Der Leiter der Abteilung Finanzmathematik am Fraunhofer ITWM betont, dass die Modelle nicht den Strompreis voraussagen: „Wir gehen vom durchschnittlichen Marktpreis aus und simulieren, wie wahrscheinlich spätere Abweichungen davon sind.“

Energieversorger setzen die Fraunhofer-Software also nicht ein, um Handelsgeschäfte zu veranlassen und Geld zu verdienen. Stattdessen ermitteln sie damit beispielsweise, ob es aufgrund eines Stromeinkaufs und einer späteren ungünstigen Marktentwicklung dazu kommen kann, dass die Reserven frei verfügbaren Geldes nicht fürs Bezahlen ausreichen.

Die Modelle der Fraunhofer-Finanzmathematiker beziehen dabei auch die Risiken mit ein, die bei herkömmlichen Rechenverfahren außer Acht gelassen

werden. Dazu zählt zum Beispiel das Risiko, dass ein großes konventionelles Kraftwerk ausfällt – mit der Folge, dass das Stromangebot deutlich sinkt und der Preis steigt. Die Modelle kalkulieren zudem den Strom ein, den Solar- und Windkraftanlagen erzeugen. „Wenn man unsere Software einsetzt, kann zwar beim Handeln mit Strom immer noch etwas schief laufen – aber zumindest kennt man sehr gut die Risiken, die man einght“, sagt Wagner.

Wurde am Termin- und am Spotmarkt ein großer Anteil des Stroms gehandelt, der zu einem bestimmten Zeitpunkt produziert und verbraucht wird, spricht das für eine günstige und zugleich sichere Stromversorgung der Konsumenten. Doch es besteht jederzeit die Möglichkeit, dass irgendwo die stromfressenden Anlagen eines großen Industriebetriebs ausfallen oder unerwartet Wind aufkommt.

Spontankäufe am Energiemarkt

Dann müssen die Betreiber des Stromnetzes in der Lage sein, die resultierende Schwankung im Netz auszugleichen. Sie kaufen daher unter anderem bei Kraftwerksbetreibern und großen Stromverbrauchern sogenannte Regelenergie ein, mit deren Hilfe sich die Netzfrequenz

innerhalb von Sekunden, fünf Minuten oder einer Viertelstunde regeln lässt. Negative Regelenergie wird nötig, wenn sehr schnell weniger Strom in die Netze eingespeist werden darf oder mehr Strom verbraucht werden muss – positive Regelenergie bei der gegenteiligen Situation. Teilnehmer am Regelenergiemarkt bekommen allein schon für ihre Bereitschaft, im Notfall einzuspringen, eine Vergütung. Letztlich verteuert das den Strom für die Verbraucher.

Schluss mit zeitraubenden Tests

Zu denjenigen Komponenten, die negative Regelenergie bereitstellen können, zählen Batteriespeicher. Neben Blei-Akkus ist die Lithium-Ionen-Technik weit verbreitet, die sich auch in Elektrofahrzeugen durchgesetzt hat. Die Software BEST des ITWM ist ein wertvolles Werkzeug, um diese Technik weiterzuentwickeln. Mit BEST (Battery and Electrochemistry Simulation Tool) lässt sich am Computer vorhersagen, welche Folgen es für die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Batterie hat, wenn etwa die Geometrie, die Schichtdicke der Komponenten oder die mikroskopische Struktur der Elektroden geändert werden. Dadurch lassen sich zeitraubende Experimente einsparen. „Außerdem helfen Simulationen,



▲ Die Expertise von Finanzmathematikern wie Andreas Wagner ist in der Energiewirtschaft gefragt.

im Wechselspiel mit Experiment und Theorie bislang unklare Effekte und Mechanismen in Batterien besser zu verstehen“, sagt ITWM-Wissenschaftler Jochen Zausch, einer der Entwickler von BEST.

Ein kleiner Kasten hat es in sich

Batteriespeicher in Gebäuden können dazu beitragen, die Schwankungen im Stromnetz auszugleichen, die von Solaranlagen auf den Hausdächern hervorgerufen werden. „Gesteuert durch moderne Informationstechnik, kann die Vor-Ort-Zusammenschaltung von Solaranlagen und Speichern außerdem bewirken, dass weniger Strom über weite Strecken transportiert werden muss“, sagt Matthias Klein vom ITWM.

Er gehört zu den Fraunhofer-Wissenschaftlern, die in den letzten Jahren Schritt für Schritt ein Konzept namens „myPowerGrid Software Ecosystem“ umgesetzt haben. Zentraler Bestandteil ist ein kleiner Kasten mit einer Vielzahl von Buchsen, der entfernt einem WLAN-Router ähnelt. Tatsächlich handelt es sich um ein Energiemanagementsystem, ausgestattet mit einer Software, die am ITWM entwickelt wurde. Das Kästchen, von den Forschern in Kaiserslautern „Amperix“ genannt, erfasst einerseits den Energieverbrauch eines Haushal-

tes oder eines Unternehmens sowie die Stromproduktion der angeschlossenen Solaranlage und übermittelt diese Daten an eine Web-Plattform. Andererseits kann es einen Energiespeicher im Gebäude oder die Batterie eines Elektroautos in der Garage gezielt laden oder entladen. So kann Amperix Strom, den die Photovoltaik-Anlage erzeugt, möglichst vorteilhaft auf die stromverbrauchenden Geräte und den Hausspeicher verteilen. Wird auch das Elektroauto in das System einbezogen, koppelt Amperix sogar die Stromerzeugung mit dem Verkehrssektor und trägt so dazu bei, dessen CO₂-Bilanz zu verbessern.

