



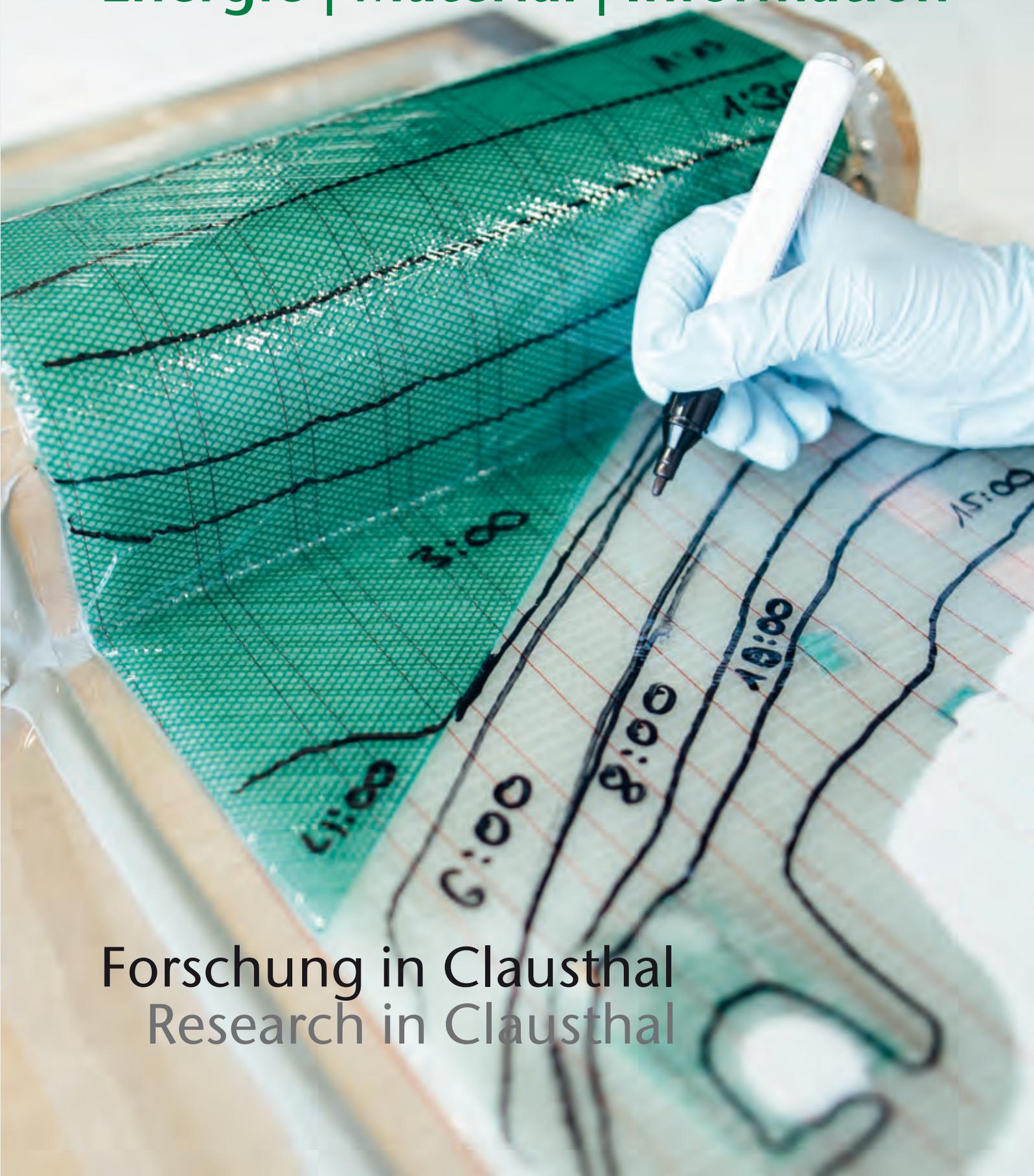
TU Clausthal

Energie | Material | Information

Forschung in Clausthal
Research in Clausthal



Energie | Material | Information



Forschung in Clausthal
Research in Clausthal

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Wie gelangen wir zu einer zuverlässigen, umweltschonenden und bezahlbaren Energieversorgung? Mit welchen Hightech-Werkstoffen und Prozessen bringen wir technische Innovationen voran? Und wie gestalten wir den digitalen Wandel? Große Fragen, auf die es in den kommenden Jahren Antworten geben muss. Und genau daran arbeiten die Forscherinnen und Forscher der Technischen Universität Clausthal. Energie – Material – Information: Das sind unsere zentralen Themen.

Basierend auf diesem Dreiklang hat die TU Clausthal ihr Profil in der Forschung geschärft. Orientiert an gesellschaftlicher Relevanz und wissenschaftlicher Exzellenz sind vier neue Forschungsschwerpunkte definiert worden, die auf den kommenden Seiten erläutert werden. Die Forschungsschwerpunkte stehen zugleich im Zentrum des aktuellen Masterplans, in dem die TU Clausthal ihre strategische Ausrichtung für die kommenden Jahre dargelegt. Der Masterplan ist in Abstimmung mit dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur in Hannover entstanden. Er berücksichtigt die mehr als 240-jährige Geschichte der Harzer Universität, ihre Wurzeln auf dem Gebiet von Energie und Rohstoffen sowie die besonderen Erfordernisse des regionalen Umfelds.

Ein modernes Forschungsprofil ist die eine Seite, auf der anderen müssen die guten Ideen aus der Wissenschaft auch in der Praxis ankommen. Als innovative Hochschule steht die TU Clausthal für einen intensiven Technologietransfer.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Hanschke
Präsident der TU Clausthal



Ein großer Teil der mehr als 30 Millionen Euro an Drittmitteln, die die Universität Jahr für Jahr einwirbt, kommt aus der Wirtschaft. Zudem haben sich in den vergangenen 30 Jahren Dutzende Unternehmen aus der Hochschule heraus gegründet; einige sind heute Weltmarktführer auf ihrem Gebiet. Institutionen, an denen Wissenschaft und Wirtschaft zusammenfinden, sich austauschen und Projekte umsetzen, sind die transdisziplinären Forschungszentren der Universität. Im zweiten Teil dieser Broschüre werden sie vorgestellt.

Die vielfältigen Kooperationen unserer Technischen Universität erstrecken sich nicht nur auf Industriepartner. Auch mit anwendungsnahen Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Harz nachhaltig zusammen, exemplarisch seien genannt die Fraunhofer-Gesellschaft, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Eine Auswahl dieser Forschungsk Kooperationen bzw. Projekte bildet den dritten Part der vorliegenden Zusammenschau.

In ihrem Selbstverständnis betrachtet sich die TU Clausthal einerseits als Motor für Innovationen in der Region, andererseits reicht ihre Strahlkraft weit darüber hinaus. Aufgrund ihrer ausgeprägten Internationalität und des weltweiten Renommées setzt die Technische Universität auf globale Vernetzung. Forschung lebt ebenso von regionaler wie von internationaler Inspiration.

Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts
Vizepräsident für Forschung und Technologietransfer

Introduction

Dear Reader,

How do we make a successful transition to a reliable, environmentally-friendly, and affordable energy supply? Which hightech materials and processes will help us to push forward with technical innovations? And how will we shape the digital revolution? These are big questions that need answers in the next few years. Researchers at Clausthal University of Technology (TU Clausthal) are working on precisely these issues. Our key areas of interest are energy, materials, and information.

TU Clausthal's research profile is now strongly focused on these three themes. Four new research focus areas have been defined based on social relevance and academic excellence, as outlined in the next section of this brochure. The university's current master plan is centred on these research focus areas and describes TU Clausthal's strategic direction going forward. This master plan was formulated in conjunction with Lower Saxony's Ministry for Science and Culture. It takes into account the university's 240-year history within the Harz mining community, the institution's roots in the field of energy and raw materials, and the specific challenges of the region.

Having a cutting-edge research profile is a major consideration, but good ideas from academia also need to be implemented in practice. As an innovative university TU Clausthal prides itself on its deep commitment to technology

transfer. A significant proportion of the third-party funding that the university raises annually, which exceeds 30 million euros, comes from the business sector. What is more, over the past 30 years dozens of university spin-off companies have been formed. Some of them are now global market leaders in their field. The university's transdisciplinary research centres are where the worlds of academia and commerce converge, projects are implemented, and ideas are shared. These research centres are presented in the second part of the brochure.

Clausthal University of Technology's diverse joint projects not only involve industrial partners: researchers here also work with other applied research and development institutes on a long-term basis. Examples include the Fraunhofer Society, the German Aerospace Center (DLR), and the German Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM). The third part of this overview looks at a selection of these collaborative research partnerships and projects.

TU Clausthal sees itself as a driver of innovation in the region, but its reach also extends far beyond the local area. Global networking is extremely important to Clausthal University of Technology's highly developed international profile and worldwide reputation. After all, research relies on inspiration from regional and international sources alike.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Hanschke
President of TU Clausthal

Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts
Vice-President for Research and
Technology Transfer

Inhalt

3 Vorwort

6 Forschungsprofil

Forschungsuniversität TU Clausthal

14 Forschungsschwerpunkte

Nachhaltige Energiesysteme

Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz

Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte

Offene cyberphysische Systeme und Simulation

34 Forschungszentren

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik

Simulationswissenschaftliches Zentrum

52 Forschungs Kooperationen

Batterie- und Sensoriktestzentrum

Drilling Simulator Celle

Forschungsplattform ENTRIA

KIC EIT Raw Materials

German Resource Research Institute (GERRI)

Recyclingcluster wirtschaftsstrategische Metalle (REWIMET)

Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen

DFG-Transferprojekt: Emissionsarme Synthese von Titanlegierungen

DFG-Graduiertenkolleg: Social Cars – Kooperatives (de)zentrales Verkehrsmanagement

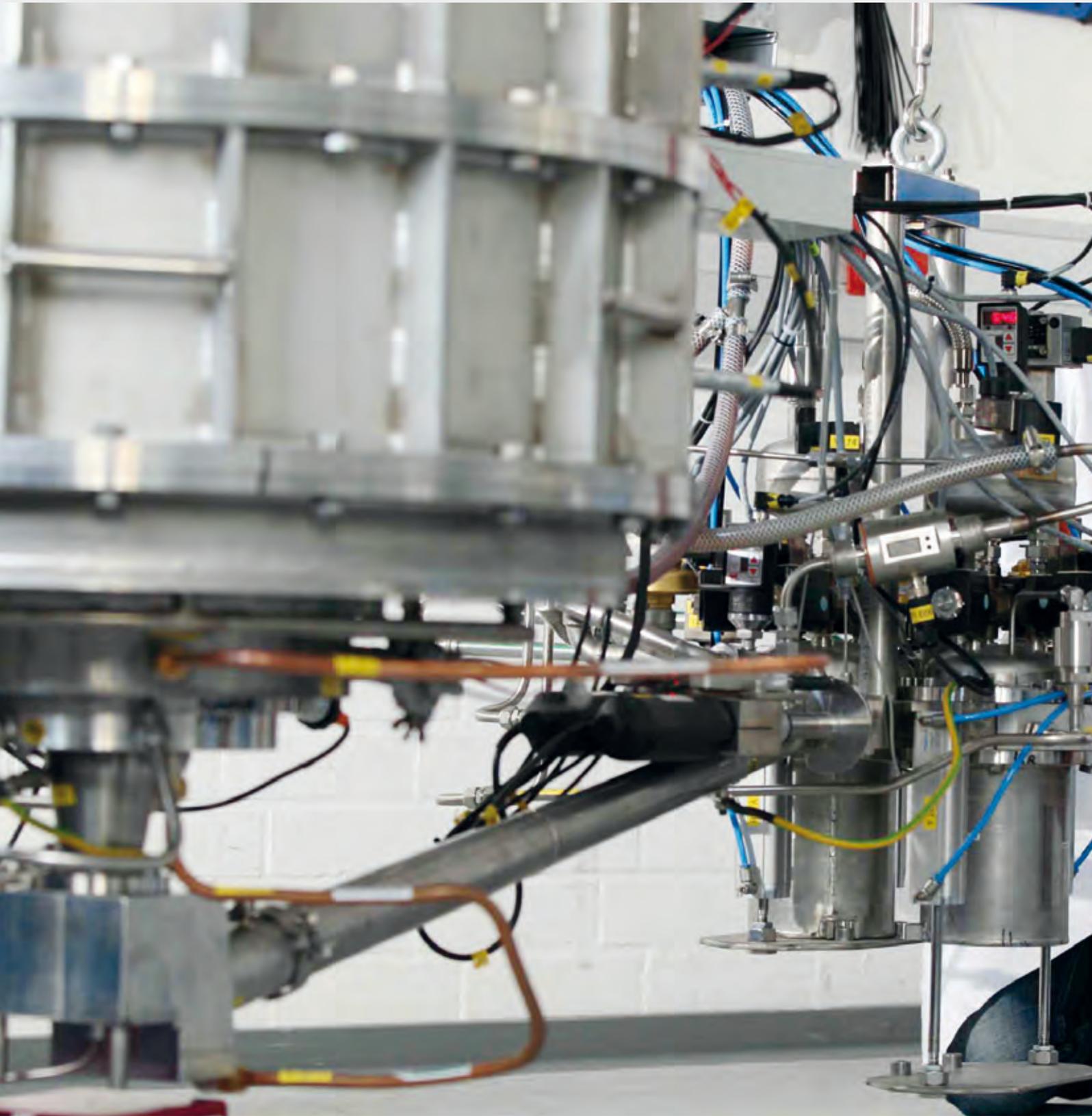
Institute for Applied Software Systems Engineering (IPSSE)

86 Fakultäten und Institute

90 Kontakte

Table of Contents

- 3 Introduction
- 6 Research Profile
 - TU Clausthal – Research University
- 14 Research Focus Areas
 - Sustainable Energy Systems
 - Raw Materials Supply and Resource Efficiency
 - Innovative Materials and Processes for Competitive Products
 - Open Cyber-Physical Systems and Simulation
- 34 Research Centers
 - Energy Research Center of Niedersachsen
 - Clausthal Center for Material Technology
 - Simulation Science Center
- 52 Collaborative research projects
 - Battery and Sensor Test Center
 - Drilling Simulator Celle
 - ENTRIA Research Platform
 - KIC EIT Raw Materials
 - German Resource Research Institute (GERRI)
 - Cluster for Recycling of Economically Strategic Metals (REWIMET)
 - Campus Functional Materials and Structures
 - DFG Transfer Project: Low-emission Synthesis of Titanium Alloys
 - German Research Foundations (DFG) Research Training Group: Social Cars – Cooperative (De-)centralized Traffic Management
 - Institute for Applied Software Systems Engineering (IPSSE)
- 86 Faculties and Institutes
- 90 Contacts





Forschungsprofil

Research Profile





Forschungsuniversität TU Clausthal

TU Clausthal – Research University

Die Welt steht in vielerlei Hinsicht vor einem Umbruch: Der Klimawandel und die knapper werdenden fossilen Energieträger zwingen die Staaten dazu, sich nach alternativen Energiequellen umzusehen. Der Rohstoffverbrauch hat beängstigende Ausmaße erreicht; ohne eine intelligente Gegenstrategie drohen Wirtschaftskrisen und Verteilungskämpfe. Die fortschreitende Vernetzung der Alltagswelt hat das Potenzial, unsere Lebensweise nachhaltig und in bislang kaum abzuschätzender Weise zu verändern.

Die Technische Universität Clausthal leistet einen Beitrag zur Lösung dieser drängenden Probleme. Als sie 1775 als „Clausthaler montanistische Lehrstätte“ gegründet wurde, war der Bergbau Basis und Schlüsseltechnologie der einsetzenden Industrialisierung. Diese Wurzeln sind noch immer sichtbar: Bis heute beschäftigen sich Wissenschaftler der TU mit der Gewinnung, Veredelung, Speicherung, Verteilung, Nutzung und Wiederverwendung von Ressourcen dieser Erde. Zu diesem Themenfeld Material gesellen sich die Bereiche Energie und Information. Der Dreiklang Energie – Material – Information ist das Leitmotiv, das die Forschungsanstrengungen an der TU Clausthal beschreibt.

In many ways, the world is facing upheaval: climate change coupled with fossil fuels becoming increasingly scarce is forcing nation states to look for alternative sources of energy. Consumption of raw materials has reached an alarming level; without an intelligent counter-strategy there is the threat of economic crises and distributional conflicts. The ever-increasing interconnectedness of the everyday world has the potential to change our way of life permanently in a manner we can scarcely appreciate as yet.

Clausthal University of Technology (TU Clausthal) makes a contribution to solving these pressing problems. When it was established in 1775 as the „Clausthaler montanistische Lehrstätte“ (Clausthal mountain educational institution), mining formed the basis of and key technology behind nascent industrialization. These roots are still visible today: researchers at TU Clausthal continue to address subjects around extracting, processing, storing, distributing, using, and re-using this Earth's resources. Energy and information are other topics related to materials. These three areas – energy, materials, information – are the guiding theme describing research efforts at TU Clausthal.



Konkret konzentriert die TU ihre Forschung auf vier Schwerpunkte mit hoher gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Relevanz:

- Der Forschungsschwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme sucht nach Antworten auf die Frage, wie sich aus regenerativen Quellen eine verlässliche Energieversorgung gewährleisten lässt. Im Zentrum stehen Konzepte, mit denen sich „grüner“ Überschussstrom speichern und nach Millisekunden, Stunden, Tagen oder Monaten wieder abrufen lässt. Ziel ist es, Energieerzeugung und -speicherung zusammenwachsen zu lassen und so die Versorgungssicherheit – trotz fluktuierender Produktionsmenge – zu erhöhen.

Specifically, TU Clausthal’s research is centered on four core issues of high social and scientific relevance:

- The Sustainable Energy Systems research focus area seeks to answer the question of how we can use renewable sources to deliver a reliable energy supply. The primary focus is on innovative concepts that allow surplus green energy to be stored and released when needed, be that in milliseconds, hours, days or months. The goal is to increase security of supply – despite variations in production output – by facilitating the co-development of solutions for the generation and storage of energy.