„Doch das ist nur der erste Schritt. Der zweite besteht darin, die verteilten Solarstromspeicher auf einer Internet-Plattform zu vereinigen, damit sie als Pool Energiedienstleistungen erbringen“, erklärt Matthias Klein. So kann der Pool beispielsweise den Netzbetreibern Regelleistung zur Verfügung stellen.

Vielfältige Perspektiven

Die Internet-Plattform myPowerGrid bietet verschiedene Ansichten: Kunden werden über Stromerzeugung, Verbrauch und Speichernutzung informiert, während etwa Techniker mithilfe der Plattform auf Fehlersuche gehen können. Sie leistet aber noch mehr: myPowerGrid kommuniziert

mit Amperix und sendet ihm Prognosen über die Stromerzeugung und den Verbrauch. Der elektronische Energiemanager kann diese Vorhersagen benutzen, um die angeschlossenen Speicher noch netzdienlicher zu steuern.

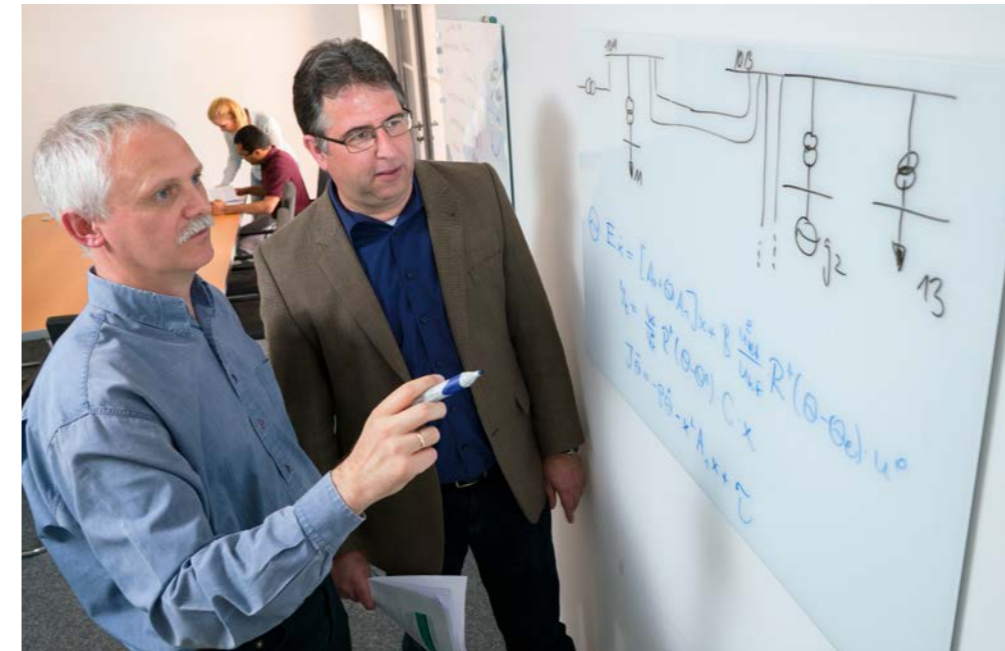
Simple Prognosen fürs Dach

Plattform und Energiemanager können dabei auch auf Vorhersagen darüber zugreifen, wieviel Strom die Photovoltaik-Anlage auf dem Hausdach produzieren wird – zum Beispiel am nächsten Tag zwischen 16 und 17 Uhr. Denn zum myPowerGrid-Ecosystem gehört ein entsprechender Web-Service, der vom ITWM entwickelt wurde. Das Besondere: Außer dem Standort des Hausdachs benötigt der Service keinerlei Angaben – weder über den Aufbau der Anlage oder die Ausrichtung der Module, noch über zeitweilige Verschmutzungen. Denn durch sogenanntes maschinelles Lernen ermittelt der Service automatisch die charakteristischen Eigenschaften der Anlage und kann dann aus Wetterprognosen die zu erwartende Stromproduktion vorhersagen.

„Das myPowerGrid Software-Ecosystem ermöglicht ganz neue Geschäftsmodelle“, freut sich Matthias Klein. So könnten etwa Stadtwerke statt der Hausbesitzer Photovoltaik-Anlagen samt zugehörigen Speichern bezahlen und betreiben. Die Komponenten könnten sie zusammenschalten und so ein dezentrales Solarspeicherkraftwerk aufbauen. Die Hausbesitzer würden in längeren, sonnenarmen Zeiten von verbilligten Stromlieferungen profitieren. Und die Stadtwerke wären in der Lage, ihren Kunden regionalen „Grünstrom“ anzubieten.

„Doch trotz einer lokalen Optimierung braucht man immer auch eine koordinierte Steuerung des gesamten Stromnetzes“, sagt Andreas Wirsen, Leiter der Abteilung

◀ Die E-Mobilität stellt hohe Anforderungen an Batterien. Simulationen helfen, die Performance möglicher neuer Zellen zu beurteilen und ihre Mikroigenschaften zu verstehen. Daran arbeitet Jochen Zausch in Projekten um die Software BEST.



◀ Anregende Diskussion: Jan Mohring (links) und Andreas Wirsen gehören zum Team von MathEnergy. Ziel des Projekts ist die Erstellung einer Softwarebibliothek, die das Gas- und Stromnetz Deutschlands komplett abbildet.