- Im Forschungsschwerpunkt „Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz“ geht es um Wege, auf denen der Hochtechnologiestandort Deutschland in Zukunft seine Rohstoffversorgung sichern kann. Dazu verfolgen die beteiligten Wissenschaftler drei Teilstrategien: Zum Ersten sollen mit Hilfe moderner Technologien neue Primärrohstofflager erschlossen und effizienter als bislang abgebaut werden. Zum Zweiten sollen die enormen Rohstoffschätze zurückgewonnen werden, die in Altprodukten oder Deponien gebunden sind. Zum Dritten sollen seltene Rohstoffe sparsamer eingesetzt oder durch weniger seltene Materialien ersetzt werden.
- Neue Werkstoffe und ihre Verwendung stehen im Fokus des Forschungsschwerpunkts „Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte“. Die beteiligten Wissenschaftler wollen Materialeigenschaften und -phänomene besser verstehen, auf dieser Basis bessere oder gar gänzlich neue Werkstoffe designen und nicht zuletzt die Prozesse optimieren, mit denen sich Werkstoffe und Produkte wirtschaftlich herstellen lassen.
- Der Forschungsschwerpunkt „Offene cyberphysische Systeme und Simulation“ beschäftigt sich mit den Möglichkeiten und Problemen, die die fortschreitende Vernetzung von Alltagsgegenständen und Maschinen mit sich bringt. Im Zentrum steht dabei unter anderem die Frage, wie cyberphysische Systeme so gestaltet werden können, dass sie sich flexibel auf geänderte Anforderungen in der Zukunft einstellen.
- The Raw Materials Supply and Resource Efficiency research focus area addresses ways in which Germany can safeguard its future as a location for high-technology. The researchers involved are pursuing three sub-strategies:
 - Tapping new deposits of primary raw materials using advanced technologies and exploiting them in a more efficient way than was previously the case.
 - Recovering the vast amount of raw materials contained in used products and landfill.
 - Making more economical use of scarce raw materials or replacing them with less scarce materials.
- New materials and their use form the focus of the Innovative Materials and Processes research focus area for Competitive Products. The researchers want to better understand the basic principles of the properties and phenomena of materials. On this basis they then aim to design improved materials, or even entirely new ones, and ultimately optimize the processes by which materials and products are manufactured economically.
- The Open Cyber-Physical Systems and Simulation research focus area concentrates on the opportunities and problems posed by the ever-increasing interconnectedness of everyday objects and machines. The primary focus includes the issue of how cyber-physical systems can be designed in such a way that they can be flexibly adjusted to changed requirements in future.

Die vier Forschungsschwerpunkte greifen an verschiedenen Punkten ineinander und ergänzen sich. So wird die Energiewende nur mit neuartigen Hightech-Materialien gelingen, die Autokarosserien leichter, Solarmodule effizienter und Windkraft-Anlagen robuster machen. Viele dieser Werkstoffe basieren auf Ressourcen, die schon heute knapp sind. Ein effizienter Umgang mit diesen Rohstoffen ist daher mehr denn je eine Zukunftsfrage, die schon bei der recyclinggerechten Produktion von Anlagenkomponenten berücksichtigt werden muss. Die komplexen Herstellungsprozesse erfordern eine zunehmende Vernetzung der Industrieproduktion – ein Ansatz, der unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ bekannt geworden ist. Maschinen und Werkstücke sollen im Cyberspace miteinander kommunizieren; Herstellungsprozesse sollen so flexibler und weniger fehleranfällig werden. Cyberphysische Systeme sind zudem ein Schlüssel zur effizienteren Nutzung von Energienetzen und Verkehrswegen.

Die vier Forschungsschwerpunkte finden in drei Forschungszentren ihre institutionelle Heimat: dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, dem Clausthaler Zentrum für Materialtechnik und dem Simulationswissenschaftlichen Zentrum Clausthal-Göttingen. In den Forschungszentren kooperieren jeweils mehrere Institute, oft unter Einbeziehung externer Partner aus Wissenschaft und Industrie. Die Zentren stellen unter anderem die dafür nötige Forschungsinfrastruktur bereit, die so institutsübergreifend genutzt werden kann. Unter dem Dach der drei Zentren arbeiten insgesamt 36 Institute der TU Clausthal Hand in Hand. Sie tragen so dazu bei, Deutschland und Europa fit zu machen für die Welt von morgen – auch durch die Ausbildung entsprechend geschulter Fachkräfte.

The four research focus areas are all linked to each other at different points and complement one another. For example, the transition to renewable energy sources will only be successful with innovative hightech materials. These are also needed to make vehicle bodies lighter, solar modules more efficient, and wind turbines more robust. Many of these substances are based on resources that are already in short supply today. Now more than ever, making efficient use of these raw materials is a critical issue for the future. System components need to be produced in such a way that they are as recyclable as possible. Complex manufacturing processes demand greater networking of industrial production – a concept that has come to be known as Industry 4.0. If machines and the items that they handle are able to communicate with each other, manufacturing processes will become more flexible and less error-prone. Cyber-physical systems are also a key to more efficient use of power grids and modes of transport.

The four research focus areas have their institutional home within three research centers: the Energy Research Center of Niedersachsen, the Clausthal Center of Material Technology, and the Simulation Science Center Clausthal-Göttingen. Multiple institutes cooperate within these research centers, often involving external partners from academia and industry. Among other things, the centers provide the necessary research infrastructure, which can be used on a cross-institutional basis. A total of 36 institutes at TU Clausthal work together under the umbrella of the three centers. They are contributing to preparing Germany and Europe for the world of the future, as well as training appropriately skilled specialists.







Forschungsschwerpunkte Research Focus Areas



Nachhaltige Energiesysteme

Sustainable Energy Systems

Mit dem Wind gibt es ein Problem: Er weht nicht unbedingt dann, wenn man ihn braucht. Und auch die Sonne ist in unseren Breiten ein eher sporadischer Gast. Diese Unzuverlässigkeit bereitet der Wissenschaft Kopfzerbrechen. Denn wenn Kernkraft und fossile Energieträger mittelfristig zu Auslaufmodellen werden sollen, benötigen wir verlässlichen Ersatz. Die Energiemenge aus regenerativen Quellen fluktuiert dagegen stark: Solarzellen liefern zur Mittagszeit am meisten Strom, und bei Flaute stehen auch die größten Windräder still. Damit die Nachfrage sicher gedeckt werden kann, muss daher momentan ein großer Teil der benötigten Energie weiterhin durch Kohle-, Gas- oder Atomkraftwerke bereitgestellt werden.

Schwankungen des Energieangebots sind aber auch aus einem anderen Grund problematisch: Sie können in den Kraftwerken zu massiven Steuerproblemen führen oder gar das Netz insgesamt destabilisieren. Im Forschungsschwerpunkt „Nachhaltige Energiesysteme“ suchen Forscher der TU Clausthal nach Antworten auf die Frage, wie sich aus regenerativen Quellen eine sichere Energieversorgung gewährleisten lässt. In dem Schwerpunkt kooperieren 25 Professoren aus den Bereichen Materialwissenschaften, Physikalische Technologien, Energiesystemtechnik, Verfahrenstechnik, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften. Im Zentrum stehen innovative Konzepte, mit denen sich „grüner“ Überschussstrom speichern und nach Millisekunden, Stunden, Tagen oder Monaten wieder abrufen lässt. Neue Geschäftsmodelle sollen derartige Szenarien auch für die Energiebranche attraktiv machen. Ziel ist es, Energieer-

There is a problem with wind: it doesn't always blow when you need it. And at our latitude we cannot always rely on the sun making an appearance either. This unreliability is a real challenge for the world of science. If nuclear and fossil fuels are to be phased out in the medium term, then we need a reliable alternative. In contrast to these traditional sources, renewables exhibit strong fluctuations: solar panels supply the most electricity at midday, and when it's calm even the biggest of wind turbines stands still. In order to reliably meet demand, for the time being a large proportion of the energy must still be supplied from coal, gas and nuclear.

Fluctuations in the energy supply are problematic for another reason too: they can create enormous control problems at power stations and might even destabilize the grid as a whole. Researchers focusing on sustainable energy systems at TU Clausthal are searching for answers to the question of how we can use renewable sources to deliver a guaranteed, secure energy supply. The research focus area brings together 25 professors from the fields of materials science, physical technologies, energy systems engineering, process engineering, law, and the management sciences. Their primary focus is on innovative concepts that allow excess green energy to be stored and released when needed, be that after milliseconds, hours, days or months. New business models are also required to make this type of scenario attractive to the energy sector. The goal is to retain security of supply – despite variations in production output – by facilitating the continued co-devel-





zeugung, -nutzung und -speicherung weiter zusammenwachsen zu lassen und so die Versorgungssicherheit – trotz fluktuierender Produktionsmenge – zu erhalten.

Ein zentraler Schlüssel zur Lösung des Fluktuationsproblems ist die Entwicklung leistungsfähiger Speicherkraftwerke für Überschussstrom. Heute setzt man dazu vor allem auf Pumpspeichieranlagen: Der Überschussstrom wird dazu genutzt, um Wasser in ein hoch gelegenes Auffangbecken zu pumpen. Wenn die Nachfrage steigt, kann diese potenzielle Energie durch Generatoren in Strom zurückgewandelt werden. In Deutschland erfolgt jedoch ein zunehmender Teil der Ökostromerzeugung in Offshore-Windkraftanlagen. Dort sind aufgrund der topographischen Gegebenheiten keine herkömmlichen Pumpspeicher möglich. TU-Wissenschaftler untersuchen stattdessen die Möglichkeit, unterirdische Pumpspeicher einzusetzen oder Energie in Form von Druckluft

opment of solutions for the generation, use, and storage of energy.

One of the main keys to solving the fluctuation problem is the development of high-performance storage power plants for excess electricity. At present the most common option is pumped storage, whereby excess electricity is used to pump water to a reservoir at a higher elevation. When demand increases, the potential energy stored can be converted back into electricity. In Germany, however, an increasing proportion of eco-power is being generated by offshore wind farms. Because of the nature of the topography here, conventional pumped storage is not possible. Researchers at TU Clausthal are therefore exploring the possibilities of underground pumped storage and storage of energy in the form of compressed air and syngas. In this scenario, compressed air



und Synthesegasen zu speichern. Die komprimierte Luft könnte in diesem Szenario in riesige unterirdische Kavernen eingeleitet werden, etwa in ausgelaugte Salzstöcke unter den Nordseeinseln, und zusammen mit gespeichertem synthetischen Methan, Schwachgas oder Wasserstoff rückverstromt werden.

Ein viel versprechender Ansatz ist die Nutzung überschüssiger Energie, um damit Wasserstoff zu erzeugen. Wasserstoff (bzw. daraus hergestelltes Methan) eignet sich im Prinzip dazu, Energie für längere Zeiträume zu speichern. Technologisch ist diese Strategie jedoch mit großen Herausforderungen verbunden. Diese betreffen zum einen die Wasserstofferzeugung. TU-Wissenschaftler entwickeln hierzu unterschiedliche Ansätze. So arbeiten sie daran, den Wirkungsgrad der elektrolytischen Spaltung von Wasser zu erhöhen. Noch in den Kinder-

could be fed into giant underground caverns, for example depleted salt domes under the North Sea islands. The compressed air would be reconverted to electricity with stored synthetic methane, lean natural gas or hydrogen gas.

One highly promising approach is to use excess energy to make hydrogen. Hydrogen (or methane produced from it) is, in principle, suitable for longer-term energy storage. However, there are some major technological hurdles associated with this strategy. Not least of these is the matter of hydrogen production. TU Clausthal is working on a variety of approaches to this problem. These efforts include increasing the efficiency of electrolytic decomposition of water. Another technology, still in its infancy,

schuhen steckt eine Technologie, die die Photosynthese der Pflanzen kopiert: die direkte photoelektrolytische Erzeugung von Wasserstoff aus Sonnenlicht in speziellen Solarzellen. Ein noch ungelöstes Problem ist die Frage, wie die so gewonnenen großen Wasserstoff-Mengen gespeichert werden sollen. Auch hier sind Untertage-Großspeicher im Gespräch. Forscher der TU untersuchen momentan mögliche Reaktionen zwischen Gesteinen, Porenwasser, Mikroorganismen und Wasserstoff, um zu klären, ob dieser Weg gangbar ist.

Die Rückwandlung von Wasserstoff zu Strom erfolgt auch in Brennstoffzellen. Der erzeugte Gleichstrom kann dann seinerseits mit so genannten virtuellen Synchronmaschinen (VISMA) in Drehstrom gewandelt werden, für die die TU Clausthal ein weltweites Patent hält. An der TU laufen zudem Arbeiten mit dem Ziel, die Herstellung von Brennstoffzellen mit einem hohen Wirkungsgrad zu vereinfachen und ihre Haltbarkeit zu verbessern.

Batterien eignen sich ebenfalls zur Glättung von Stromspitzen. Insbesondere die so genannten Redox-Flow- und Metall-Luft-Batterien sollen in Zukunft hohe Leistungsreserven im zweistelligen Megawatt-Bereich bereitstellen können. Die TU Clausthal führt auch zu diesen Konzepten entsprechende Studien durch. Bei diesen Arbeiten steht die Clausthaler Hochschule nicht allein. Bereits 2008 hat die TU zusammen mit Partneruniversitäten das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen gegründet. Rund 80 Forscher aus der Naturwissenschaft, der Ingenieurwissenschaft, der Rechtswissenschaft sowie der Sozial- und Wirtschaftswissenschaft arbeiten hier unter einem Dach zusammen. Diese Vernetzung ermöglicht auch den Betrieb von Großforschungsanlagen wie den „Drilling Simulator“ in Celle. Dieser verfolgt das Ziel, Tiefbohrungen kostengünstiger und sicherer zu machen – etwa für Gasspeicher unter der Erdoberfläche.

mimics photosynthesis in plants to directly produce hydrogen from sunlight using a photoelectrolytic process in specialist solar cells. The problem of how to store the large volumes of hydrogen produced by such a process remains as yet unsolved. Massive subterranean storage is also being considered in this case. To ensure the feasibility of this method, researchers at TU Clausthal are investigating possible reactions between rocks, pore water, micro-organisms, and hydrogen.

Reconversion from hydrogen to electricity is also achieved using fuel cells. The direct current generated is converted to alternating current using Virtual Synchronous Machines (VISMA), a technology for which TU Clausthal has worldwide patents. Work is ongoing at the university with the goal of simplifying the manufacture of high-efficiency fuel cells that last for longer.

Batteries are also a viable option for smoothing out energy spikes. Particularly promising for the future are redox flow and metal-air batteries, which promise high power capacity in the double-digit megawatt range. TU Clausthal is also conducting relevant studies relating to these concepts. The university is not alone in its efforts. Back in 2008, it created partnerships with other universities to establish the Energy Research Center of Niedersachsen. Around 80 researchers drawn from the fields of the natural and social sciences, engineering, law, and the management sciences work together here under the same roof. This network also makes it possible to operate large-scale research facilities, such as the drilling simulator in Celle. The goal of this facility is to make deep drilling cheaper and safer for applications such as subterranean gas storage.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
Koordinator
Fon +49 5323 72-2570
E-Mail hans-peter.beck@tu-clausthal.de

Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz

Raw Materials Supply and Resource Efficiency

Die Zahlen sind alarmierend: Im Jahr 2007 wurden auf der Erde 60 Milliarden Tonnen Rohstoffe verbraucht, im Jahr 2030 werden es nach Prognosen 100 Milliarden Tonnen sein. Die Ausbeutung natürlicher Lagerstätten reicht bei weitem nicht aus, diesen Bedarf dauerhaft zu decken.

Besonders dramatisch trifft die Ressourcenknappheit Europa: Der Kontinent verfügt einerseits über vergleichsweise wenig Bodenschätze. Andererseits ist Europa und insbesondere Deutschland ein bedeutender Produzent von Hightech-Gütern wie Kraftfahrzeugen, Maschinen und Chemieprodukten. Zu ihrer Herstellung werden Metalle wie Gallium, Indium oder Tantal benötigt, die in der Erdkruste nur in relativ geringen Mengen vorhanden sind. Schon in wenigen Jahren wird die Nachfrage nach diesen seltenen Elementen die weltweit produzierte Menge übersteigen, schätzen Experten.

Diese Versorgungslücke gefährdet nicht nur den Hochtechnologie-Standort Europa, sondern erschwert auch den Kampf gegen eine der großen globalen Bedrohungen unserer Zeit, den Klimawandel. Denn für die Energiewende sind seltene Rohstoffe momentan unabdingbar. So wird für die Herstellung von Photovoltaik-Anlagen unter anderem Indium benötigt, für Hochleistungs-Windturbinen Neodym. Lithium wird für Batterien gebraucht, die z.B. in Elektro-

The figures are alarming: in 2007 60 billion tonnes of raw materials were consumed on Earth and according to forecasts this will rise to 100 billion tonnes in 2030. Exploiting natural deposits is by no means enough to meet this requirement on an ongoing basis.

Scarcity of resources affects Europe in a particularly dramatic manner. The continent has comparatively few mineral deposits yet Europe, and Germany especially, is a major producer of hightech goods such as motor vehicles, machinery, and chemical products. To manufacture these items, metals such as gallium, indium or tantalum are needed. Only relatively low quantities of these substances are available in the Earth's crust. Experts estimate that demand for



autos zum Einsatz kommen können, Scandium für hochfeste Aluminium-Legierungen für den Leichtbau, Tantal und Gallium für leistungsfähige Elektronik.

Das Thema Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz gilt daher als eine der zentralen Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte. An der TU Clausthal hat sich ein gleichnamiger Forschungsschwerpunkt etabliert, der sich dieser Herausforderung stellt. Die beteiligten Wissenschaftler wollen dazu beitragen, die Versorgung mit kritischen Rohstoffen für die Welt von Morgen zu sichern. Dazu verfolgen sie einen Ansatz, der auf drei unterschiedlichen Teilstrategien fußt: Zum Ersten sollen durch den Einsatz moderner Technologien neue Primärrohstofflager erschlossen und effizienter sowie umweltfreundlicher als bislang abgebaut werden. Zum Zweiten sollen die enormen Rohstoffschätze zurückgewonnen werden, die in Altprodukten, Produktionsrückständen, Deponien oder Abraumhalden gebunden sind. Zum Dritten sollen seltene Rohstoffe sparsamer eingesetzt oder durch andere, weniger seltene Materialien ersetzt werden.

Die drei Teilstrategien finden sich auch in der Struktur des Forschungsschwerpunkts „Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz“ wieder. Dieser gliedert sich in den TU Cluster Primary Resources, den TU Cluster Recycling und den TU Cluster Substitution. Insgesamt umfasst der Schwerpunkt derzeit 51 Professuren aus 30 Instituten, die auf diesen drei Gebieten forschen und lehren. Der Schwerpunkt fokussiert hauptsächlich auf metallische, mineralische und Polymer-gebundene Verbundwerkstoffe und deren Rohstoffe. Ein Hauptziel ist es, in Zukunft erheblich mehr Materialien wiederzuverwerten. So werden etwa in Elektrogeräten bis zu 60 verschiedene Elemente verwendet, von denen derzeit nur 18 zurückgewonnen werden können.

these scarce elements will exceed the amount extracted worldwide in just a few years.

This supply gap not only jeopardizes Europe's status as a location for hightech industries, but also makes it more difficult to combat one of the big global threats of our time – climate change. This is because scarce raw materials are presently indispensable in the transition to renewable energy. Indium, for example, is one of the substances needed to manufacture photovoltaic systems, while neodymium is required for high-performance wind turbines. Lithium is used for batteries such as the ones that can be deployed in electric cars. Scandium is added to aluminium alloys to increase strength for lightweight applications. Tantalum and gallium are used in high-performance electronics.

The supply of raw materials together with resource efficiency is therefore one of the key challenges facing us over the coming decade. A research focus area has been established at TU Clausthal to address this very issue. The researchers involved aim to contribute to ensuring that tomorrow's world has access to vital raw materials. The approach they are adopting is based on three different sub-strategies:

- Tapping new deposits of primary raw materials using advanced technologies and exploiting them in a more efficient and environmentally friendly way than was previously the case.
- Recovering the vast amount of raw materials contained in used products, production waste, landfill, and spoil tips.
- Making more economical use of scarce raw materials or replacing them with other, less scarce materials.

The structure of the Raw Materials Supply and Resource Efficiency research focus area also reflects these three sub-strategies. It is divided into clusters focusing on primary resources, recycling, and substitution. At present, the research focus area includes 51 professors from 30 insti-



Mittelfristig soll diese Zahl auf über 45 steigen. Kennzeichnend für viele der durchgeführten Projekte ist dabei ihre Interdisziplinarität: Viele Themen werden institutsübergreifend oder in enger Abstimmung zwischen verschiedenen Lehrstühlen bearbeitet.

Die TU Clausthal gilt heute im Bereich Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz als eine der führenden Forschungsinstitutionen in Europa. Das liegt auch an der jahrhundertealten Geschichte, in der sie wurzelt: Im Mittelalter war der Harz Weltzentrum des Silberabbaus; eine Tradition, die ihre Spuren hinterlassen hat. So verfügt die Region über eine deutschlandweit beispiellose Dichte metallverarbeitender Unternehmen, von denen viele zur Weltspitze zählen. Die TU hat die Bedeutung dieses Kapitals früh verstanden und für sich genutzt.

tutes who conduct research and teach in these three areas. It focuses mainly on metal, mineral, and polymer-bonded composite materials and the associated raw materials. One of the main objectives is to recycle considerably more materials in future. For example, electrical appliances may contain up to 60 different elements, but at present it is only possible to recover 18 of these. In the medium term, that figure is set to rise to 45. Many of the projects carried out are interdisciplinary: multiple institutes work together on many of the topics or there is close cooperation between chairs and faculty.

TU Clausthal is one of Europe's leading research institutions in the field of raw material supply and resource efficiency. This can partly be attributed to its roots in centuries-old history: during the Middle Ages the Harz region was a world center for silver mining. This tradition that has left its mark and, as a consequence, the

Schon 2011 hat sie sich mit den führenden Akteuren der Region zum „Recycling-Cluster wirtschaftsstrategische Metalle Niedersachsen“ zusammengetan, abgekürzt REWIMET. Erklärtes Ziel des Verbunds ist es, neue Recycling-Prozesse aus der Forschung in die industrielle Praxis zu überführen. Ein zentraler Schritt auf diesem Wege ist das in Planung befindliche Sekundärrohstoffzentrum, das dazu die nötige Infrastruktur bereitstellen soll.

Auch auf nationaler Ebene ist die TU Clausthal gut vernetzt: Sie hat sich 2015 mit vier weiteren führenden Rohstoff-Forschungseinrichtungen zum German Resource Research Institute GERRI zusammengeschlossen, einem virtuellen Großinstitut. Noch einen Schritt weiter geht das KIC EIT RAW Materials, das ebenfalls 2015 durch die Europäische Union gegründet wurde. In diesem europäischen Mammut-Verbund sind 116 Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Industriepartner aus ganz Europa vernetzt. Die TU Clausthal ist einer von lediglich drei universitären Kernpartnern aus Deutschland.

Die Universität aus dem Harz trägt somit ihren Teil dazu bei, Europa fit zu machen für die Herausforderungen von Morgen. Damit das gelingen kann, setzt sie nicht nur auf eine breit angelegte Forschungsstrategie, sondern flankiert diese durch dazu passende Studiengänge. Denn hervorragend ausgebildete Fachkräfte sind ein weiterer Rohstoff, von dem Europas Zukunft entscheidend abhängen wird.

region has a greater density of metal-processing companies than anywhere else in Germany. Many of these companies are among the best in the world. TU Clausthal understood the value of this capital early on and harnessed the potential. In 2011, the university pooled resources with leading players in the region to form REWIMET, the state of Lower Saxony's recycling cluster for metals of strategic economic importance. The group's stated goal is to transfer research into new recycling processes to industrial applications. One of the key steps in achieving this is the Center for Secondary Raw Materials presently being planned and which is intended to provide the necessary infrastructure.

TU Clausthal also has good connections at national level: in 2015 the university joined four other leading research facilities to form the German Resource Research Institute (GERRI), a large virtual organization. KIC EIT RAW Materials likewise established in 2015, this time by the European Union, goes a step further. This Knowledge and Innovation Community under the auspices of the European Institute of Innovation and Technology brings together 116 higher-education institutions, research facilities, and industrial partners from all over Europe. TU Clausthal is one of three core university partners from Germany and is therefore contributing to Europe's preparations to face the challenges of the future. For this to succeed, the university has a broad-based research strategy supported by appropriate study programs. Highly trained specialists are, after all, a further resource on which Europe's future will crucially depend.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Koordinator
Fon +49 5323 72-2735 / 2038
E-Mail goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte

Innovative Materials and Processes for Competitive Products

1.268 Kilogramm: So viel wog im Jahr 2001 ein in der EU neu zugelassener Pkw im Schnitt. Ein gutes Jahrzehnt später waren es bereits 1.402 Kilogramm. Für die Umwelt war dieser Anstieg eine schlechte Nachricht. Denn mit zunehmendem Gewicht steigt auch der Kraftstoffverbrauch – pro 100 Kilogramm um 0,3 bis 0,4 Liter, sagt eine Faustregel.

Für den Gewichtsanstieg ist vor allem der Trend zu größeren, komfortableren Fahrzeugen verantwortlich. Er wäre noch viel drastischer ausgefallen, wenn Karosserie, Antrieb und Fahrwerk nicht gleichzeitig durch moderne Hightech-

1,268 kilograms: this is how much a newly registered car weighed on average in the EU in 2001. Around a decade later, the figure was 1,402 kilograms. This increase was bad news for the environment: as the weight goes up, fuel consumption also rises – by 0.3 to 0.4 litres per 100 kilograms as a general rule.

The trend towards bigger, more comfortable vehicles is primarily responsible for this weight increase. It would be even more extreme if bodywork, drive systems and chassis had not simultaneously become significantly lighter due to advanced hightech materials such as



Werkstoffe wie neuartige Stähle, Gusswerkstoffe, Leichtmetalle und Faserverbundwerkstoffe deutlich leichter geworden wären.

Das Beispiel zeigt: Innovative Materialien und Werkstoffe sind nicht nur eine Grundvoraussetzung wettbewerbsfähiger Produkte, sondern auch der Schlüssel zur Bewältigung drängender gesellschaftlicher Probleme. Gerade für die Energiewende sind moderne Hightech-Materialien unabdingbar – für die Entwicklung effizienter Solarmodule und stromsparender Leuchtdioden, für die Herstellung verlustarmer Elektroantriebe, für die Konstruktion leichter und dennoch fester Windkraft-Rotoren. Die TU Clausthal zählt bei der materialwissenschaftlichen Grundlagenforschung und ihrer Umsetzung in Produktionsprozesse zu den führenden Hochschulen in Deutschland. Dies dokumentiert auch der Forschungsschwerpunkt „Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte“. In dem interdisziplinären Verbund kooperieren Materialwissenschaftler, Verfahrenstechniker, Maschinenbauer, Physiker und Chemiker, aber auch Mathematiker und

innovative steels, cast materials, light metals, and fibre-composite materials.

The example shows that innovative materials and substances are not just a basic prerequisite in making competitive products, they are also the key to overcoming pressing problems facing society. Advanced hightech materials are especially indispensable given the transition to renewable energy sources – they are needed to develop efficient solar modules and energy-saving LEDs, to manufacture low-loss electric propulsion systems, and to construct lighter yet stronger rotor blades for wind turbines. TU Clausthal is one of Germany's leading universities for fundamental research in the material sciences and its implementation in production processes. The Innovative Materials and Processes research focus area for Competitive products reflects this background. This interdisciplinary group consists of materials scientists, Process and mechanical engineers, physicists, and chemists, as well as mathematicians and



Informatiker. Denn viele Materialeigenschaften lassen sich heute mit mathematischen Modellen am Rechner simulieren. Sein institutionelles Zuhause findet der Forschungsschwerpunkt im Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM), das seit 2013 in einem modernen Forschungsneubau auf dem Campus der TU angesiedelt ist.

Die TU-Forscher fokussieren vor allem auf vier Punkte:

- Sie wollen die Grundlagen von Werkstoffeigenschaften und -phänomenen besser verstehen. Dazu nutzen sie beispielsweise aufwändige Methoden zur chemischen Analytik und neue, hochauflösende Elektronenmikroskopie-Verfahren. Auch die Computersimulation von Werkstoffen soll zukünftig eine wachsende Rolle spielen.
- Das dadurch gewonnene Know-how ist die Voraussetzung dafür, die Materialien hinsichtlich bestimmter Charakteristika gezielt zu optimieren oder gar völlig neuartige Werkstoffe zu designen.
- Neue Werkstoffe stellen neue Anforderungen an das Produktdesign: So soll etwa eine Heckklappe aus Spezialstahl oder Aluminium nicht nur leicht, sondern auch möglichst haltbar sein und sich zudem einfach und kostengünstig recyceln lassen.
- Schließlich müssen auch die Herstellungsprozesse optimiert werden, damit sich Werkstoffe und Produkte wirtschaftlich und in großen Mengen herstellen lassen.

Die TU Clausthal ist seit Jahrzehnten in diesen vier Bereichen aktiv. So konnte sie seit 1993 drei Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) einwerben – Großförderprojekte, die über Deutschlands Grenzen hinaus als Aushängeschild für universitäre Spitzenforschung gelten. Wie in ihren anderen wissenschaftlichen Schwerpunkten versteht sich die TU aber nicht allein als Ort der Grundlagenforschung. Ein wesentliches Anliegen ist die Umsetzung der Ergebnisse in die

information scientists. This is because many materials properties can be simulated these days using mathematical computer models. The research focus area is closely affiliated to the Clausthal Center of Material Technology (CZM), which has been based in a new state-of-the-art research building on the university campus since 2013.

The academic researchers are principally focusing on four aspects:

- They want to better understand the basic principles of the properties and phenomena of materials. To do this, they use sophisticated methods of chemical analysis, for example, as well as new, high-resolution electron microscope techniques. Computer simulations of materials are set to play an increasing role in future.
- The knowledge obtained in this way is a prerequisite for systematically optimizing materials in terms of specific characteristics and even for designing entirely new materials.
- New materials pose new challenges when designing products: for example, a tailgate made of special steel or aluminium not only has to be lightweight, it must also be as durable as possible whilst being easy and cost-effective to recycle.
- Ultimately, the processes by which materials and products are manufactured economically and in large quantities need to be optimized too.

TU Clausthal has been active in these four areas for decades. Since 1993, the university has obtained funding for three special research areas from the German Research Foundation (DFG). These major funding projects serve to showcase top university research beyond Germany's borders. As in other areas of academic research,

Praxis. Dazu kooperiert sie mit einer Reihe von Industriepartnern. Wie erfolgreich diese Strategie ist, zeigt unter anderem die Nominierung der TU Clausthal für den Zukunftspreis des Bundespräsidenten im Jahr 2014. Materialwissenschaftler der TU hatten zusammen mit Industriepartnern ein neues Gießverfahren für Stahl entwickelt, mit dem sich zum Beispiel leichtere Komponenten für den Automobilbau herstellen lassen – ohne Abstriche bei der Sicherheit.

Viele aktuelle Projekte des Forschungsschwerpunkts beschäftigen sich direkt oder indirekt mit der Energiewende. So versuchen Wissenschaftler der TU Clausthal, die Lebensdauer der Lager in Windturbinen zu verbessern. Diese sind aufgrund ihrer hohen Belastung anfällig für Materialdefekte. In anderen Vorhaben geht es etwa um die Entwicklung neuartiger Getriebe für treibstoffsparende Flugtriebwerke oder verbesserte Materialien, mit denen sich der Wirkungsgrad von Elektromotoren steigern lässt.

Viele dieser Projekte werden nicht allein von TU-Wissenschaftlern durchgeführt, sondern in Kooperation mit Partnern anderer Forschungseinrichtungen. Beispielhaft hierfür steht der 2012 gegründete „Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen“. Dabei handelt es sich um einen Verbund der TU Clausthal, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Funktionswerkstoffe sind Materialien, bei denen nicht hauptsächlich die mechanischen Qualitäten im Vordergrund stehen, sondern die sich durch bestimmte elektrische, magnetische, akustische, optische oder biologische Eigenschaften auszeichnen. Ein Beispiel ist Fensterglas, das einfallendes Licht in elektrische Energie umwandeln kann. Vielleicht werden derartige „transparente Solarzellen“ in nicht allzu ferner Zukunft zur dezentralen Stromerzeugung eingesetzt und liefern so ihren Beitrag zur Energiewende.

TU Clausthal does not see itself solely as a place for fundamental research. Applying the results in practice is an important priority. For that to happen, researchers cooperate with a range of industry partners. The fact that TU Clausthal was nominated for the Deutscher Zukunftspreis, the German Federal President's award for technology and innovation, in 2014 is just one indication of how successful this strategy has been. Materials scientists at the university teamed with industry partners to develop a new casting process for steel, which makes it possible to produce lighter components for the automotive industry without compromising safety.

Many of the research focus area present projects address the transition to renewable energy either directly or indirectly. One example is the efforts of researchers at TU Clausthal to extend the service life of the bearings inside wind turbines. Due to the high loads experienced, these parts are prone to material defects. Other projects include developing new gears for fuel-efficient aircraft engines or improved materials to boost the efficiency of electric motors.

Many of these projects involve cooperating with partners from other research facilities, not just the university's own academics. Campus Functional Materials and Structures, for example, was established in 2012 jointly by TU Clausthal, the German Aerospace Center (DLR), and the German Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM). In the case of functional materials, the focus tends to be on specific electrical, magnetic, acoustic, optical or biological properties of the material rather than its mechanical properties. One example is window glass that can convert incident light into electrical energy. In the not too distant future, these types of „transparent solar cells“ may perhaps be used as part of decentralized power generation and thus contribute to the transition to renewable energy.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling
Koordinator

Fon +49 5323 72-3776

E-Mail volker.wesling@tu-clausthal.de

Offene cyberphysische Systeme und Simulation

Open Cyber-Physical Systems and Simulation

Gefriertruhen haben bislang eine eher überschaubare Aufgabe: Sie sollen ihren Inhalt bei Minusgraden halten. Meldet der Temperatursensor, dass das Gefriergut zu warm wird, springt die Kühlung an. Mehr müssen sie nicht können.

In nicht allzu ferner Zukunft dürfte sich der Horizont vieler Haushaltsgeräte deutlich erweitern: Sie sollen eine Schnittstelle zum Stromnetz bekommen, mit deren Hilfe sie sich über das augenblickliche Energieangebot informieren können. So kann die Gefriertruhe „auf Vorrat“ kühlen, wenn gerade viel Strom vorhanden ist, und ihre Temperatur weit unter den eigentlich erforderlichen Wert absenken. Kühlschränke, Spülmaschinen oder Wäschetrockner werden so Teil eines intelligenten Stromkonzepts, das Energieangebot und -nachfrage austariert.

Das Beispiel beschreibt einen Zukunftstrend, der unseren Alltag nachhaltig verändern dürfte: Immer mehr Geräte sind mit immer leistungsfähigeren Sensoren ausgestattet. Und ein zunehmender Anteil von ihnen stellt die Daten dieser Sensoren anderen Geräten zur Verfügung. Wachsende Teile der physischen Welt sind also im Cyberspace miteinander vernetzt. Experten sprechen von cyberphysischen Systemen. Diese gelten als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts – einer Einschätzung, der die TU Clausthal mit ihrem Forschungsschwerpunkt „Offene cyberphysische Systeme und Simulation“ Rechnung trägt.

Freezers, until now, have had one easy-to-grasp task – to keep their contents at a temperature below zero degrees Celsius. If the temperature sensor says that the goods are getting too warm, then the chiller springs into action. There is not much more to it.

In the not too distant future, many household appliances might well have to broaden their horizons. They may get an interface to the power grid that will allow them to receive instantaneous information about the immediate market for energy. A freezer with this capability could build up a „cold reserve“ in advance, when power is plentiful, by dropping the temperature much lower than is absolutely necessary. Fridges, washing machines, and tumble driers would become part of the intelligent power concept too, contributing to balancing energy supply and demand.

This example is part of a future trend that can bring sustainable change to our everyday lives. More and more devices are being equipped with better performing sensors. Plus, an increasing percentage of these are making data from their sensors available to other devices. The result is that a growing proportion of physical-world devices are being networked in cyberspace. Experts call these cyber-physical systems and they are set to become one of the key technologies of the 21st century. Clausthal University of Technology recognizes this trend and so has established its Open Cyber-Physical Systems and Simulation research focus area.

Cyberphysische Systeme bieten den vernetzten Teilnehmern die Möglichkeit, in Echtzeit Informationen über ihre Umgebung zu sammeln und darauf sehr rasch und intelligent zu reagieren. Auf diese Weise lässt sich zum Beispiel die Nutzung vorhandener Ressourcen optimieren – nicht nur von Energie, sondern etwa auch von Verkehrswegen. Schon heute tauscht sich die Navigationssoftware mancher Smartphones mit den Mobilfunkgeräten anderer Verkehrsteilnehmer aus, um Staus zu erkennen und zu umfahren. Wenn in einigen Jahren die ersten autonom fahrenden Pkw über Deutschlands Straßen rollen, werden sie möglicherweise standardmäßig solche Routenplaner nutzen.