Systemsteuerung, Prognose und Regelung des ITWM. „Denn wenn etwa die Stromfrequenz im Übertragungsnetz sinkt und alle lokalen Akteure auf gleiche Weise gesteuert, würden sich die Instabilitäten sehr rasch aufschaukeln.“

Netzsimulation im Paket

Wirsen gehört zu einem Team des ITWM, das im Projekt „MathEnergy“ mit einem Konsortium aus wissenschaftlichen Institutionen und Unternehmen zusammenarbeitet. Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wollen die Partner bis 2020 ein Software-Paket erstellen, das es erlaubt, das Strom- und Gasnetz Deutschlands auf allen Ebenen zu simulieren und zu steuern.

Somit werden die Transport- und die Verteilnetze für Strom einbezogen, aber auch deren Kopplung mit dem Gasnetz, beispielsweise über die Power-to-Gas-Technik. Sie kann überschüssigen Wind- oder Solarstrom in brennbares Gas – zum Beispiel Wasserstoff oder Methan – umwandeln und so Energie speichern. Zu den speziellen Aufgaben der Wissenschaftler am ITWM gehört es, die Modelle zur Netzsimulation so zu verdichten, dass sie sich während einer Regelung in Echtzeit durchrechnen lassen.

Zum Ausgleich von Schwankungen im Stromnetz, die durch Windkraft- und Solaranlagen hervorgerufen werden, gibt es neben dezentralen Batteriespeichern

in Häusern oder virtuellen Großbatterien weitere Möglichkeiten. Bestimmte Speichertechniken bieten prinzipiell eine große Kapazität und gehen zudem noch ein weiteres Problem an: Werden zugleich Kohle, Öl und Gas zum Heizen oder fossile Kraftstoffe für den Verkehr verwendet und dadurch riesige CO₂-Mengen ausgestoßen, kann Grünstrom allein den Klimawandel kaum aufhalten. Insofern sind Konzepte gefragt, die es erlauben, Wärmeenergie und Verkehr durch eine Kopplung mit der Stromversorgung klimafreundlicher zu gestalten. Power-to-Gas ist eine solche Technik, doch mithilfe von Simulationen und Informationstechnik können auch Fernwärmenetze Regelleistung für den Strommarkt bereitstellen und so die Verbindung der verschiedenen Nutzungsfelder von Energie herstellen.

Fernwärmenetze gibt es in vielen Städten. Zentrale Komponente ist ein Heizkraftwerk. Es kann beispielsweise aus dem Dampf einer Müllverbrennungsanlage gleichzeitig Strom erzeugen und Wärme auf den Wasserkreislauf des Fernwärmenetzes übertragen. Dabei lässt sich das Verhältnis zwischen Stromproduktion und Wärmeabgabe innerhalb einer großen Bandbreite verändern.

Das lässt sich nutzen, indem man etwa in Zeiten hoher Windstrom-Produktion die Stellschrauben des Fernheizkraftwerkes in Richtung Wärme dreht. Moderne Fernwärmenetze haben auch „Power-to-

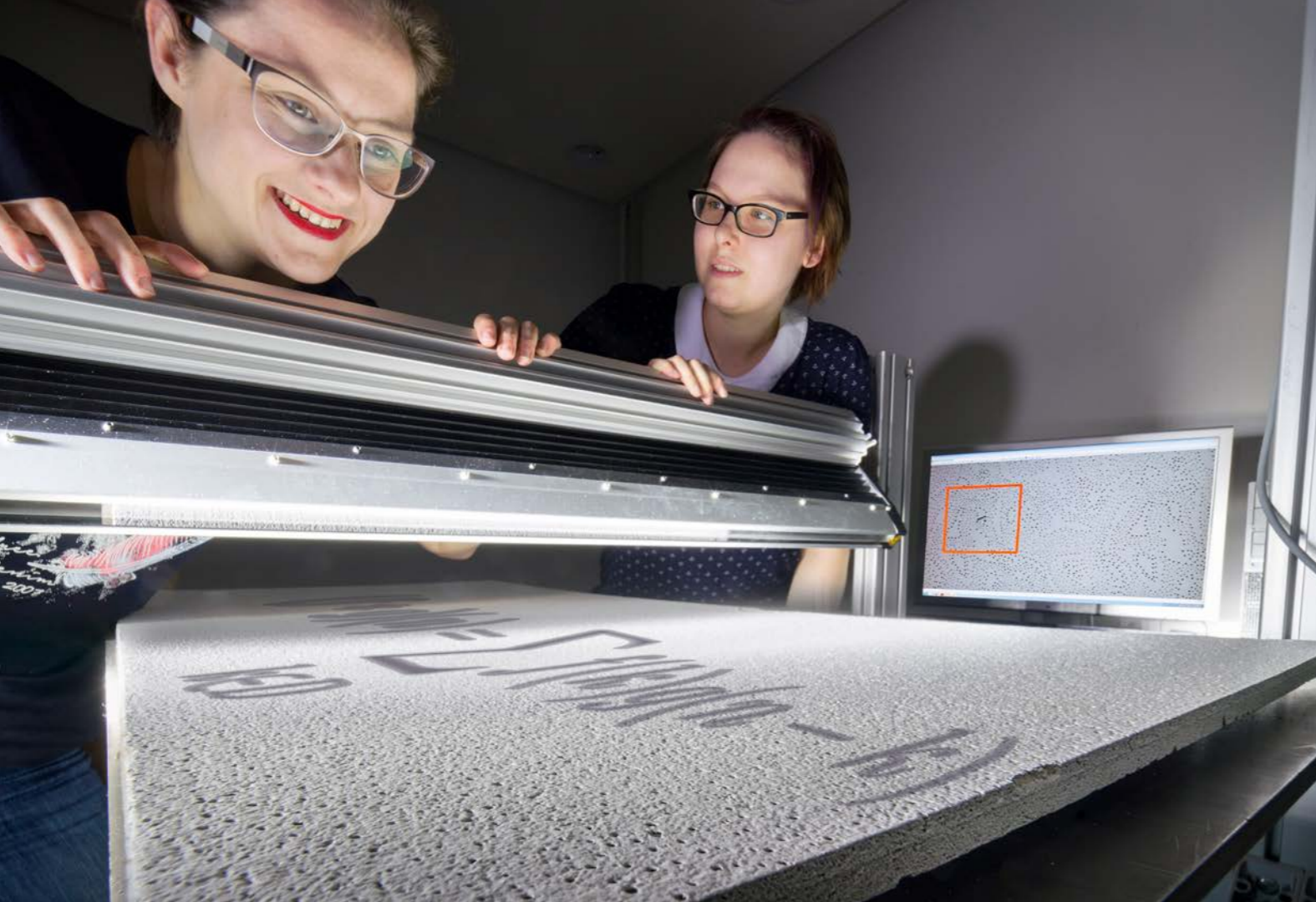
Heat-Anlagen“. Das sind gleichsam überdimensionierte Tauchsieder. Sie können mit Überschussstrom das Wasser im Netz erwärmen. Bislang werden Fernwärmenetze überwiegend so betrieben, dass entweder die Wassertemperatur oder die Fließgeschwindigkeit an einem bestimmten Ort immer weitgehend gleich bleiben.