Eine zentrale Anforderung an cyberphysische Systeme ist ihre Offenheit. Forscher der TU Clausthal gehen in diesem Zusammenhang verschiedenen Fragen nach:

- Wie lassen sich cyberphysische Systeme so gestalten, dass sie sich problemlos und sicher in höhere Hierarchieebenen einbinden lassen? So gibt es beispielsweise heute schon Haushaltsgeräte, die miteinander kommunizieren: Der Herd kann bei Bedarf die Abzugshaube anschalten; der Trockner wird aktiv, wenn die Solarzellen auf dem Dach gerade ausreichend Strom erzeugen. Die Schnittstellen, über die diese Kommunikation erfolgt, sollen im Idealfall auch eine Anbindung an zukünftige intelligente Stromnetze erlauben.
- Wie kann man cyberphysische Systeme zukunftssicher machen? Die Vernetzung erfordert, dass Hard- und Softwarekomponenten miteinander sprechen können. Die dazu verwandte Sprache muss sehr flexibel sein: In Zukunft werden cyberphysische Systeme vermutlich mit Anforderungen konfrontiert, die sich heute noch nicht absehen lassen. Auch Normen und gesetzliche Rahmenbedingungen können sich ändern. Darauf müssen die Systeme reagieren können. Wenn etwa für Kühltruhen eine niedrigere Temperatur vorgeschrieben würde, sollten

Devices networked in a cyber-physical system have the opportunity to acquire real-time information about their environment and respond to it rapidly and intelligently. One benefit of such a system is that it allows the use of available resources to be optimized – and not just energy, but also other factors like transport routes. Even today, the navigation software on some smartphones is able to exchange data with the mobile devices of other road users, in order to detect traffic jams and suggest detours. In a few years, when the first autonomous passenger vehicles drive onto Germany's roads, they are likely to use this kind of route planning as standard.

A key requirement for cyber-physical systems is that they are open. Researchers at TU Clausthal are considering a number of questions in this area:

- Can we design cyber-physical systems in such a way that they can be integrated seamlessly and securely with higher level systems? For example, there are already household devices that can talk to each other. The hob can switch on the extractor hood when needed, while the dryer switches on when the sun is shining enough to power the solar panels on the roof. The interfaces over which this communication takes place should ideally also allow a connection to the intelligent power grid of the future.
- How can we future-proof cyber-physical systems? Networking can only happen when the hardware and software components can speak to each other. The language used for this purpose must be very flexible. In the future, cyber-physical systems will presumably have to deal with requirements that we cannot even conceive of today. Standards and legislative frameworks can also change. Systems must be able to respond to these



die vorhandenen Geräte sich selbst umstellen, so dass die Verbraucher keine Neuanschaffungen tätigen müssen.

- Durch die Offenheit cyberphysischer Systeme ergeben sich möglicherweise Zielkonflikte: Die Gefriertruhe muss anspringen, wenn ihre Innentemperatur über einen gewissen Wert steigt – auch dann, wenn das Energieangebot gerade knapp ist. Das Elektroauto darf nicht gerade in dem Moment seine komplette Akku-Energie ins Stromnetz einspeisen, wenn sein Besitzer zur Arbeit möchte – da mag die Stromnachfrage noch so groß sein. TU-Wissenschaftler erforschen, wie sich solche Zielkonflikte regeln lassen. Eine Möglichkeit ist etwa die Schaffung von Anreizsystemen oder Sanktionsmöglichkeiten. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das Simulationswissenschaftliche Zentrum (SWZ), eine interdisziplinäre Forschungseinrichtung der Technischen Universität Clausthal und der Universität Göttingen. Im SWZ werden unter anderem neue mathematische Modelle und Simulationsverfahren entwickelt, mit denen sich das komplexe Verhalten cyberphysischer Systeme analysieren und vorhersagen lässt.

Im Forschungsschwerpunkt „Offene cyberphysische Systeme und Simulation“ kooperieren momentan 21 Professoren – Informatiker, Informationstechniker, Ingenieure, Mathematiker und Wirtschaftswissenschaftler. Ihre Aktivitäten konzentrieren sich auf die Bereiche Produktion, Produktentwicklung, Energie und Mobilität. In diesen Feldern, die zu den Kernbereichen der TU-Forschung gehören, dürften cyberphysische Systeme in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Viele Projekte laufen dabei in Zusammenarbeit mit deutschen oder internationalen Partnern – Universitäten, Forschungseinrichtungen wie auch Industrieunternehmen.

changed conditions. For example, if a new legal minimum temperature for freezers is introduced, then existing appliances should be able to reconfigure themselves so that consumers do not have to go out and buy new ones.

- The openness of cyber-physical systems can create some potentially conflicting goals. The freezer must switch on when its internal temperature rises above a particular value, even if energy is in short supply at that moment. Electric cars should not feed their full store of electricity back into the grid just when the owner wants to go to work, no matter how high the demand is. TU Clausthal researchers are looking at ways in which such conflicting aims can be managed. One option is to create incentive schemes or to introduce the idea of sanctions. An important player in this field is the Simulation Science Center (SWZ), an interdisciplinary research facility run jointly by TU Clausthal and the University of Göttingen. Work at SWZ includes development of new mathematical models and simulation methods that can be used to analyse and predict the complex behaviours of cyber-physical systems.

Coming from the fields of computer science, information technology, engineering, mathematics, and management sciences, 21 professors presently collaborate within the Open Cyber-Physical Systems and Simulation research focus area. Their activities concentrate on areas such as production, product development, energy, and mobility. Cyber-physical systems have an important role to play in these fields, which are all key research areas at TU Clausthal. Many projects are run in collaboration with German and international partners comprising universities, research institutes, and commercial businesses.



Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der globalen Vernetzung der Industrie-Produktion – ein Ansatz, der unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ bekannt geworden ist. Die Idee dahinter: Maschinen und Werkstücke sollen miteinander kommunizieren können; dadurch sollen Herstellungsprozesse flexibler, effizienter und weniger fehleranfällig werden. In Zusammenarbeit mit ihren industriellen Partnern leistet die TU so einen wichtigen Beitrag zur Zukunftsfähigkeit des Hochtechnologiestandorts Deutschland.

One particular area of expertise covered is worldwide networking of industrial production – a concept that has come to be known as Industry 4.0. The idea behind this is to have machines and the items that they handle communicate with each other. This will make manufacturing processes more flexible, more efficient, and less error-prone. Together with its industrial partners, TU Clausthal is making an important contribution to the future capability of Germany as a location for high-technology.

■ KONTAKT

Prof. Dr. Jörg Müller
Koordinator
Fon +49 5323 72-7141
E-Mail joerg.mueller@tu-clausthal.de



Forschungszentren Research Centers



Klima und Ressourcen schützen Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Protecting the climate and resources Energy Research Center of Niedersachsen

Der weltweit steigende Energie- und Ressourcenbedarf ist eine der größten Herausforderungen der Zukunft. Fossile Reserven stehen nur noch eine begrenzte Zeit zur Verfügung. Zudem hat der Klimawandel längst begonnen und ist zur Bedrohung für viele Regionen der Erde geworden. Dabei liegt die Lösung auf der Hand: Sonne, Wasser, Wind, Biomasse und Erdwärme liefern genug Energie, um den Bedarf auch in Zukunft zu decken. Die Frage ist nur, wie genau der Umstieg auf die Erneuerbaren gelingen kann. Vor allem die wetter-, jahres- und tageszeitenbedingt schwankenden Stromerträge aus Windkraft- und Solaranlagen sind eine Herausforderung für eine sichere

Rising global demand for energy and resources is one of the biggest challenges of the future. There are only limited reserves of fossil fuels. What is more, climate change is well underway and represents a threat in many parts of the world. The solution is obvious: solar, wind, biomass, geothermal and hydro-power supply enough energy to meet needs into the future. The only issue is how a successful transition to renewables can be achieved exactly. Above all, fluctuations in electricity yields from wind turbines and solar installations caused by the weather or the time of day or year pose a challenge in delivering a reliable supply of power. So how can we cleverly distribute and store



Stromversorgung. Wie also kann die Energie geschickt verteilt und gespeichert werden? Wie können endliche, fossile Rohstoffe möglichst ressourcenschonend und umweltfreundlich gewonnen und verarbeitet werden? Was kann wieder recycelt werden? Welche rechtlichen Aspekte müssen berücksichtigt werden, und wie kann die Energiewende auch wirtschaftlich sinnvoll gestaltet werden?

Antworten auf diese Fragen entwickeln Forscher am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) in Goslar. Das Zentrum ist eine Kooperation der Technischen Universität Clausthal mit der TU Braunschweig und den Universitäten Oldenburg, Hannover und Göttingen. Es wurde 2010 eröffnet und wird vom Land Niedersachsen gefördert. Das Land ist in Deutschland Vorreiter in Sachen Energiewende und deckt schon heute rund 40 Prozent seines Energiebedarfs aus den Erneuerbaren. Das bundesweite Ziel ist es, bis 2050 bundesweit die 80-Prozent-Marke zu erreichen.

Am EFZN arbeiten Wissenschaftler der unterschiedlichsten Disziplinen über ihre jeweiligen Fachgrenzen hinaus transdisziplinär zusammen. Dabei ist das Knowhow von Informatikern, Maschinenbauern, Chemikern und Physikern ebenso gefragt wie jenes von Juristen, Ökonomen, Sozial- und Geisteswissenschaftlern. Es geht dabei zum Beispiel um das Thema Netzarchitektur. Denn damit die Energiewende gelingt, ohne Blackouts zu riskieren, müssen Stromangebot und -nachfrage in allen Netzen stets im Gleichgewicht sein, und das trotz einer zunehmenden Zahl an dezentralen Energieerzeugern mit ihrem zum Teil stark schwankendem Input. Die EFZN-Forscher untersuchen, wie das gehen kann und wie Informationstechnologien dafür genutzt werden können. Eine beson-

energy? How can finite, fossil raw materials be extracted and processed in a way that conserves as many resources as possible and protects the environment as much as we can? What can be recycled again? Which legal aspects need to be taken into consideration and how can the transition to renewables be made economically viable?

Researchers at the Energy Research Center of Niedersachsen (EFZN) in Goslar come up with answers to these questions. This center is a joint project between TU Clausthal, Braunschweig University of Technology and the universities of Oldenburg, Hanover, and Göttingen. It opened in 2010 and is funded by the state of Niedersachsen (Lower Saxony). Within Germany, Lower Saxony is a pioneer in the energy revolution and already meets approximately 40 percent of its energy requirements from renewable sources. At federal level, the aim is to reach the 80-percent mark throughout Germany by 2050.

Researchers from a range of disciplines work at EFZN on a transdisciplinary basis beyond the confines of their own subjects. This approach calls for knowledge input from information scientists, mechanical engineers, chemists, and physicists, as well as from lawyers, economists, social scientists, and arts and humanities scholars. One example of collaboration is on the topic of grid network architecture. For the transition to renewable energy sources to succeed without risking black-outs, the power supply and demand across all power-grid networks needs to be balanced at all times. This is in spite of the fact that the number of decentralized energy providers is increasing who in some cases experience variations in their input power. Researchers at EFZN are investigating the way forward, including the deployment of information technology. One particularly successful innovation from the research team is the Virtual Synchronous Machine (VISMA), which



ders erfolgreiche Innovation der Wissenschaftler ist die virtuelle Synchronmaschine VISMA, die die Aufgabe tonnenschwerer Turbinen eines konventionellen Kraftwerks übernehmen und die Residuallast eines Netzes regeln kann. Für die neue Technologie, aus der in Zukunft auch regenerative Speicherkraftwerke entstehen sollen, ist ein weltweites Patent erteilt worden.

So sind auch Energiespeicher Gegenstand der Forschung am EFZN, denn die Palette der neuen Speichertechnologien ist breit und reicht von Untertage-Pumpspeichern über Synthesegas/Druckluftspeicher, Batterien, supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) bis zu Superkondensatoren. Mit überschüssigem Strom lässt sich außerdem aus Wasser Wasserstoff und aus diesem wiederum Erdgas herstellen. Beide Gase könnten in Kavernen gelagert, bei Bedarf entnommen und dann wieder in

can take on the task of turbines weighing several tonnes in a conventional power station and regulate the grid residual load. There is a worldwide patent for this new technology, which in future should result in power plants that can store energy from renewable sources.

Energy storage is thus another subject of research at EFZN. There is a broad variety of storage technologies ranging from underground pumped storage to syngas/compressed-air energy storage, batteries, superconducting magnetic energy storage (SMES) through to supercapacitors. Surplus electricity can also be used to make hydrogen from water and so to produce natural gas. Both gases can be stored in caverns, extracted when needed

Strom oder Wärme verwandelt werden. Auch Wärme aus solar erhitztem Wasser lässt sich in entsprechend isolierter Umgebung oder auch in tiefen geothermisch genutzten Reservoiren gut speichern. Welche Speichervarianten sich für welche Anwendungsfälle eignen, untersuchen die EFZN-Wissenschaftler in verschiedenen Projekten. Und sie entwickeln Strategien für neue Speichermöglichkeiten. Zum Beispiel haben sie schon gezeigt, dass man keine Gebirgslandschaft zerstören muss, um ein Pumpspeicherkraftwerk zu bauen. Pumpspeicher können auch unter Tage in still gelegten Bergwerken errichtet werden.

Die EFZN-Forscher beschäftigen sich außerdem intensiv mit der Tiefengeothermie. Kraftwerke, die mit Erdwärme arbeiten, könnten künftig konventionelle Kraftwerke direkt ersetzen und wetterunabhängig je nach Bedarf Strom liefern. Um allerdings die Wärme auch aus mehreren Tausend Metern Tiefe fördern und dort Wärmtauscher bereitstellen zu können, müssen erst noch geeignete Bohrtechniken entwickelt werden. Dies geschieht am Drilling Simulator Celle, einer weltweit einzigartigen Forschungsanlage unter Federführung des EFZN. Den Grundstein für die Methode haben die Wissenschaftler im Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik gelegt. Nicht zuletzt wird daran gearbeitet, überschüssige regenerative Energie als Wärme in tiefen geologischen Schichten zwischenspeichern, um sie bei Bedarf über geothermische Kraftwerke wieder nutzbar machen zu können.

Das EFZN testet außerdem, wie die Netze der Zukunft funktionieren könnten. Sie untersuchen unter anderem, was passiert wenn Haushalte zunehmend mit Solaranlagen ausgestattet werden und immer mehr Menschen Elektroautos fahren. Auch wie es sich sicherheitstechnisch



and then converted into electricity or heat. Heat from water heated by solar thermal can also be stored in appropriately insulated environments or in deep reservoirs used for geothermal heating. As part of various projects, academics at EFZN are exploring which types of storage are suitable for which applications. And they are developing strategies for new storage options. For example, they have already demonstrated that it is not necessary to destroy mountainous regions in order to build a pumped-storage power plant. Pumped-storage facilities can even be constructed underground in disused mines.

The researchers at EFZN are also exploring deep geothermics. In future, power plants that work with geothermal energy could directly replace conventional power plants and supply electricity on demand, regardless of the weather conditions. To bring heat up from depths of several thousand meters and to have heat exchangers



auswirkt, wenn Solaranlagen mit Batteriespeichern kombiniert werden und Verbraucher die solar erzeugten Energieeinträge selber nutzen, ist Gegenstand der Forschung.

Nicht zuletzt sind die EFZN-Wissenschaftler auch international aktiv. Gemeinsam mit Wissenschaftlern aus den Niederlanden, Norwegen und Schottland entwickeln sie Strategien, das Potenzial der Nordseeregion für die Energieversorgung von morgen zu erschließen, mit einer Kombination aus Offshore-Windparks und norwegischen Wasserspeichern und dem Know-how aller beteiligten Länder. Das Ziel der Zusammenarbeit ist eine Lösung für eine zukünftige umwelt- und klimafreundliche Energieversorgung der Nordseeanrainer-Staaten.

■ KONTAKT

Geschäftsstelle

Fon +49 5321 3816-8000

E-Mail geschaeftsstelle@efzn.de

Web www.efzn.de

in place, however, it is first necessary to develop appropriate drilling techniques. This work takes place at the drilling simulator in Celle, a unique research facility managed by EFZN. Academics laid the foundation for the methodology as part of a geothermal research association. Work is also being carried out into storing surplus energy from renewable sources on an interim basis as heat in deep geological layers. This would enable it to be used again on demand via geothermal power plants.

EFZN is also testing how the grid networks of the future might function. Among other aspects, they are examining what will happen as households are increasingly equipped with solar installations and more and more people drive electric cars. The center's research also explores the effects of combining solar installations with battery storage facilities and what happens when consumers use the energy inputs generated by solar power themselves.