Modelle verdichten

„Im Projekt DYNEEF entwickeln wir einen Software-Assistenten, mit dem sich der Betriebszustand der Komponenten eines Fernwärmenetzes intelligent variieren lässt“, sagt Jan Mohring vom ITWM. Auf diese Weise kann dann das Fernwärmenetz dem Stromnetz als Speicher dienen. „Sinnvoll steuern lässt sich der Betriebszustand des Fernwärmenetzes allerdings nur, wenn man ihn dynamisch simulieren kann“, erklärt Mohring. Ähnlich wie beim Projekt MathEnergy müssen er und sein Team die Modelle zur Netzsimulation verdichten, um so Rechenzeit einzusparen – nur, dass es eben nicht um das Stromnetz geht, sondern um das Fernwärmenetz.

An einem kleinen Teilnetz haben die Wissenschaftler aus Kaiserslautern bereits gezeigt, dass sie den Betrieb mit ihrer Software erfolgreich optimieren können. Die Mathematiker und Informatiker des ITWM helfen somit auf vielfältige Weise, unsere Energieversorgung auf „grün“ umzustellen. ●





Kampf den Kratzern

Bildverarbeitung findet Schäden, wo das menschliche Auge passen muss. Die beste Erkennungssoftware kommt vom ITWM

von Bernd Müller

Eine Platte für die Deckenverkleidung: weiß, glatt, perfekt – auf den ersten Blick. „Schauen Sie mal hier“, sagt Markus Rauhut und dreht die Platte schräg gegen das Licht. Der zarte Schatten eines feinen Risses wird sichtbar. Ein Mensch hätte den Kratzer vermutlich nicht entdeckt. Hier kommen die Methoden von Rauhuts Abteilung für Bildverarbeitung zum Einsatz. Sie beschäftigt sich mit optischer Qualitätskontrolle, die überall dort zum Einsatz kommt, wo Men-

schen zu unzuverlässig oder langsam sind oder wo die Arbeitsbedingungen der Gesundheit schaden. Das Prinzip ist einfach: Kameras schießen Fotos des Prüflings und eine Software sucht in den Aufnahmen Abweichungen von der Oberflächenstruktur, die auf Kratzer oder Risse schließen lassen. Die sind im günstigsten Fall nur ein optischer Mangel, doch im schlimmsten Fall können sie auch Menschenleben kosten.

Im Keller testen die Forscher neue Anlagen und bauen sie für Kunden fix und

fertig auf, samt Tragrahmen, Kameras, Beleuchtung, Verkabelung und Elektronik. So entstehen zwei oder drei Anlagen pro Jahr. Benötigt ein Kunde mehr, vergibt das ITWM den Auftrag an Betriebe in der Region. Was für andere Fraunhofer-Institute selbstverständlich ist – das Ausprobieren des realen Produkts im Labor – ist für die Mathematiker, Physiker, Informatiker und Ingenieure in Kaiserslautern recht ungewöhnlich. Am Institut entwickeln sie meist Algorithmen, um die reale Welt zu simu-

lieren. Rauhuts Abteilung ist eine der wenigen, die sich die Realität ins Haus holt.

Doch Kernkompetenz sind und bleiben Mathematik und Modellieren, etwa von Produktionsprozessen im Computer. Das Alleinstellungsmerkmal ist dabei das fundierte mathematische Know-how. Rauhut sieht sein Team deshalb auch nicht als Konkurrenz zu kommerziellen Software-Anbietern. „Die Kunden kommen erst zu uns, wenn es auf dem Markt keine für sie brauchbare Lösung gibt“, sagt er.

Den Kunden verstehen

Beispielsweise die Odenwaldwerke: Der Betrieb in Amorbach stellt jene Deckenplatten her, die im Labor inspiziert werden. Bevor es an die Mathematik ging, betrieb Rauhuts Team erst einmal „Social Engineering beim Kunden“, wie der Abteilungsleiter es nennt. Was ist euer Problem? Wie findet ihr Fehler? Wie sollte eine ideale Lösung aussehen? Diese Fragen besprechen die Experten mit dem Management und mit den Mitarbeitern in der Produktion. Erst danach geht es ans maßgeschneiderte Konzept und an die Umsetzung.