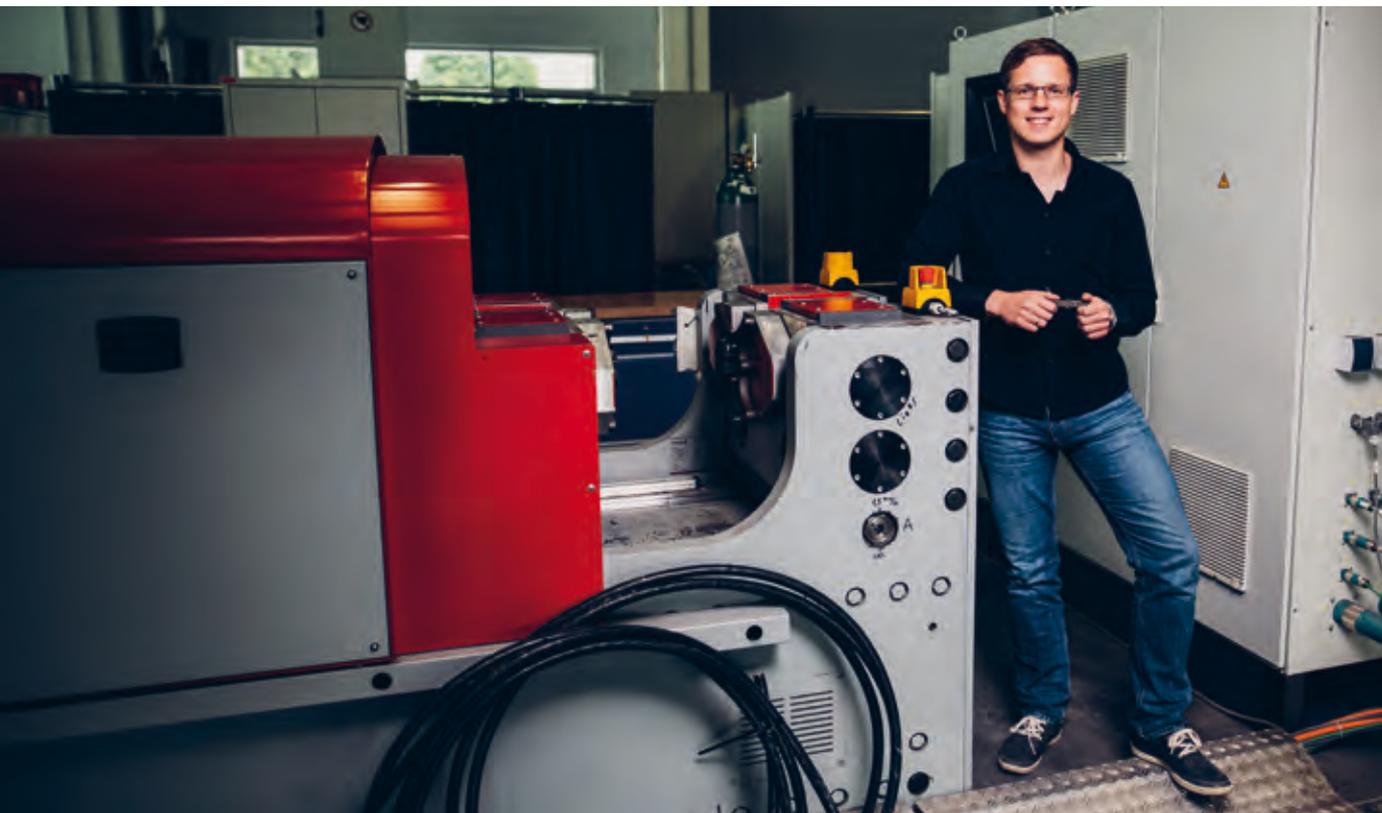
EFZN's academics have an international profile and are devising strategies in cooperation with academics from the Netherlands, Norway, and Scotland to tap into the potential of the North Sea region to meet future energy needs. This project is based on a combination of offshore wind farms and Norwegian reservoirs and applies the expertise of all the countries involved. The aim is to find a solution that will supply the states bordering the North Sea with energy in future that is both environmentally and climate-friendly.

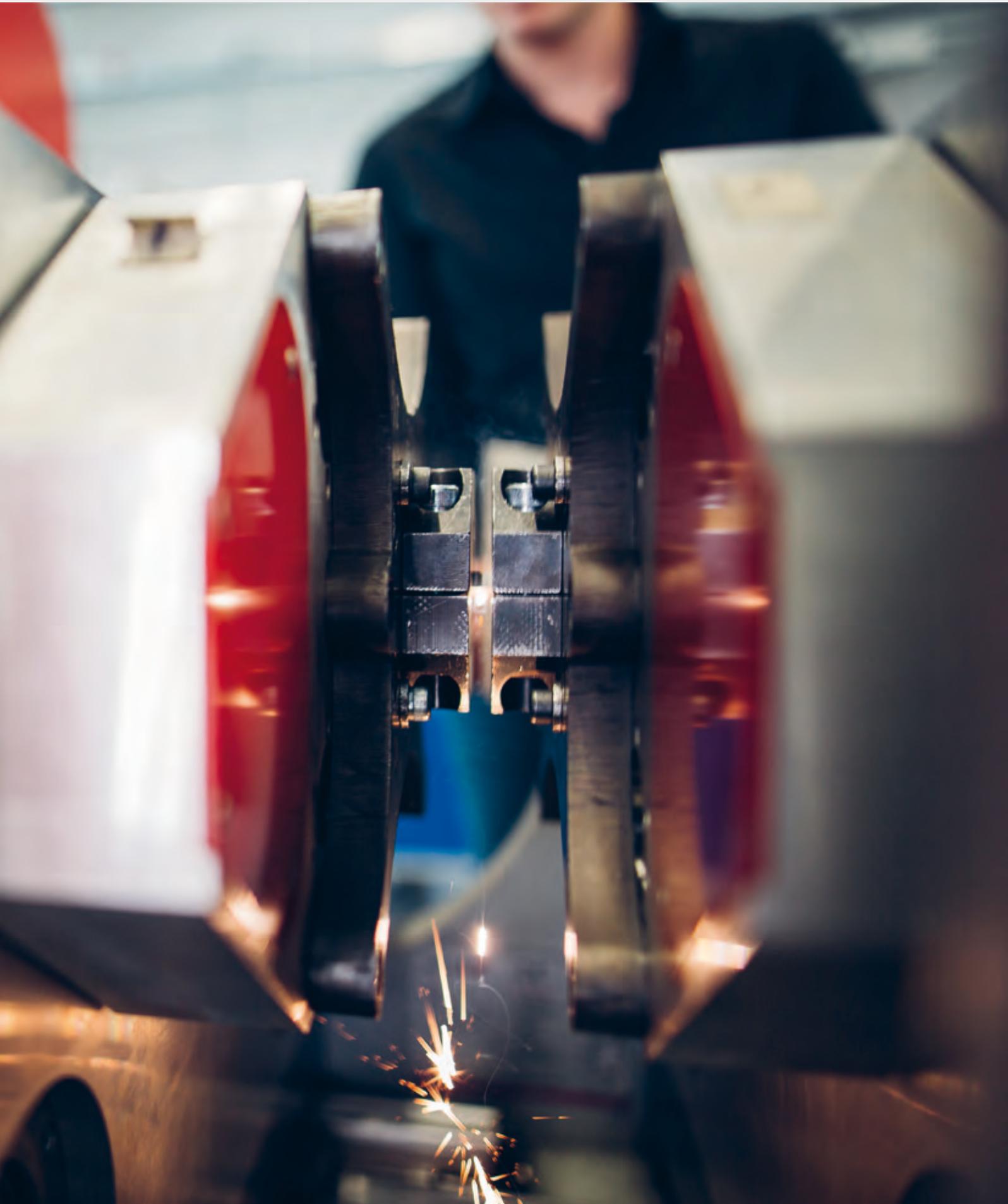
Mit Werkstoffinnovationen in die Zukunft Clausthaler Zentrum für Materialtechnik

Innovative materials for the future Clausthal Center of Material Technology

Ganz gleich ob es um Autos, Computer oder Windräder geht, um Maschinen oder ganze Gebäude, innovative Materialien sind für die Technologien von morgen unverzichtbar. Auch für die Medizin spielen neue Werkstoffe eine bedeutende Rolle. Die zugrunde liegenden Materialwissenschaften sind seit jeher Kernkompetenzen der TU Clausthal und verlangen Know-how aus den unterschiedlichsten Disziplinen, von der Chemie über die Physik bis zu den Ingenieurwissenschaften. Seit 2006 bündelt und fördert das Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM) die Expertise der TU-Wissenschaftler auf diesem Gebiet. Ansässig ist das Zentrum seit Dezember 2013 in einem Forschungsneubau im Clausthaler Campusgebiet.

From cars, computers, and wind turbines to machinery and even whole buildings – innovative materials are vital for future technologies. New materials have an important role to play in medicine, too. The underlying materials sciences has always been a core competence at TU Clausthal and call for knowledge from diverse disciplines ranging from chemistry and physics to engineering. From 2006 onwards, the expertise of TU Clausthal's academics in this area has been pooled into and supported by the Clausthal Center of Material Technology (CZM). The Center has been based in a new research facility on the Clausthal campus since December 2013. Modern laboratories, offices and a technical center were built at a cost of





Für annähernd 14 Millionen Euro, finanziert insbesondere aus Mitteln des Landes und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), sind moderne Labore, Büros und eine Technikumshalle entstanden.

Im Fokus des Zentrums stehen sogenannte Multimaterialsysteme. Dabei gilt es, eigentlich inkompatible Werkstoffgruppen, wie Metalle, Kunststoffe oder Keramiken, zu neuen Verbundwerkstoffen zu kombinieren. Auch die Beschichtung von Materialien, um funktionale Oberflächen zu schaffen, zählt dazu. So können Strukturen für einen Einsatz in innovativen und umweltfreundlichen Produkten maßgeschneidert werden. Das Ziel der CZM-Forscher ist, besonders leistungsfähige Werkstoffe zu entwickeln und diese auch möglichst zeitnah und reibungslos in die Praxis zu bringen. Dazu arbeiten sie entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Herstellung der Materialien über Verfahren, mit denen sich diese verarbeiten und formen lassen, bis hin zur Entwicklung geeigneter Prüfverfahren und Qualitätssicherungssysteme. Nicht zuletzt haben die Wissenschaftler die weltweit immer knapper werdenden Ressourcen im Visier, versuchen diese möglichst effizient und wirtschaftlich einzusetzen und, wo es möglich ist, zu recyceln.

Die Palette an Forschungsthemen ist breit gefächert. Auf dem Gebiet der Verkehrstechnik etwa analysieren und entwickeln die CZM-Forscher Fügeverfahren, mit denen Stähle mit unterschiedlichen Mikrostrukturen und Korrosionsschutzschichten verbunden werden können. In diesem Zuge kreieren sie auch neuartige Beschichtungen, die die Verarbeitungs- und Korrosionseigenschaften noch verbessern. Verbundstoffe aus Kunststoffen und Kohlefasern, die für den Leichtbautrend der Automobilindustrie unverzichtbar sind, stehen ebenfalls auf der Agenda. Die leichten wie stabilen Materialien helfen, den Kraftstoffverbrauch zu senken und

nearly 14 million euros, which was financed by the state of Lower Saxony and the European Regional Development Fund (ERDF).

The facility's work focuses on what are known as multi-material systems. This involves combining what are actually incompatible groups of materials – such as metals, plastics or ceramics – to form new composite materials. It also includes layering materials to create functional surfaces. In this way structures can be customized for use in innovative and environmentally friendly products. Researchers at CZM aim to develop exceptionally high-performance materials and to put them into practical usage as swiftly and smoothly as possible. To achieve this, they are active along the entire value-added chain from manufacturing materials to the methods associated with processing and forming them through to devising suitable testing procedures and quality assurance systems. Lastly, the academics keep in mind resources that are becoming increasingly scarce worldwide and attempt to use them as efficiently and economically as possible, recycling where possible.

The portfolio of research topics is broad-based. In the field of transport engineering, for example, researchers at CZM are analysing and developing joining techniques that enable steels with different microstructures and anti-corrosion coatings to be bonded. In this context, they are also creating innovative coatings that further improve working properties and corrosion resistance. Composite materials made from plastics and carbon-fibre are indispensable in the automotive industry given the trend towards lightweight design and these form another core area of research at the Center. Lightweight yet rugged materials help to reduce fuel consumption, while at

zugleich die Unfallsicherheit zu verbessern. Solche energieeffizienten Leichtbaukonzepte entstehen am CZM nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch für Flugzeugtriebwerke. Die Wissenschaftler entwickeln neuartige Fügeprozesse, mit denen sich integrale Systeme aus Rotorscheibe und Verdichterschaufeln, sogenannte Blisks (Blade integrated Disk), fertigen lassen. Die Triebwerksbauteile aus Titan- und Nickellegierungen lassen sich hierdurch besonders kostengünstig herstellen und ressourcenschonend reparieren.

Auch für die Tiefkühltechnik, die im Lebensmittelbereich und in der Medizintechnik zum Einsatz kommen kann, haben die Clausthaler Forscher schon Materialien mit einer maßgeschneiderten Kombination an Eigenschaften sowie den dafür geeigneten industriellen Fer-

the same time improving accident safety. CZM also creates energy-efficient lightweight design concepts for aircraft engines, not just the automotive industry. The scientists develop innovative joining processes that enable integral systems to be made comprising a rotor disk and compressor blades. These are known as blisks (blade integrated disks). These engine components made of titanium and nickel alloys can thus be produced cost-effectively and resource-conserving when making repairs.

Researchers in Clausthal have already developed materials for cryoengineering (deep freezing technology for food and medical applications) featuring a customized combination of properties, as well as suitable related industrial manufacturing processes. Insulating panels are coated with fibre composite materials rather than steel. These materials are just as robust, but have better insulation properties.



tigungsprozess entwickelt. Die Isolierpaneele sind anstelle von Stahl mit Faserverbundstoffen ummantelt. Diese Stoffe sind ähnlich stabil, isolieren aber besser.

Neben Metallen und Kunststoffen sind Keramiken ein wichtiges Thema des CZM. Sie können beispielsweise als Sensoren in Faserverbundstoffe integriert werden und dort automatisch Materialschäden detektieren. Auch Glas könnte künftig ganz neue Funktionen übernehmen. So entwickeln die Wissenschaftler Herstellungsverfahren für innovative Fenstergläser, die sich zum Beispiel bei Sonnenlicht automatisch abdunkeln oder besonders schallisierend wirken.

Entscheidend für die Eigenschaften von Werkstoffen sind oft deren Oberflächen. Gerade in Maschinen ist der Oberflächenverschleiß von Bauteilen ein großes Problem. Durch solche

Ceramics are another important topic at CZM besides metals and plastics. These can be integrated into fibre composite materials as sensors, for example, in order to detect damage to the material automatically. In future, glass may likewise fulfil completely new functions. Researchers are developing manufacturing processes for innovative window glass, which automatically darkens in sunlight or exhibits exceptional sound-insulating properties, for instance.

Finishes often play a crucial role when it comes to material properties. Surface wear on components is a major problem in machinery especially. In Germany alone, such signs of wear account for billions of euros' worth of damage each year. Using innovative materials and coating methods, scientists at CZM are there-



Abnutzungserscheinungen werden allein in Deutschland jedes Jahr Schäden in Milliardenhöhe verursacht. Mit innovativen Materialien und Beschichtungsverfahren kreieren die CZM-Wissenschaftler deshalb besonders verschleißbeständige Werkstoffoberflächen. Auch in der Medizintechnik spielt das eine wichtige Rolle, denn Implantate wie künstliche Knie- oder Hüftgelenke sollten vor allem im Kontaktbereich der Gelenkpfannen so wenig wie möglich verschleifen. Zudem müssen sie bioverträglich sein, damit sie vom Körper gut angenommen werden. Beide Eigenschaften können durch Oberflächenmodifikationen gezielt eingestellt werden. Um hier die besten Lösungen zu finden, arbeiten die CZM-Forscher intensiv mit Medizinern zusammen. Daneben sind Oberflächen auch der Schlüssel, um selbst reinigende Dachziegel herzustellen. Nanopartikel aus Titandioxid werden hierzu so modifiziert, dass damit Ziegelbeton beschichtet werden kann. Aktiviert durch Sonnenlicht kann so Moos- und Algenbewuchs unterbunden werden.

Nicht zuletzt sind endliche Ressourcen ein Kernthema am CZM. Die Naturwissenschaftler und Ingenieure entwickeln neue Legierungskonzepte und Herstellungsverfahren für Verschleißschutzbeschichtungen, bei denen seltene und teure Metalle wie Kobalt oder Molybdän durch Eisen und Titan ersetzt werden können. Gleichzeitig wird der Fokus auf Recycling gerichtet. Schon in der Entwicklungsphase neuer Werkstoffe berücksichtigen die Forscher, dass diese sich nach Gebrauch möglichst leicht in einzelne Komponenten auftrennen und möglichst oft wiederverwenden lassen. Dabei sollen nicht nur wertvolle Seltenerdmetalle, sondern möglichst alle Ressourcen in energieeffizienten Prozessen zurückzugewonnen werden.

■ KONTAKT

Geschäftsstelle

Fon +49-5323 72-3330

E-Mail sekretariat@czm.tu-clausthal.de

Web www.czm.tu-clausthal.de

fore creating material surfaces that exceptionally resistant to wear. This quality plays a key role in medical engineering, too, because it is important that implants such as artificial knee and hip joints exhibit as little wear as possible, particularly in the area that is in contact with the socket. They also need to be biocompatible so that they are accepted by the body. Both these properties can be achieved by design by making surface modifications. To find the best solutions in these scenarios, researchers at CZM are working closely with physicians. In another field, coatings are the key to producing self-cleaning roof tiles. The researchers modify titanium dioxide nanoparticles in order to coat concrete tiles. When activated by sunlight, the growth of moss and algae can be suppressed.

Finite resources are another core topic for CZM. Natural scientists and engineers are developing new concepts for alloys and production processes for wear-resistant coatings, which enables scarce and costly metals such as cobalt or molybdenum to be replaced with iron and titanium. This simultaneously requires a focus on recycling. Right from the development phase for new materials, researchers take into account that it needs to be easy to separate them into their separate components and to re-use them as many times as possible. The intention is to recover all resources if possible by means of energy-efficient processes, not just valuable rare-earth metals.

Simulieren statt Probieren Simulationswissenschaftliches Zentrum

Replacing trial and error with simulation Simulation Science Center

„Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen“, soll der dänische Physiker Niels Bohr einst gesagt haben. Dies verhält sich heute etwas anders. Dafür sorgen zunehmend Computersimulationen, die mittlerweile als unverzichtbare Werkzeuge für fast jede technische Wissenschaftsdisziplin gelten. Sie können Experimente ersetzen, die teuer, gefährlich, unethisch oder schlicht unmöglich sind, und helfen zum Beispiel bei der Entwicklung neuer Flugzeuge, Autos und Materialien, bei Crashtests und Vorhersagen zum Klimawandel. Zudem sind sie ein wertvolles Instrument der Grundlagenforschung und können Erklärungen für bisher unverstandene Prozesse liefern. Um der enormen Entwicklung innerhalb der computergestützten Forschung Rechnung zu tragen, wurde an der TU Clausthal bereits 2003 das Simulationswissenschaftliche

“It is exceedingly difficult to make predictions, particularly about the future,” said the Danish physicist Niels Bohr. The situation is somewhat different these days thanks to computer simulation. Increasingly, simulations have become an indispensable tool in almost every scientific discipline. They can replace experiments which are either expensive, dangerous, unethical or simply impossible to carry out and help when developing new aircraft, cars and materials, in crash tests and to predict climate change, for example. Simulation is also an invaluable instrument in fundamental research and can provide explanations for processes that were not previously understood. In order to stay abreast of huge changes in computer-aided research, the Simulation Science Center was established at TU Clausthal back in 2003. In January 2013, researchers at the universities of Clausthal and



Zentrum gegründet. Im Januar 2013 bündelten die Forscher der Universitäten in Clausthal und Göttingen ihre Aktivitäten auf diesem Gebiet dann in einer gemeinsamen, hochschulübergreifenden Einrichtung.