Dafür ist profundes Wissen über Betriebsprozesse und Algorithmen gefragt. Auf einer glatten weißen Platte ist die Gestalt eines dunklen Risses (lang und dünn) oder einer Bohrung (kreisförmig) zu erkennen. „Das können andere auch“, sagt Rauhut. Schwierig werde es, wenn die Oberfläche eine Textur hat, etwa Holz. Einen Riss von der natürlichen Maserung zu unterscheiden, erfordert komplexe Algorithmen und gutes Bildmaterial. Wichtig ist dabei die Beleuchtung, die von verschiedenen Seiten kommen sollte, um deutliche Kontraste zu erzeugen. Man kennt das vom Kratzer im Autolack. Den sieht man oft erst, wenn die Sonne schräg darauf scheint und man seitlich aufs Blech schaut.

Den Auftrag der Odenwaldwerke hat das Team mit Bravour erfüllt. Mehrere Kameras für sichtbares und infrarotes Licht schießen in rasantem Tempo Fotos von den Platten, die darunter auf einem Fließband mit einem Tempo von bis zu 40 Metern pro Minute durchfahren. Dann tritt der Algorithmus in Aktion und erkennt Abweichungen, die nicht auf diese Oberfläche gehören.

Was erlaubt ist und was nicht, lernt die Software mit der Zeit selbst. Dazu füttert

man sie mit Bildern, in denen Kratzer markiert sind – mühsame Handarbeit, die bisher ein Mensch erledigen musste und die Monate dauern kann. Schneller geht es mit einer zweiten Software, die Kratzer nach einem physikalischen Modell simuliert und in den Erkennungsalgorithmus speist. Obwohl dieser an künstlich erzeugten Fotos trainiert, liegt die Erkennungsrate bei fast 100 Prozent.

Weil die mathematischen Methoden universell sind, sind sie auch für andere Branchen interessant. Im Labor der Abteilung entsteht gerade ein Messplatz, an dem Bremsscheiben für einen Automobilzulieferer untersucht werden. Auch da haben die Kameras feine Risse und Absplitterungen an den Kanten im Visier, die aber noch schwerer zu entdecken sind. Möglich ist das nur, wenn die Beleuchtung aus vielen Richtungen kommt.

Dafür sorgen zwei Roboterarme mit Leuchten, die in Windeseile um die sich drehende Bremsscheibe herum schwenken, während die beiden Kameras unablässig Bilder schießen. 30 Sekunden darf das dauern, dann muss die Entscheidung „Gut oder Ausschuss“ feststehen. Obwohl die Computer immer schneller werden, ist die Rechenzeit immer noch der limitierende Faktor, sagt Rauhut. „Denn auch die Produktionsprozesse werden schneller.“

Wärmestrahlung aus dem Rad

Ein älteres Beispiel ist ein Stück Bahnschienen mit angedeuteten Schwellen, montiert auf einem Gestell. Auf einer Schwelle ist ein Stahlkästchen angebracht. Fährt ein Zug darüber, schwenkt ein Deckel zur Seite und ein Infrarotsensor nimmt die Wärmestrahlung des Rades auf. Seit 1996 wird die automatische Fahrwerküberwachung eingesetzt. Früher kam es an steilen Abfahrten immer wieder zu Waldbränden durch überhitzte Bremsen an Zugwaggons. Die ITWM-Software FUES erkennt die Hitze am Rad und warnt den Lokführer.

Kurios war die Anfrage eines Sanitärkeramikherstellers. Seine Kunden haben oft das Problem, zu ihrer Toilettenschüssel den richtigen Sitz zu finden. Die Idee: Der Kunde fotografiert die Schüssel und eine App schlägt per Bilderkennung den passenden Sitz vor. Der Algorithmus funktionierte, doch die App nicht so gut, weil die Kunden meist nur die Schüssel, aber nicht deren Abstand zur Wand fotografierten. ●



Blitzhilfe bei Beben

ITWM-Forscher Markus Rauhut über Projekte der Katastrophenhilfe

Sie engagieren sich humanitär. Wie kam es dazu?

Mich haben Leute vom World Food Programme angesprochen. Sie haben die Herausforderung, nach einem Erdbeben oder anderen Naturkatastrophen Hilfe möglichst effektiv zu organisieren. Allerdings wissen die Helfer oft nicht, wohin sie zuerst ausrücken sollen.

Was konnten Sie tun?

Wir haben eine Lösung entwickelt, bei der Drohnen über das betroffene Gebiet fliegen. Unsere Software erkennt dann automatisch, wo und wie viele Häuser und Straßen zerstört sind. Damit können die Einsatzkräfte besser planen.

Wie finanzieren Sie die Arbeit?

Ich tingele durchs Land und versuche Mittel einzuwerben. Wir wollen nur die Entwicklungskosten decken, verdienen wollen wir nicht daran. Die Fraunhofer-Stiftung unterstützt uns auch dabei. Wir planen, diese Art der Projekte für humanitäre Hilfe auszubauen, andere Fraunhofer-Institute haben bereits ähnliche Projekte.