Gefördert vom Land Niedersachsen arbeiten hier rund 20 Professoren und ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zusammen. Das Themenspektrum ist breit und jedes Projekt eine transdisziplinäre Aufgabe. Dabei sind nicht nur Mathematiker und Informatiker gefragt, sondern auch Ingenieure, Chemiker oder Ökonomen, um nur einige Beispiele zu nennen. Gemeinsam entwickeln sie Modelle und vielschichtige Computerprogramme, die zeigen, was passiert, wenn sich in hoch komplexen Systemen Randbedingungen ändern. Im Fokus des Simulationswissenschaftlichen Zentrums Clausthal-Göttingen (SWZ) stehen vor allem drei Forschungsfelder: die Simulation und Optimierung von Netzen, die Simulation von Materialien und verteilte Simulation.

Im ersten Schwerpunkt etwa haben die Wissenschaftler unter anderem die Pünktlichkeit von Zügen und Flugzeugen im Visier. Denn hinter fast jeder Verspätung steckt ein komplexes Geschehen. Ein Unwetter auf einer Zugstrecke, ein Unfall oder eine ungeplante Verzögerung bei der Gepäckabfertigung am Flughafen kann die ausgeklügelte Logistik zum Kippen bringen und Kettenreaktionen in Gang setzen, die sich auf andere Bereiche fortpflanzen und so weitere Verspätungen nach sich ziehen. Das strapaziert nicht nur die Geduld vieler Reisender, sondern kostet auch eine Menge Geld und schadet dem Klima. Denn Züge und Flugzeuge, die warten oder Umwege nehmen müssen, verbrauchen unnötig Energie.

Göttingen combined their activities in this area to form a joint cross-university facility.

Some 20 professors and their staff work here funded by the state of Lower Saxony. The spectrum of topics is broad and each project is a transdisciplinary endeavour. This calls for engineers, chemists, and economists to work alongside mathematicians and information scientists, to name just a few examples. Together they develop models and multi-layer computer programs to show what happens when boundary conditions change in highly complex systems. The Simulation Science Center Clausthal-Göttingen (SWZ) focuses primarily on three areas of research: the simulation and optimization of networks, materials simulation, and distributed simulation.

One of the issues being examined by researchers within the first of these research areas is the punctuality of trains and aeroplanes. Almost every delay involves complex situations: a storm along the railway line, an accident or an unscheduled delay during baggage handling at the airport can cause sophisticated logistics to collapse and set chain reactions in progress, which spread to other areas and thus entail other delays. Not only does this try the patience of many travellers, it also costs a great deal of money and harms the climate. This is because trains and aircraft that need to wait or make detours consume unnecessary energy.

Simulation scientists from Clausthal and Göttingen are developing mathematical models to describe complex transport networks as part of projects with Lufthansa and public transport providers. Using simulations that build upon these models, scientists are able to go through different scenarios and discover which methods help to avoid subsequent delays and how effective they are. For example, the effects of additional buffer times or capacity at different points in the networks can be clarified, as well as what can be achieved by making changes to the timetable. The use of these types of simu-

In Projekten mit der Lufthansa und dem öffentlichen Personennahverkehr entwickeln die Simulationsforscher aus Clausthal und Göttingen mathematische Modelle, mit denen sich die komplexen Verkehrsnetze beschreiben lassen. Mit den Simulationen, die darauf aufbauen, können sie dann verschiedene Szenarien durchspielen und herausfinden, welche Mittel gegen Folgeverspätungen helfen und wie effektiv diese sind. Geklärt werden kann zum Beispiel, was sich mit größeren Zeitpuffern oder Kapazitäten an unterschiedlichen Stellen der Netze oder mit geänderten Fahrplänen erreichen lässt. Auch die Frage, wann es sinnvoll ist, auf einen verspäteten Zubringerzug zu warten, lässt sich mithilfe solcher Simulationen beantworten.

Zum Forschungsfeld „Simulation und Optimierung von Netzen“ zählen auch mathematische Modelle für Fabriken, in denen ebenfalls die unterschiedlichsten Prozesse miteinander verknüpft sind, von der Anlieferung, über die Lagerlogistik bis zur eigentlichen Fertigung. Schließlich kann eine Lieferverzögerung oder ein Ausfall einer Maschine schlimmstenfalls die gesamte Produktion lahm legen. Computersimulationen helfen, Lösungen für solche Szenarien zu finden.

Im zweiten Forschungsfeld des Zentrums geht es um die Simulation von Materialien und deren Eigenschaften. Dies ist ein bedeutendes Zukunftsthema, geht doch der Trend eindeutig zu Werkstoffen mit maßgeschneiderten, immer spezielleren Fähigkeiten, sei es für Autos, Windräder, Batteriespeicher oder in der Medizin, um nur einige Beispiele zu nennen. Um hier quantitative Aussagen treffen zu können, arbeiten die SWZ-Wissenschaftler vor allem mit Multiskalen-Modellen. Denn ob Stahl, Beton oder Kunststoffe, alle Materialien bestehen aus unzähligen winzigen Molekülen, diese aus noch kleineren Atomen, die wiederum aus Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen aufgebaut sind. Zudem wechselwirken die Teilchen nicht nur miteinander, sondern auch mit äußeren Faktoren wie Temperatur, Druck,



simulation can also be used to indicate whether it makes sense to wait for a delayed connecting train.

The simulation and optimization of networks likewise involves mathematical models, this time for factories where a broad range of processes are interlinked – from delivery and warehouse logistics through to the manufacturing itself. In the worst case, a delivery delay or machine downtime can paralyse the entire production line. Virtual pretending helps to find solutions in these kinds of scenarios.

The Center's second area of research is the simulation of materials and their properties. From cars and wind turbines to battery storage or medical applications, to name just a few examples, the trend is clearly towards materials with customized, increasingly specialized



Magnetfeldern oder Licht. All das können Forscher auf den verschiedenen Ebenen in unterschiedlichen Genauigkeiten simulieren. Damit daraus ein Gesamtbild entsteht, gilt es zudem, die Simulationen in den verschiedenen Ebenen intelligent miteinander zu verknüpfen. Erst dann lässt sich zum Beispiel genau vorhersagen, wie effizient technische Neuerungen bei Gas- oder Geothermiebohrungen funktionieren.

Das dritte Forschungsfeld „Verteilte Simulation“ ergibt sich quasi von selbst. Um hoch komplexe Abläufe zu simulieren, sind riesige Rechnerkapazitäten nötig. In Deutschland sorgt dafür eine pyramidenartige Struktur von Rechnersystemen, an deren Spitze in den drei Bundeshöchstleistungsrechenzentren einige extrem leistungsfähige Computer stehen, die jeweils aus mehr als hunderttausend Prozessoren bestehen. Weiter unten in der Pyramide sind die regionalen Rechenzentren angesiedelt mit vielen kleineren Computern, die aber immer noch ganze Maschinsäle füllen. Die Basis der Pyramide wird von noch mehr noch kleineren Rechnern gebildet, die zum Beispiel in Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Rechenzentren stehen und sich nur zeitweise im Einsatz befinden. Auf diese bestehenden Kapazitäten gilt es, die hoch komplexen Simulationsberechnungen zu verteilen. Die größte Herausforderung besteht dabei darin, die Arbeit der vielen Prozessoren zu managen und für eine effiziente Kommunikation zu sorgen bzw. das Problem so in Teilprobleme zu zerlegen, dass es überhaupt verteilt bearbeitet werden kann.

capabilities and this is an important issue for the future. In order to make quantitative statements in relation to this topic, scientists at SWZ mainly work with multi-scale models. Whether steel, concrete or plastics, all materials consist of countless tiny molecules, which are made up of even smaller atoms. These in turn are made of elementary particles such as electrons, protons, and neutrons. Particles not only interact with each other, they are also affected by external factors like temperature, pressure, magnetic fields or light. Researchers are able to simulate all this at different levels to various accuracies. To enable an overall picture to be formed, simulations at the different levels are combined in an intelligent way. Only then is it possible to predict with any precision how efficiently technical innovations in gas or geothermal drilling will perform.

The third area of research, distributed simulation, has more or less emerged of its own accord. Simulating highly complex processes requires enormous computer capacity. In Germany, there is a pyramid-like structure of computer systems with three federal sites at the very top housing some extremely large computers. Each one of these consists of more than a hundred thousand processors. Further down the pyramid are regional data centers containing many smaller computers, but which still fill entire machine shops. The base of the pyramid comprises more smaller computers such as those in companies, research institutes and data centers and which are only in use sometimes. It is necessary to distribute highly complex simulation calculations across this existing capacity. The biggest challenge lies in managing the work of the many processors and making sure that communication is efficient, i.e. breaking down the problem into sub-problems so that it can even be dealt with in the first place.

■ KONTAKT

Geschäftsstelle

Fon +49 5323 72-2966

E-Mail alexander.herzog@tu-clausthal.de

Web www.simzentrum.de





Forschungskooperationen Collaborative Research Projects



Kraftpakete unter Strom Batterie- und Sensoriktestzentrum

Electrical powerhouses Battery and Sensor Test Center

Stromspeicher sind unverzichtbare Komponenten für die Energiewende. Doch konventionelle Batterien eignen sich dafür nur bedingt. Für Elektrofahrzeuge zum Beispiel braucht man kleine, leichte Batterien mit sehr hohen Kapazitäten, die selbst für längere Autobahnfahrten genügend Strom liefern und sich möglichst schnell und einfach laden lassen sollen. Auch für Solaranlagen und Windparks gilt es optimale Batteriesysteme zu finden, die wetter- und tageszeitenbedingte Stromspitzen puffern und dabei möglichst wartungsarm und preiswert sind. Und ganz gleich für welchen Einsatz eine Batterie konzipiert ist: Sie muss sicher sein und darf unter Extrembedingungen nicht unkontrolliert in Flammen aufgehen.

Chemiker, Physiker und Ingenieure am Batterie- und Sensoriktestzentrum (BST) in Goslar entwickeln die erforderlichen Technologien und Testmethoden dafür. Im Zentrum, das 2014 gegründet wurde, arbeiten Wissenschaftler des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), der TU Clausthal und des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts (HHI) eng zusammen. Auf den 1.500 Quadratmetern des Zentrums ist zudem Platz für junge Unternehmen. Die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft an einem Ort soll den Weg zu marktreifen Produkten beschleunigen.

Energy storage systems are an essential component of the energy revolution. Unfortunately, conventional batteries are not ideally suited to the task. Electric vehicles, for example, need small, light batteries with very high capacity. They also need to deliver sufficient power for a long motorway journey and recharging must be as quick and simple as possible. We also need to create optimized batteries for solar power plants and wind farms. These batteries should provide a buffer during the energy peaks that occur with the weather and time of day, as well as being low-maintenance and cost-effective. Regardless of the purpose that a battery is designed for, it must always be safe and must not burst into flames, even under extreme conditions.

At the Battery and Sensor Test Center in Goslar (BST), chemists, physicists, and engineers are developing the technologies and test methods that are needed to achieve these aims. The Center, founded in 2014, is a close collaboration between researchers from the Energy Research Center of Niedersachsen (EFZN), TU Clausthal, and Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (HHI). The 1,500-square-meter facility is also a home to start-up companies. Collaboration between science and commerce in the same location can help accelerate products on the road to market readiness.



Die Forscher arbeiten dabei unter anderem an Metall-Luft Batterien, die vor allem der Elektromobilität zum Durchbruch verhelfen sollen. Diese Batterien brauchen im Gegensatz zu den heute in Elektro- und Hybridautos eingebauten Lithiumakkus keine voluminöse, Sauerstoffgas speichernde Elektrode. Stattdessen ziehen sie den Sauerstoff aus der Umgebungsluft und geben ihn beim Laden wieder ab. Weniger Volumen bedeutet eine höhere Energiedichte und diese wiederum höhere Reichweiten. Das größte Problem dieser „atmenden“ Batterien ist zurzeit, dass sie sich beim Entladen chemisch verändern und sich dann nicht so ohne weiteres wieder aufladen lassen.

Auch die aktuellen Ladetechnologien sind nicht optimal. Das Laden dauert schlicht zu lange. Lädt man eine Batterie jedoch zu schnell, kann sie zu warm werden. Dann leiden vor allem die Elektrodenmaterialien, und es bilden sich Gase, die die Batterie im Extremfall bersten las-

One technology of interest for the researchers is metal-air batteries, which it is hoped can lead to breakthroughs, particularly for electromobility. Unlike the lithium-based rechargeable batteries found in electric and hybrid cars today, these batteries do not require bulky oxygen storage electrodes. Instead, they draw oxygen from the surrounding air, which they release again during recharging. Less volume translates into higher energy density, which in turn means better vehicle range. Currently, the biggest problem with these „breathing“ batteries is that they undergo chemical changes when they discharge, which means they are not straightforward to recharge.

sen. Die BST-Wissenschaftler arbeiten deshalb unter anderem mit einer Flüssigkeitskühlung. Beim Optimieren der Schnellladeströme hilft außerdem eine am HHI entwickelte faseroptische Sensorik, die nicht nur die Temperaturen an ganz vielen Stellen in der Batterie misst, sondern auch erkennt, wenn sich eine Batterie durch hohe Gasdrücke zu stark ausbeult.

Mit der gleichen Glasfasersensorik testen die Forscher außerdem Batterien unter Extrembedingungen. Was passiert, wenn beispielsweise eine Batterie mit einer elektrischen Leistungsentnahme bis zu 1000 Kilowatt belastet wird, was wenn bei einem Kurzschluss bis zu 10.000 Ampere Strom fließen oder wenn es brennt? Und welche Materialien, zum Beispiel Zwischenlagen aus Mineralfasern und Granulate, können hier helfen? Der Zentrumspartner Stöbich Brandschutz etwa hat innovative Mineralien entwickelt, die überschüssige Wärme chemisch speichern und so unschädlich machen können. Und auch für den Brandfall suchen die BST-Wissenschaftler nach Lösungen. In enger Zusammenarbeit mit der Feuerwehr optimieren sie die Löschmethoden für die oft brisanten Batteriebrände.



Existing recharging technology is far from ideal either. It simply takes too long. If you try and charge a battery too quickly, then it may get too hot. This leads to damage, primarily in the electrode materials, and causes gases to form, which in extreme cases can lead to batteries bursting. At BST, researchers are investigating liquid cooling, alongside other options. A special fibre-optic sensor developed at HHI is also useful for optimizing the rapid-charge current. This not only measures temperatures at several places in the battery, but also detects if the battery begins to bulge excessively due to high gas pressure.

Using the same fibre-optic sensor, researchers are also able to test the behaviour of batteries under extreme conditions. What happens, for example, when a battery is overloaded with high power drain up to 1000 kilowatts? What if it is short circuited, causing up to 10,000 amps of current to flow? Or what if the battery is in a fire? And which materials, for example intermediate layers of mineral fibres and granules, could help here? Stöbich Fire Protection, a partner at the Center, has developed innovative materials that can chemically store excess heat, thereby removing the risk associated with it. BST researchers are also looking at solutions for situations involving fire. Working closely with the fire service, they are optimizing methods for extinguishing battery fires, which are often volatile.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
 Koordinator Batteriesysteme
 Fon +49 5321 3816-8005
 E-Mail hans-peter.beck@tu-clausthal.de

Prof. Dr. Wolfgang Schade
 Koordinator Sensorik
 Fon +49 5321 3816-8410
 E-Mail wolfgang.schade@tu-clausthal.de

Bohren für die Zukunft Drilling Simulator Celle

Drilling for the future Drilling Simulator Celle

Geothermie kann für die Energieversorgung der Zukunft eine ganz besondere Rolle spielen, denn gegenüber Wind- und Sonnenenergie kann sie unabhängig von Wetter, Jahres- oder Tageszeit genutzt werden. Allerdings muss man in vielen Regionen sehr tief bohren, um in ausreichend warme Zonen vorzudringen. In Niedersachsen zum Beispiel sind es zwischen 4.000 und 6.000 Meter. Solche Bohrungen sind aufwändig und sehr teuer. Zurzeit machen sie etwa 80 Prozent der Investitionskosten für ein geothermisches Kraftwerk aus.