Tiefblick mit Terahertz

Langwellige Strahlung hat großes Potenzial für die Werkstoffprüfung. Am Anwendungszentrum TeraTec können Firmen erste Erfahrungen mit der noch jungen Terahertztechnik sammeln

von Bernd Müller

Hände hoch! Reisende kommen sich am Sicherheitscheck am Flughafen heutzutage vor wie der Revolverheld im Western. Breitbeinig und mit erhobenen Händen steht man kurz still in einer verglasten Röhre. Oder neuerdings zwischen zwei dicken Wänden. Beide senden eine unsichtbare elektromagnetische Strahlung aus, die verdächtige Gegenstände unter der Kleidung aufspürt. Fälschlicherweise als Nacktscanner tituliert, hatte die sogenannte Terahertztechnik keinen guten Start ins öffentliche Bewusstsein.

Hype am Flughafen

Georg von Freyermann runzelt die Stirn und klärt auf: „Eigentlich ist das ja gar keine Terahertzstrahlung.“ Denn ihr Spektrum reiche von 0,1 bis 10 Terahertz und liege damit zwischen Mikrowellen und sichtbarem Licht – die Scanner am Flughafen arbeiteten dagegen mit niedrigerer Frequenz. Auch der Hype, der seit etwa zehn Jahren um die Technologie gemacht wird, ist dem Leiter des Zentrums für Materialcharakterisierung und -prüfung am ITWM und Professor an der Technischen Universität Kaiserslautern unangenehm. „Es wurde zunächst viel versprochen, aber wenig gehalten“, sagt von Freyermann

Das ist bei einer neuen Technik nicht ungewöhnlich: Nach dem Hype kommt die Ernüchterung. Doch Georg von Freyermann ist überzeugt: In der Terahertztechnik steckt viel Potenzial. Die Strahlung dringt in Materialien ein und macht un-

sichtbare Defekte sichtbar. In leitfähige Materialien dringt sie dagegen nicht ein – und vor allem auch nicht in Wasser. Daher eignet sie sich gut für die Messung des Feuchtegehalts. Aufgrund der sehr niedrigen Energie verändert die Terahertzstrahlung Zellen nicht. Für Menschen ist sie deshalb unschädlich.

Dass nun Anwendungen marktreif werden, ist auch Georg von Freyermann Hartnäckigkeit zu verdanken. Und dem Anwendungszentrum TeraTec. Dieses erstellt Machbarkeitsstudien für interessierte Firmen, die dort zwanglos erste Erfahrungen mit der Technik sammeln können. Bei Projekten mit hoher Geheimhaltung ist das auch getrennt von anderen Laboreinrichtungen möglich. Das ITWM-Team unterstützt die Unternehmen von der Konzeption bis zum Komplettsystem, das fertig ist für den Einbau in der Produktion oder Qualitätssicherung. Für einen großen Autohersteller entwickelt und testet das Anwendungszentrum eine Anlage zur Bestimmung der Dicke von Lackschichten.

Lack-Check am Kotflügel

Und wo ist die Mathematik? „Die steckt im Auswertalgorithmus“, sagt von Freyermann. Der Algorithmus hat einiges an Arbeit, denn die Echos, die der Lack zurückwirft, sind nur schwer auseinanderzuhalten – schließlich tragen Kotflügel und Co heute bis zu vier Lackschichten. Jahrelange Erfahrung ist nötig, um das Verhalten der Terahertzwellen beim Auftreffen auf die Grenzflächen der Schichten

richtig zu interpretieren. Das geht heute blitzschnell: Nur eine Zehntelsekunde braucht der Computer, um aus den Echos die Schichtdicken zu errechnen – für einen Punkt. Um eine komplette Karosserie zu vermessen, sollten es nicht weniger als 70 Messpunkte sein. Ein Roboterarm fährt den Terahertzsensor dazu behände über das Karosserieteil. Insgesamt dauert die gesamte Messung weniger als zwei Minuten.

Eine Spezialität der Abteilung ist die zerstörungsfreie Prüfung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen. Die kommen immer häufiger in Flugzeugen oder Autos zum Einsatz, um das Gewicht zu reduzieren. Sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren spürt die Terahertzstrahlung Defekte auf – etwa Fremdkörper oder Stellen, wo sich Fasern und Harz beim Laminieren nicht ordentlich verbunden haben. Was die Technologie kann, zeigt Georg von Freyermann an einer Platte aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

Fürs Auge sieht die Platte perfekt aus, doch die Messdaten auf dem Bildschirm offenbaren in der Tiefe jede Menge Lücken, die absichtlich dort eingebracht wurden. Für die schnelle Prüfung hat die Abteilung ein Radarsystem entwickelt, das ein Dutzend Terahertz-Sender und -Empfänger vereint, die simultan bei unterschiedlichen Frequenzen arbeiten.

Die Terahertztechnik stehe erst am Anfang ihrer Entwicklung, meint Georg von Freyermann. „Flugzeugnasen prüfen oder chemische Substanzen analysieren – die Anwendungen dafür sind vielfältig.“ ●

Der Riester-Check

Welche Altersvorsorge passt zu mir?

Finanzmathematiker des ITWM berechnen das mit Simulationen

von Bernd Müller

Die Rente reicht nicht. Diese ernüchternde Nachricht trifft immer mehr Menschen, obwohl sie fleißig in die Rentenkasse eingezahlt haben. Die Versicherungsbranche nennt das „Rentenlücke“ und hat daraus ein gutes Geschäft gemacht – für die Branche, aber

nicht für die Versicherten. Die Riester-Rente – eingeführt 2002 vom damaligen Arbeitsminister Walter Riester – versprach, die Rentenlücke zu stopfen. Nachdem die Zahl der Riester-Verträge in den ersten Jahren noch rasant zugenommen hat, stagniert sie seit drei Jahren bei knapp 17

Millionen. Ein Grund sind Medienberichte, wonach die Rendite geringer ausfallen könnte als gedacht, bei manchen Verträgen könnte sie sogar bei null liegen.