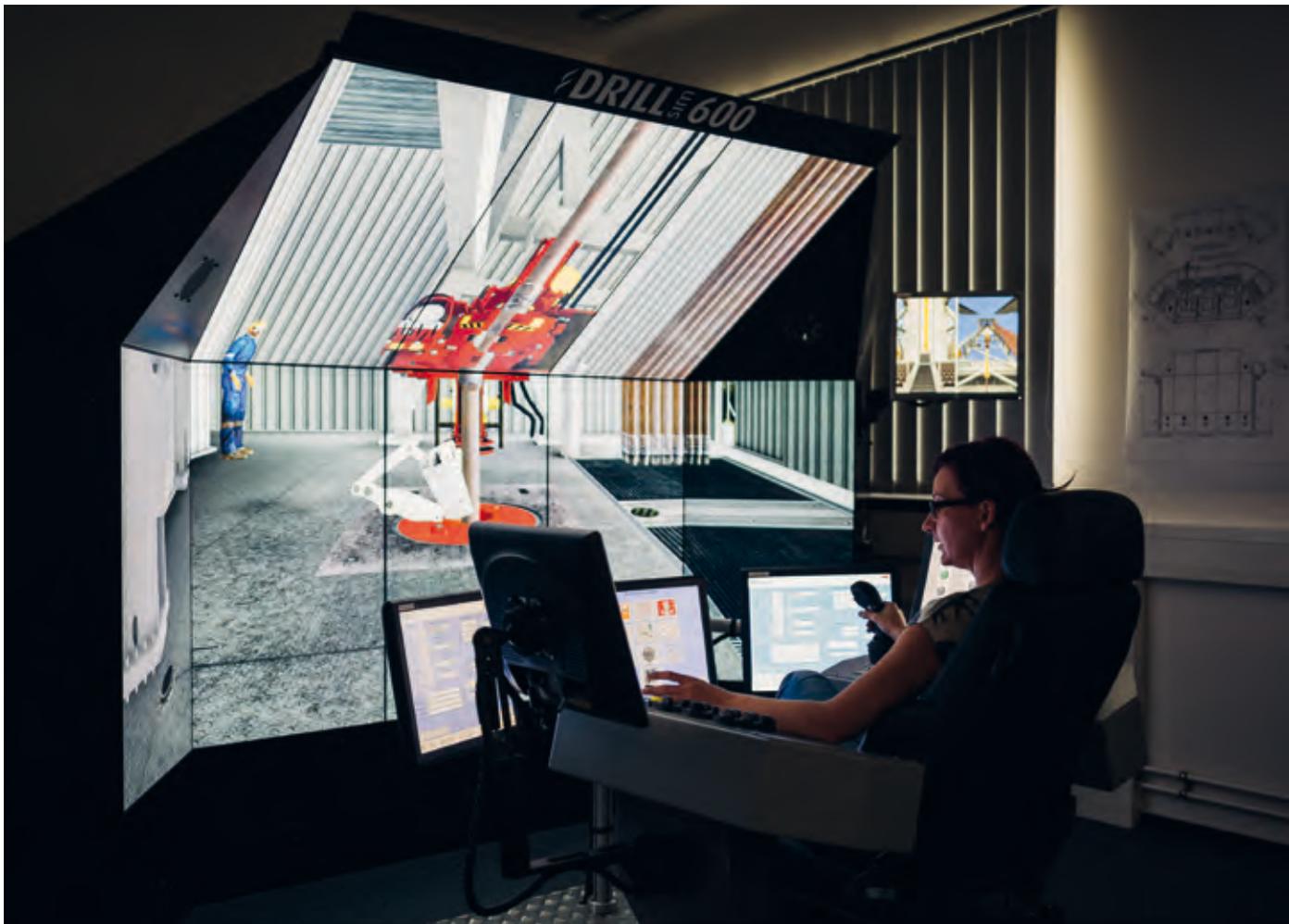
Am Drilling Simulator Celle, einer neuen Forschungsanlage der TU Clausthal in Kooperation mit dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN), erforschen und erproben Wissenschaftler neue Bohrtechniken, die deutlich kostengünstiger sein sollen als die heute üblichen, für die Erdgas- und Erdölerschließung eingesetzten Technologien. Finanziert wurde die Forschungsanlage vom Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), dem Land Niedersachsen, der TU Clausthal und der Stadt Celle. Die TU liefert zudem umfangreiches Knowhow und viel Erfahrung, denn sie beschäftigt sich schon seit Jahrzehnten mit den Themen Bohrtechnologie, Material- und Energieforschung. Ihr Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen für Bohrtechnik in Europa. Der Standort des Simulators in Celle ist ebenfalls kein Zufall, denn die Stadt ist das Zentrum der deutschen Bohrindustrie mit vielen mittelständischen Unternehmen und einer Bohrmeisterschule.

Geothermal energy has a very important role to play in the power networks of the future. Unlike wind and solar energy, it is unaffected by weather or the time of day or year. In some regions, though, you have to drill very deeply in order to penetrate zones with sufficient heat. In the German region of Lower Saxony (Niedersachsen) where Celle is located, the depth is between 4,000 and 6,000 meters, for example. Drilling to this depth requires a lot of effort and is very expensive. With current technology, drilling represents around 80 percent of the total investment for a geothermal power plant.



Das Besondere des Bohrsimulators: Mathematische Simulationen auf Hochleistungsrechnern werden hier mit einer echten Bohrung, die ebenfalls simuliert wird, verknüpft. In Bruchteilen von Sekunden sendet der Bohrer Daten zum Simulator, der dann ebenso schnell berechnet, was als nächstes kommt und wie darauf idealerweise reagiert werden sollte. Sollte der Bohrer etwa zu heiß werden, muss er zum Beispiel angehalten oder stärker gespült werden. „Hardware in the Loop“ nennen die Wissenschaftler das Verfahren, das ihnen eine Simulation in Echtzeit ermöglicht. Das Ziel ist, eine Bohrung mit minimalem Aufwand erfolgreich durchzuführen.

At the Celle Drilling Simulator, a new research facility at TU Clausthal in cooperation with Energy Research Center of Niedersachsen (EFZN), researchers are investigating new drilling techniques and putting them to the test. The hope is that these will be much cheaper than the methods used today for opening natural gas and oil wells. The research facility has been financed by the European Regional Development Fund (ERDF), the state of Niedersachsen, TU Clausthal, and the municipality of Celle. TU Clausthal also contributes extensive knowledge and experience, having been involved for decades in drilling technology and research into materials and energy. The university's Institute of Petroleum Engineering (ITE) is one of Europe's leading drilling research facilities. Celle was specifically chosen as the site for the simulator due to the town's position at the center of the German drilling industry. Several medium-sized enterprises and a Drilling Technical College are based here.



Am Bohrsimulator können auch verschiedene Materialien für Bohrgestänge, -kopf und Mess-technik getestet werden. Zudem können die Wissenschaftler herausfinden, wie zielsicher sich ein mehrere tausend Meter langes Bohrgestänge steuern lässt, das sich eben nicht nur um eine feste Achse dreht, sondern dabei in alle Richtungen schwankt. Und sie sehen, wie sich am besten um die Ecke bohren lässt. Das ist notwendig, damit die Erdwärme größerer Flächen nutzbar wird und überschüssige regenerative Energie als Wärme zwischengespeichert werden kann.

Die Forscher prüfen außerdem, wie gut die Bohrsysteme unter erhöhten Drücken und Temperaturen und in verschiedenen Hartgesteinen funktionieren. Sie wollen herausfinden, wie korrosions- und abriebfest die Technik ist und wie effizient die Gesteinszerstörung funktioniert. Zudem entwickeln sie Methoden, um die Stillstandzeiten der Tiefbohranlage zu minimieren. Auch das Umweltmanagement ist ein Schwerpunktthema der Forschungsanlage. Gezeigt wird zum Beispiel, wie Bohrschlamm wieder aufbereitet werden kann. Nicht zuletzt können auch Alternativen zum heute üblicherweise eingesetzten mechanischem Bohrmeißel, der während des Prozesses mehrfach teuer und aufwändig getauscht werden muss, am Bohrsimulator getestet werden.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt
Direktor
Fon +49 171 2284041
E-Mail joachim.oppelt@tu-clausthal.de

This is no ordinary drilling simulator either – as well as running mathematical simulations on high-performance computers, it is actually linked to a real bore, which is simulated simultaneously. The drill sends data to the simulator in fractions of a second, which in turn calculates equally quickly what will happen next and what the best way to react will be. If the drill gets too hot, say, then it must either be stopped or have more drilling fluid pumped in. This technique, which makes it possible to run a real-time simulation, is referred to as hardware-in-the-loop. The aim is to be able to carry out successful drilling with the minimum effort.

Using the drilling simulator, it is possible to test various different materials for drill pipes, drill heads, and measurement equipment. In addition to this, the researchers can also establish how precisely a drill pipe can be controlled. A pipe can measure several thousand meters in length and has a tendency to flex in all directions, rather than simply rotate around a fixed axis. They can also discover the best methods for drilling round corners. This is important in order to exploit the terrestrial heat from larger areas, and to provide intermediate storage for excess renewable energy in the form of heat.

Another aspect that the research team considers is how well the drilling systems perform under increased pressure and temperature in various types of hard rock. Their goal is to determine how resistant the equipment is to corrosion and wear, as well as how efficiently the rock is cut. Alongside this, they are also developing methods to reduce the idle time of the deep drilling facility. Environmental management is another area of focus at the research facility. An example of this demonstrates how mud produced by drilling can be processed for useful purposes. Last, but not least, alternatives to the mechanical drill bits typically used today can also be tested on the rig. Currently, bits have to be replaced many times during the drilling process, which is expensive and time-consuming.

Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe Forschungsplattform ENTRIA

Disposal Options for Radioactive Waste ENTRIA Research Platform

Wohin mit den radioaktiven Reststoffen aus Kernkraftwerken? Auf diese brisante und konfliktbeladene Frage gibt es bisher noch keine Antwort. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten interdisziplinären Verbundprojekt „Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe“ (ENTRIA) suchen Forscher aus ganz Deutschland nach Lösungen. Die Technische Universität Clausthal ist mit den Instituten für Endlagerforschung und für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik beteiligt. Sie bilden gemeinsam mit Instituten der TU Braunschweig und

What happens to the radioactive waste from a nuclear power station? Until now we have no answer to this important and controversial question. Researchers from across the whole of Germany are working collaboratively on the interdisciplinary ENTRIA project, funded by the German Ministry of Education and Research (BMBF), to look for solutions. ENTRIA is the German abbreviation for „disposal options for radioactive waste“. TU Clausthal has two participating institutes: the Institute of Disposal Research and the Institute of Mineral and Waste Processing, Waste Disposal and Geomechanics.



der Leibniz Universität Hannover einen Partner im Verbund. Weitere Partner sind das Karlsruher Institut für Technologie, die Freie Universität Berlin und die Christian-Albrechts-Universität Kiel sind ebenfalls Partner der Forschungsplattform.

Die Wissenschaftler wollen dabei drei verschiedene Konzepte zur Lagerung der radioaktiven Reststoffe grundsätzlich unter die Lupe nehmen, ohne dabei potenzielle Standorte für ein Endlager zu bewerten. Die erste Option ist, das strahlende Material tief unter der Erde in einem geeigneten tiefen Gestein sozusagen für immer einzuschließen. Eine Rückholung wäre in diesem Konzept allerdings sehr schwierig und aufwändig. Die zweite Option sieht ebenfalls eine tiefe geologische Lagerung vor. Das Lager soll aber für einen gewissen Zeitraum überwacht und dann entweder verschlossen oder bei Bedarf wieder geräumt werden können. Die dritte Möglichkeit ist, die Reststoffe oberirdisch in strahlensicheren Containern zu lagern.

Der Vergleich dieser Optionen verlangt Know-how aus den unterschiedlichsten Forschungsdisziplinen. Geologen, Ingenieure, Physiker und Chemiker, Juristen, Gesellschaftswissenschaftler und Philosophen beleuchten die drei Optionen aus den unterschiedlichsten Winkeln. Unter anderem prüfen sie die Standfestigkeit und Sicherheit der Lager und entwickeln Konzepte für die Lagerung und Überwachung von radioaktiven Reststoffen über Tage. Es gilt zudem, die verschiedenen Lagerungsoptionen unter den strahlungsschutzrelevanten Gesichtspunkten zu bewerten und die rechtlichen Grundlagen zu klären.



They are joined by Braunschweig University of Technology and Leibniz Universität Hannover. Other partners in the research platform are Karlsruhe Institute of Technology, Freie Universität Berlin, and the Christian-Albrechts-Universität Kiel.

The aim of the research team is to thoroughly examine three different concepts for management of radioactive waste, independently of any evaluation of potential locations for a permanent site. The first option is to „lock away“ the radioactive material, essentially forever, in a suitable layer of rock deep beneath the ground. Recovery of the material in this case would be extremely difficult and expensive. The second option also involves emplacement in deep geology. This facility would be monitored for defined period of time, before being sealed off, or emptied if necessary. The third alternative is to store the waste at the surface in radiation-proof containers.

Darüber hinaus haben Lagerstrategien eine ethisch-moralische Dimension, die keinesfalls vernachlässigt werden darf. So gilt es zu klären, wie Pläne zur Lagerung von radioaktiven Reststoffen idealerweise kommuniziert werden und inwieweit die Menschen vor Ort in die Planung mit eingebunden werden sollten. Wem darf was zugemutet werden? Das Konzept ohne Rückholbarkeit zum Beispiel würde kommende Generationen von einer großen Verantwortung befreien, ihnen aber auch jede Möglichkeit nehmen, jemals wieder eingreifen zu können. Bei der oberirdischen Lagerung wäre diese Option noch vorhanden, dafür das Problem aber im Grunde nur verschoben. Der Mittelweg wiederum, unterirdisch mit Überwachung, ist ein technisch komplexer Kompromiss, der möglicherweise keinem der genannten Ansprüche gerecht wird.

Nicht zuletzt soll die Forschungsplattform dazu beitragen, junge Wissenschaftler für das Thema zu begeistern und zielgerichtet auszubilden. Denn kompetente Fachkräfte werden dringend gebraucht, um für eine der brisantesten Herausforderungen des Jahrhunderts die bestmöglichen Strategien zu finden und umzusetzen.

■ KONTAKT

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Sprecher
Fon +49 5323 72-4920
E-Mail klaus.roehlig@tu-clausthal.de

In order to compare these options, knowledge from highly varied disciplines is required. Geologists, engineers, physicists, chemists, lawyers, social scientists, and philosophers are throwing light onto the three options from very different angles. They are looking at factors such as the stability, safety, and security of the site, as well as developing concepts for the storage and monitoring of radioactive waste above ground. Additionally, they must evaluate the various management options with regard to radiation protection and ensure that the legal basis is well understood.

Beyond this, the management strategies also have ethical and moral dimensions that certainly cannot possibly be ignored. This means considering the best ways to communicate any plans for storage of radioactive waste, as well as the extent to which local residents near proposed sites should be included in the process. What can be expected of whom? The non-return concept, for example, would release future generations from a serious responsibility, but at the same time deny them the opportunity to ever intervene if they chose to. Storing material on the surface would leave this option available, but in turn effectively only delays dealing with the problem. The monitored underground storage „middle ground“ option is, in turn, a more technically complex compromise that might not even meet any of the main requirements mentioned.

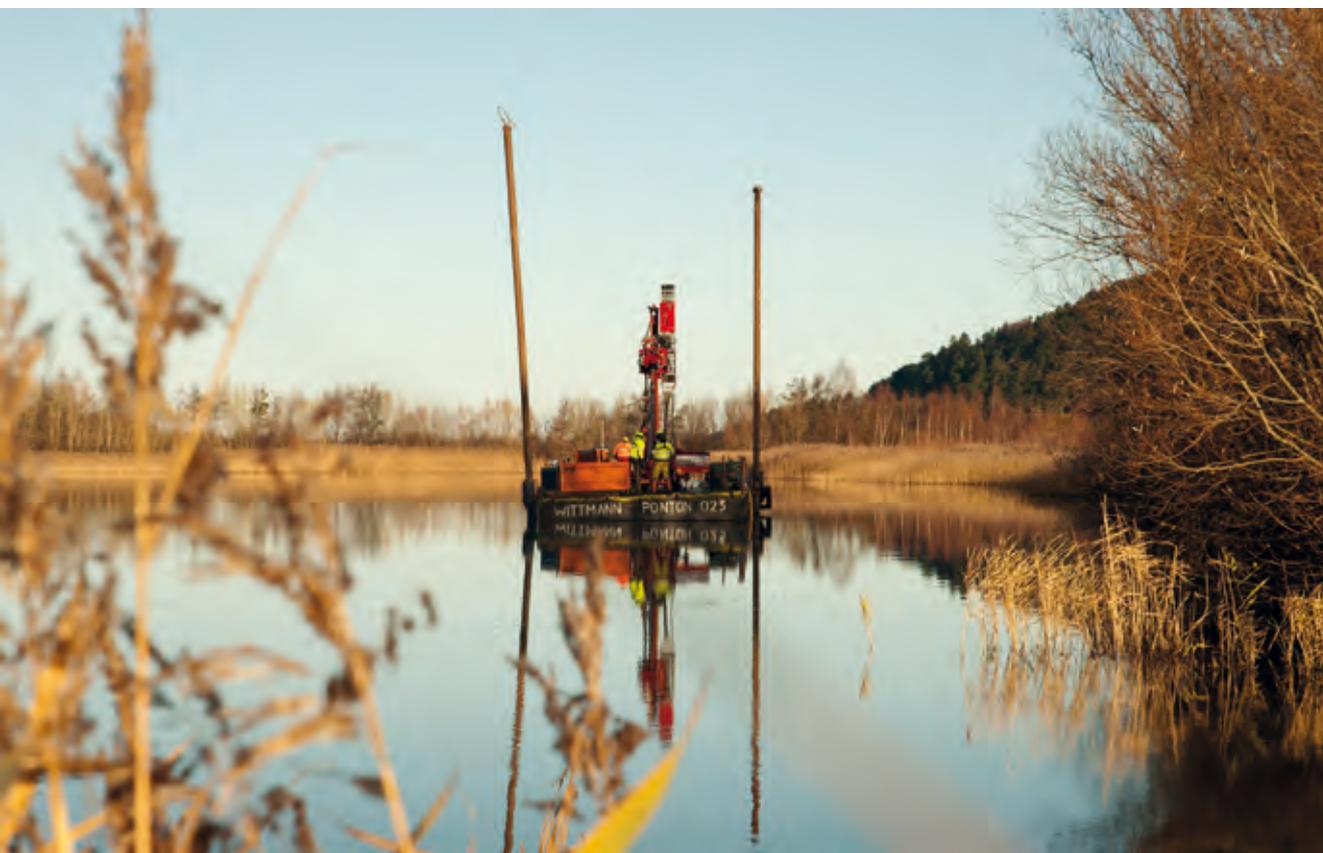
Last, but not least, the research platform is intended to help researchers of the future become inspired about the topic and to train them appropriately. Skilled specialists are desperately needed if we are to find and implement the best strategies for dealing with one of the most controversial challenges of the 21st century.

Mammut-Verbund mit großen Ambitionen KIC EIT Raw Materials

Huge cluster with major ambitions

Schon die Zahlen sind beeindruckend: 116 Forschungseinrichtungen und Unternehmen aus 22 EU-Staaten haben sich 2014 zu einem Forschungsverbund zusammengeschlossen. Ziel des Konsortiums ist es, die Versorgung der europäischen Industrie mit dringend benötigten Rohstoffen zu sichern. Bis zum Jahr 2022 fördert die Europäische Union das Zukunftsprojekt mit 410 Millionen Euro. Eine Summe, die gut angelegt ist: Zwischen 1980 und 2007 hat sich allein der weltweite Verbrauch von Metallerzen mehr als verdoppelt. Experten gehen davon aus, dass sich dieser Trend noch beschleunigen wird.

The numbers are impressive: 116 research institutions and companies from 22 EU states joined forces in 2014 to create a research cluster. The goal of the consortium is to secure the supply of urgently needed raw materials to European industry. European Union funding to the tune of 410 million euros of will be provided up to 2022. This should be money well spent, given that the global consumption of metal ores alone more than doubled between 1980 and 2007. Experts suggest that this accelerating trend is likely to continue.