Ziffern gegen die Verunsicherung

Um die Verunsicherung der Versicherten zu mildern, hat das Bundesfinanzministerium 2015 eine Klassifizierung für Riester-Verträge eingeführt, von 1 wie risikoarm bis 5 wie risikoreich. Dabei bedeutet ein geringes Risiko in der Regel auch eine niedrige Rendite und umgekehrt. Seit Januar 2017 muss jedes Riester-Produkt seine Klassifizierung in einem standardisierten Informationsblatt nachweisen. Damit können Interessierte abschätzen, wie sich ein Vertrag entwickeln wird, wenn man zum Beispiel monatlich 100 Euro anlegt und wie hoch das Vermögen zum Vertragsende sein wird. „Es ist wichtig, in die Debatte rund um die Riester-Rente wieder mehr Vernunft zu bringen“, befand Andrea Nahles (SPD). „Die Chance-Risiko-Klassifizierung bietet dem Verbraucher mehr Transparenz, Orientierung und eine Entscheidungsgrundlage in dieser komplizierten Materie.“

Die damalige Bundesministerin für Arbeit und Soziales fand die Materie offenbar selbst so kompliziert, dass sie im August 2016 das ITWM besuchte und sich über die Risikoklassifizierung informierte. Das Institut hatte sich bei der Bewerbung um die Produktinformationsstelle Altersvorsorge (PIA), die die Klassifizierung vornimmt, durchgesetzt.

Zu diesem Zweck wurde eigens eine gemeinnützige Gesellschaft gegründet: die Produktinformationsstelle Altersvorsorge gGmbH. Das ITWM arbeitet als Dienstleister zu, beide sind unternehmerisch völlig getrennt – nicht allerdings räumlich. Die drei Mitarbeiter der PIA sitzen Tür an Tür mit ihren Kollegen der Abteilung Finanzmathematik, die ständig damit beschäftigt sind, die Risikoklassen für alte und neue Riester-Produkte zu berechnen. Bis 2020 läuft der Vertrag mit dem Ministerium, er kann aber um fünf Jahre verlängert werden.

Welches Riester-Produkt ist nun das Beste? Dass es darauf keine Antwort gibt, verdeutlicht ein Schaubild, das Risiko und Rendite gegenüberstellt. Es ist mit Hunderten Punkten übersät. Jeder Punkt steht für einen Riester-Tarif. Allerdings sind die Punkte nicht beschriftet und man erfährt nicht, welcher Versicherer sich dahinter verbirgt. „Das ist Absicht“, sagt Andreas Wagner, Leiter der Abteilung Finanzmathematik am ITWM. So solle Verwirrung bei den Versicherten vermieden werden. PIA kommuniziere allein die Risikoklassi-

fizierung und gebe keine konkreten Tipps zur Auswahl eines Produkts.

Wesentlich konkreter sind Testberichte, die regelmäßig in Verbrauchermedien zu finden sind. Sie gaukeln den Lesern vor, es gebe die eine Berechnungsmethode, die die Ablauleistung eines Vertrags auf Heller und Pfennig vorhersagen kann. Doch das ist nicht der Fall, denn Wirtschaft, Märkte, Finanzen, Inflation und Anlagestrategien ändern sich laufend. Und wer weiß schon, was in 30 Jahren sein wird? Um die Unsicherheit zu mindern, rechnen die Finanzmathematiker für jedes Riester-Produkt 10 000 Szenarien mittels stochastischer Differentialgleichungen durch. Ein aufwendiges Bewertungsverfahren führt zu einem Mittelwert und zu einer Aussage für Rendite und Risikoklasse.

„Wir machen keine Prognosen.“ Diese Aussage ist Andreas Wagner wichtig. Stattdessen berechne man mathematische Verteilungen auf der Grundlage aktueller volkswirtschaftlicher Wahrscheinlichkeiten. Und die können sich ändern. Daher werden die Parameter des Simulationsmodells jedes Jahr neu justiert, weshalb

auch jedes Riester-Produkt alljährlich zum Riester-Check bei der PIA muss. In der Regel ändern sich die Ergebnisse kaum, doch manchmal springen Produkte in eine andere Risikoklasse.

Neues aus Brüssel

Die Versicherer sind mit der PIA und der vom Gesetzgeber verordneten Transparenz zufrieden, ihre Mitarbeiter im Vertrieb allerdings weniger. Denn inzwischen hat die Europäische Union in einer Verordnung ein weiteres Bewertungsverfahren eingeführt, das zum Teil völlig andere Ablauleistungen errechnet. „Die Vertriebler werden schier wahnsinnig und können das ihren Kunden kaum noch erklären“, sagt Wagner.

Doch der Finanzmathematiker hält die Herangehensweise seines Teams für sehr verlässlich. Dieses Know-how ist auch für andere Anwendungen interessant, betont er: „Ob Betrugserkennung in der ambulanten Pflege, die Bewertung von Windparks oder Risikomanagement in unterschiedlichen Bereichen – unsere verschiedenen mathematischen Methoden lassen sich für viele Finanzprodukte einsetzen.“ ●



IMPRESSUM

Erfolgsformeln

Eine Sonderpublikation von *bild der wissenschaft* in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Technologie und Wirtschaftsmathematik ITWM

ERSCHEINUNGSTERMIN: Juli 2018

HERAUSGEBERIN: Katja Kohlhammer

VERLAG: Konradin Medien GmbH

Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen

CHEFREDAKTEUR: Prof. Dr. Christoph Fasel

PROJEKTLÉITUNG: Ralf Butscher

BILDREDAKTION: Susanne Söhling-Lohnert

AUTOREN: Dr. Frank Frick, Wolfgang Hess, Bernd Müller

GRAFISCHE GESTALTUNG:

Ricardo Rio Ribeiro Martins, www.design-schmiede.net

GESTALTUNG RÜCKSEITE: Oliver Weiss, www.oweiss.com

FOTOS: Wolfram Scheible, Tim Wegener

REDAKTION FRAUNHOFER ITWM:

Ilka Blauth, Gesa Ermel, Steffen Grützner, Esther Packullat

www.itwm.fraunhofer.de; E-Mail: info@itwm.fraunhofer.de

VERTRIEB: Kosta Poulos

DRUCK: Konradin Druck GmbH

Kohlhammerstr. 1–15, 70771 Leinfelden-Echterdingen

Weitere Exemplare können Sie kostenlos anfordern bei:

Leserservice bild der wissenschaft

Tel. 01805-260155, leserservice@wissenschaft.de

BILDNACHWEISE:

Fotos: S. 4: Fraunhofer/Bernhard Huber;

S. 7: Science Photo Library;

S. 11: Mark Kostich/iStock.com;

S. 26, 39, 42: Gesa Ermel/ITWM;

S. 28-31: Tim Wegener für bdw;

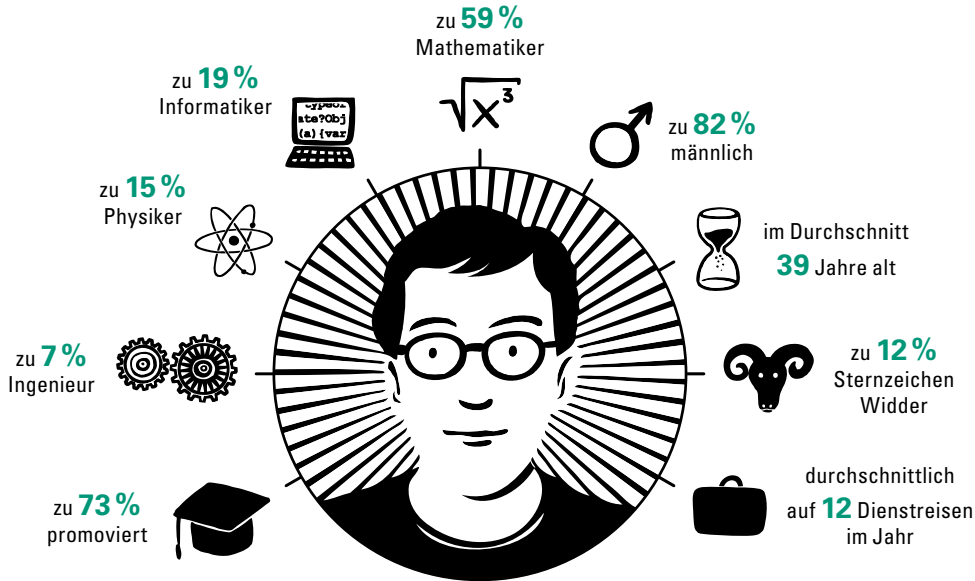
S. 10 Screenshot: ITWM;

Cover und alle anderen Fotos: Wolfram Scheible für bdw.

S. 25 Simulation: Industrial Path Solutions Sweden AB;

alle anderen Simulationen: ITWM.

Der Wissenschaftler am Fraunhofer ITWM ist ...



33%

Anteil von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) an den Industrieerträgen

24/7

Das ITWM präsentiert sich im Durchschnitt jährlich auf **24** Inlandsmessen und -kongressen und **7 Mal** im Ausland als Aussteller.

≈ 7000

COMPUTER-CORES SORGEN FÜR DIE NÖTIGE RECHENLEISTUNG.

50%

Anteil der Einnahmen aus Industrieprojekten

≈ 250

Anzahl der jährlichen Industrieprojekte

320

Mit einer Abwärmeleistung bis zu **320 kW** aus den Serverräumen wird vor allem im Winter ein Wohlfühlklima für **22** tropische Pflanzenarten in den Atrien geschaffen.



Fast täglich hält ein ITWM-Wissenschaftler einen Vortrag im In- oder Ausland.

Am ITWM arbeiten aktuell Beschäftigte aus **29** Nationen.

*Kreativität braucht auch **Bewegung**: Dafür sorgen am ITWM ein Fitnessraum, Beachvolleyball, Tischtennis, Tischfußball und Yoga sowie die Beteiligung am örtlichen Bike-Sharing.*

Historie

Anfang der 1980er-Jahre entstand die AG Technomathematik am Fachbereich Mathematik der Universität Kaiserslautern. Daraus entwickelten sich der Studiengang „Techno- und Wirtschaftsmathematik“ sowie das eigenständige Institut für Techno- und

Wirtschaftsmathematik ITWM. Es wurde 1995 als rheinland-pfälzisches Landesinstitut gegründet, unter der Leitung von Prof. Dr. Helmut Neunzert. Die Fraunhofer-Gesellschaft nahm das ITWM 2001 als erstes Institut mit mathematischem Schwerpunkt auf.

2006 wurde das Fraunhofer-Zentrum Kaiserslautern eingeweiht. Aufgrund des starken Wachstums folgten 2012 und 2015 bauliche Erweiterungen. Heute ist das ITWM eines der weltweit größten Institute für Industriemathematik.