Das EU-Konsortium firmiert unter dem Titel KIC EIT Raw Materials (KIC steht für „Knowledge and Innovation Community“, EIT für „European Institute of Innovation and Technology“). In Deutschland beteiligen sich drei Universitäten als Hauptpartner an dem Mammut-Verbund. Die TU Clausthal zählt zu diesem erlesenen Kreis. Und das nicht ohne Grund: Der Harz ist eine uralte Bergbau-Region; mehr als 1.000 Jahre wurde hier Erz gefördert. Traditionell verfügt das Gebiet daher über große Kompetenzen im Rohstoff-Bereich. Diese lange Geschichte findet auch in dem TU-Forschungsschwerpunkt „Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz“ ihren Widerhall.

Die KIC gliedert sich in drei Bereiche, die sich den Themen Primärrohstoffe, Recycling und Substitution (also Ersatz knapper Rohstoffe durch andere, weniger knappe) widmen. Die TU Clausthal ist in allen drei KIC-Schwerpunkten aktiv, beschäftigt sich aber besonders intensiv mit dem Bereich Recycling. Denn während die natürlichen Lagerstätten schrumpfen, landen mehr und mehr wertvolle Ressourcen auf

The EU consortium has been named the Knowledge and Innovation Community (KIC) at the European Institute of Technology (EIT) Raw Materials. Germany has three universities participating as main partners in this huge cluster. TU Clausthal is a member of this distinguished group. This is not without good reason, as the Harz region of Germany is an ancient mining area where ore has been extracted for over 1,000 years. Traditionally, this part of the country has been a stronghold of expertise in the field of raw materials. This long history is also reflected in TU Clausthal's Raw Materials Supply and Resource Efficiency research focus area.

The KIC is divided into three areas, which are dedicated to primary raw materials, recycling, and substitution. The latter is concerned with replacing raw materials with less scarce alternatives. TU Clausthal is involved with all three KIC areas, but is particularly heavily invested

den Deponien. Gerade für das an Bodenschätzen arme Europa ist es daher essentiell, diese Rohstoffe zurückzugewinnen und für die Herstellung neuer Produkte zu nutzen. Wie wichtig dieser Punkt ist, zeigt sich an Elementen wie Gallium, Indium oder Tantal. Diese werden für den Bau von Hightech-Produkten wie Solarzellen oder Handys benötigt. Die Nachfrage nach den seltenen Metallen ist daher in den letzten Jahren sprunghaft gestiegen – und zwar weltweit. Schon in wenigen Jahren könnte sie die geförderte Menge deutlich überschreiten; Experten rechnen längerfristig zudem mit deutlich steigenden Preisen. Solange Europa seinen Bedarf an den begehrten Elementen auf dem Weltmarkt decken muss, ist es als Hochtechnologie-Standort verwundbar.

Die Arbeiten der Clausthaler Wissenschaftler sollen dabei helfen, diese Abhängigkeit zu verringern. So haben die Forscher zum Beispiel ein Verfahren entwickelt, mit denen sie das Übergangsmetall Tantal aus Elektroschrott zurückgewinnen können. Tantal steckt unter anderem in Laptops oder Smartphones. Das Element verdankt seine steile Karriere vor allem der fortschreitenden Miniaturisierung: Es erlaubt die Konstruktion von Kondensatoren, die trotz einer geringen Größe eine sehr hohe Elektrolytenspeicher-Kapazität haben. Die Wiedergewinnung und Aufreinigung von Tantal ist aufwändig – schon deshalb, weil etwa ein Handy nur wenige Milligramm des Elements enthält. Dennoch haben die TU-Forscher das Tantal-Recycling inzwischen gut im Griff, allerdings bislang nur im Labormaßstab. Mit Industrie-, Landes- und Bundesmitteln sowie den EU-Fördergeldern wollen sie gemeinsam mit industriellen Partnern den Prozess soweit entwickeln, dass er in die industrielle Praxis überführt werden kann.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Koordinator
Fon +49 5323 72-2735 / 2038
E-Mail goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

in the recycling topic. Even as natural deposits continue to dwindle, more and more valuable resources are being dumped. For a resource-poor region like Europe, it is therefore essential to reclaim these raw materials and make use of them in the manufacture of new products. Elements such as gallium, indium, and tantalum are good examples of how important this issue is. They are used in the construction of hightech products such as solar cells and mobile phones. Demand across the globe for these scarce metals has seen a corresponding jump in recent years. In just a few years' time, demand may well outstrip supply and experts are predicting significant price increases in the longer term. Europe's status as a high-technology center will remain vulnerable as long as it continues to source these sought-after materials on the world market.

Work by the researchers in Clausthal is intended to minimize this dependence. To this end, the researchers have developed a technique that allows the transition metal tantalum to be reclaimed from electrical waste. Tantalum is found in many devices, including laptops and smartphones. This element's importance owes its meteoric rise primarily to advances in miniaturization. It enables the construction of capacitors that have extremely high electron storage capacity, despite their small size. Recovery and purification of tantalum is a laborious process, not least because the typical mobile phone only contains a few milligrams of the element. Nonetheless, TU Clausthal researchers have now made good progress with this, albeit only at laboratory scales so far. Financed by industrial, state, and federal sources, in addition to the EU funding, and working together with industrial partners, they aim to develop the process to the point that it is ready for practical industrial applications.

Das virtuelle Rohstoff-Forschungsinstitut German Resource Research Institute (GERRI)

The virtual raw materials research institute

Wer ein Problem im Bereich Rohstoffe und Recycling hat, für das er wissenschaftliche Unterstützung sucht, hat dafür in Zukunft in Deutschland zusätzlich einen zentralen Ansprechpartner: das German Resource Research Institute, abgekürzt GERRI – ein virtuelles Institut, das die Kompetenz der großen deutschen Rohstoffforschungseinrichtungen bündelt. Die Vernetzung soll Effizienz und Schlagkraft der deutschen Rohstoffforschung stärken, aber auch ihre nationale und internationale Sichtbarkeit erhöhen: GERRI, so der Plan, soll eine Art Dachmarke für Rohstoffforschung made in Germany werden.

Das 2015 gegründete virtuelle Institut wird durch fünf Partner getragen: die TU Clausthal, die TU Bergakademie Freiberg, die RWTH Aachen, die Fraunhofer Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcentechnologien und das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. Zusammen decken die Beteiligten das komplette Feld der Rohstoffforschung ab: angefangen von der Erkundung und Erschließung neuer Lagerstätten über die Suche nach neuen Materialien, die seltene Ressourcen schonen oder ersetzen können, bis hin zum Recycling von Produktionsabfällen, Altprodukten und abgelagerten Abfällen auf Deponien oder Halden. Nach der Aufbauphase sollen ab 2017 weitere Forschungseinrichtungen und Kompetenzzentren eingebunden werden. Diese Bündelung ist vor allem in Hinblick auf internationale Großprojekte wichtig, die oft sehr breite Herausforderungen an die durch-

Anyone looking for scientific support to help solve a raw materials or recycling problem now has a new place to go in Germany. Acting as a central contact point, the German Resource Research Institute (GERRI) is a virtual institute that combines the expertise of the major German raw materials research institutions. This network is intended to improve the efficiency and impact of raw materials research in Germany, as well as raising its profile both nationally and internationally. GERRI will, it is hoped, serve as a „Made in Germany“-style umbrella brand for raw materials research.

Founded in 2015, the virtual institute draws on the expertise of five partners: TU Clausthal, Freiberg University of Mining and Technology, RWTH Aachen, Fraunhofer Project Group for Materials Recycling and Resource Strategies, and Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology. Together, these participants cover the entire field of raw materials research. Their work ranges from identification and opening up of new deposits, through searching for new materials that can reduce the use of or replace scarce resources, to recycling of manufacturing waste, end-of-life products, and waste stored at landfill and other sites. Following an initial ramp-up phase, additional research institutions



führenden Partner stellen. Das Vorhaben wird vom Bundesforschungsministerium im Rahmen des Programms „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) finanziell gefördert.

In einem ersten Schritt wollen die Partner eine internetgestützte Datenbank aufbauen. Darin werden die Schwerpunkte jeder einzelnen beteiligten Arbeitsgruppe detailliert erfasst. Dazu gehört auch die technische Ausstattung. Welcher Partner beschäftigt sich mit sensorgestützter Sortierung von Abfällen? Wer hat Erfahrungen mit der Aufreinigung von Indium? Welche Arbeitsgruppe verfügt über eine Maschine, mit der sich leitende Metalle elektrostatisch abtrennen lassen? Und wie groß ist die Durchsatzleistung des Geräts? Alle Angaben werden von den Kooperationspartnern selbst aktuell gehalten und lassen sich über eine Weboberfläche dezentral recherchieren.

Anhand der Datenbank kann jeder Partner direkt sehen, wo er sich Hilfe holen kann – in Form von Know-how oder auch von Geräten und Infrastruktur. Gleichzeitig erlaubt es das System, bei Anfragen von Unternehmen, die bislang keinen Kontakt zu den Forschungseinrichtungen hatten, schnell den zum jeweiligen Problem passenden Ansprechpartner zu finden. Das Projekt hat auch Pilotcharakter: Wenn sich die Datenbank im deutschlandweiten Verbund bewährt, soll sie danach auch im europäischen Rohstoff-Netzwerk KIC EIT Raw Materials etabliert werden. Auch aus diesem Grund hat sich GERRI bereits jetzt eng mit der zentralen Geschäftsstelle der KIC EIT Raw Materials vernetzt.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Koordinator
Fon +49 5323 72-2735 / 2038
E-Mail goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

and specialist centers are expected to join the cluster from 2017 onwards. This pooling of resources is important for large, international projects in particular, due to the wide-reaching challenges that they often pose to the implementation partners. The undertaking is supported financially by the German Federal Ministry of Education and Research as part of the Research for Sustainability (FONA) program.

Initially, the partners are seeking to establish an internet database. This will contain details of the specialisms of each of the participating research groups, including information about their technical facilities. Which partner knows about sensor-based sorting of waste? Who has experience with purification of indium? Which research groups have access to a machine that can electrostatically separate conductive metals? And what is the throughput rate of that machine? All details will be kept up to date by the partners themselves and a web interface will provide access to the decentralized system for research purposes.

Using the database, each partner can see directly where to turn for assistance, be that in the form of know-how, equipment, or infrastructure. Moreover, the system will provide a quick way for companies with an enquiry to find the right contact for their problem, even if they never had previous contact with the research institutions. This is also a pilot for a wider project. If the Germany-wide database proves to be successful, then the intention is to extend the service to cover the entire KIC EIT Raw Materials network, right across Europe. For this and many other reasons, GERRI has already established very close connections with the KIC EIT Raw Materials central office.

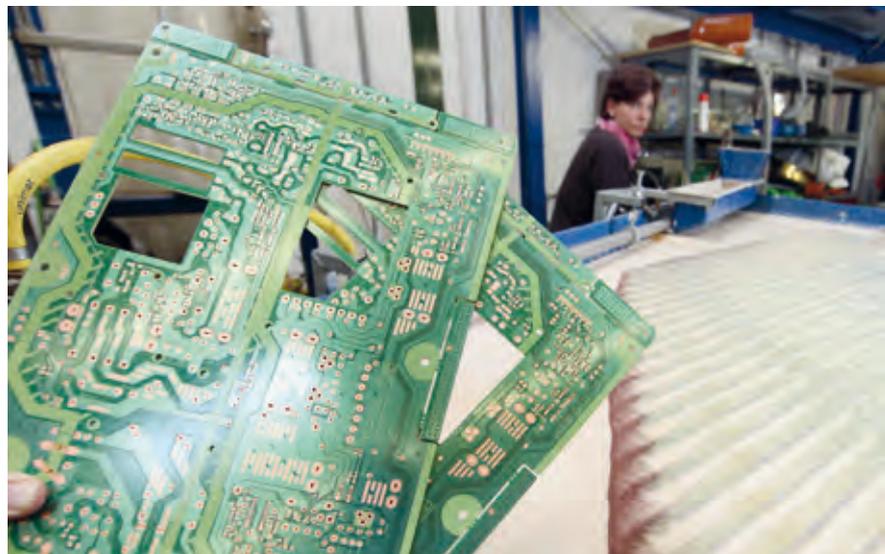
Silicon Valley des Recyclings Recyclingcluster wirtschaftsstrategische Metalle (REWIMET)

The Silicon Valley of recycling Cluster for Recycling of Economically Strategic Metals (REWIMET)

Am Nordwestrand des Harzes soll in den nächsten Jahren ein Vorzeigeprojekt mit deutschlandweiter Strahlkraft entstehen. Zusammen mit Industriepartnern und Unternehmen der Region will die TU Clausthal im Goslarer Ortsteil Oker ein Sekundärrohstoffzentrum (SRZ) aufbauen. Das SRZ soll als Bindeglied zwischen Recycling-Forschung und ihrer industriellen Umsetzung fungieren: Die geplante Anlage soll in einigen Jahren großtechnische Lösungen liefern, um Wertstoffe aus der industriellen Produktion, aus Altprodukten sowie aus Halden und Deponien zurückzugewinnen.

Die geplante Großanlage ist Aushängeschild einer Region, die sich anschickt, zum „Silicon Valley“ im Bereich Rohstoffrecycling zu werden. Schon heute verzeichnet der Harz eine deutschlandweit einmalige Konzentration metallverarbeitender Unternehmen, von denen viele zur Weltspitze zählen. 2011 gründete die TU Clausthal daher zusammen mit industriellen Partnern den „Recycling-Cluster wirtschaftsstrategische Metalle Niedersachsen“, abgekürzt REWIMET. Ziel des Verbunds ist es, neue Wiederverwertungs-Prozesse aus der Forschung in enger Rückkopplung mit Recycling-Firmen in die industrielle Praxis zu überführen. Das SRZ stellt dazu die nötige Infrastruktur; es steht daher im Zentrum dieser langfristig angelegten Strategie. Am Ende sollen so in der Region neue hoch qualifizierte Arbeitsplätze entstehen.

A new, flagship project with national importance for Germany is set to take shape over the next few years at the north-western edge of the country's mountainous Harz region. Working together with industrial partners and regional businesses, TU Clausthal aims to establish a Secondary Raw Materials Center (SRZ) at a site in Oker, near Goslar. The SRZ is intended to help bridge the gap between recycling research and its practical industrial application. In a few years' time, the planned facility should deliver industrial-scale solutions that can recover valu-



Die Partner des Clusters sind momentan an rund 20 Vorhaben beteiligt, etwa an der Entwicklung einer mobilen Einheit zur Demontage von Flugzeugen. Das Recycling ganzer Flugzeuge wurde bisher kaum systematisch verfolgt; viele der wertvollen Materialien werden kaum wiederverwertet, etwa die verbauten Verbundwerkstoffe. In einem anderen Vorhaben geht es um die so genannten Bergeteiche südöstlich von Goslar. Bis in die 1980er Jahre hinein wurden hier Rückstände aus der Erzgewinnung eingeleitet. Die Schlammschicht am Boden der künstlichen Seen enthält Gold und Silber, aber auch die technologisch wichtigen Elemente Cobalt, Gallium und Indium. Insgesamt wurden hier Rohstoffe im Wert von mehreren hundert Millionen Euro abgelagert, schätzen Experten – ein Schatz, den Wissenschaftler der TU Clausthal zusammen mit Partnern heben wollen.

able materials from industrial production processes, used products, landfill, and other waste sites.

According to the plan, this large-scale plant will be a poster child for a region that sees itself as the future Silicon Valley of raw material recycling. The high density of metal-processing companies in the Harz is already unique in Germany. Many of these companies are among the best in the world. It was on this basis that TU Clausthal and its industrial partners established the REWIMET Cluster for Recycling of Economically Strategic Metals in 2011. The group's stated goal is to create industrial applications based on research into new recycling processes, working in close collaboration with recycling companies. With this long-term goal in mind, the SRZ has been conceived as the centerpiece of the new infrastructure that is needed. New, high-skill jobs are expected to be created in the region as a result of this work.





Partners in the cluster are currently participating in around 20 initiatives, including a mobile unit for disassembly of aircraft. Recycling of entire aeroplanes has never really been pursued systematically before, with the result that many of the valuable materials they contain, such as composites, are never recovered. Another project is looking at tailings ponds to the south-east of Goslar. As late as the 1980s, these ponds were being used to capture residues from ore processing operations. The mud layer at the bottom of these artificial lakes contains gold and silver, as well as cobalt, gallium, and indium, which are important elements for technology manufacture. Experts estimate that raw materials worth several hundred million euros in total are deposited here – a treasure that TU Clausthal's researchers and their partners are keen to get their hands on.

Mehr als zwei Dutzend Firmen und Forschungseinrichtungen sind vereint unter dem Dach von REWIMET – darunter Rohstoff-Unternehmen, Recycler, Abfall-Logistiker, Sondermaschinenbauer, Software-Dienstleister und Ingenieurbüros, aber auch insgesamt 23 TU-Institute, die sich im TU Cluster Recycling zusammengefunden haben. Gefördert wird REWIMET vor allem vom Land Niedersachsen, profitieren soll jedoch der gesamte Hightech-Standort Deutschland. Denn die Metalle, um die es hier geht, sind für viele Hightech-Produkte essentiell – angefangen von Smartphones oder Flachbildschirmen über Batterien und Motoren für die Elektromobilität bis hin zu Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen.

More than two dozen companies and research institutions are united under the REWIMET banner, including raw materials businesses, recyclers, waste logistics firms, specialist machine builders, software services companies, and engineering offices, not to mention 23 institutes which are part of the TU Clausthal recycling cluster. REWIMET is funded primarily by the state of Niedersachsen, however it is hoped that the whole of the hightech nation of Germany will benefit. After all, the metals that are the primary interest here are essential for all manner of hightech products, from smartphones and flat screens, through batteries and motors for electric vehicles, to wind and solar energy systems.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
 Koordinator
 Fon +49 5323 72-2735 / 2038
 E-Mail goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Werkstoffe in Aktion Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen

Materials in action Campus Functional Materials and Structures

Manche Materialien haben ganz besondere Eigenschaften. Ein Piezokristall zum Beispiel liefert unter mechanischem Druck elektrische Ströme. Memory-Metalle nehmen durch Wärmezufuhr oder -entzug immer wieder bestimmte Formen an. Andere Stoffe reagieren wiederum auf Licht oder magnetische Impulse. Auch manche Nanomaterialien haben je nach Art, Form und Größe ganz eigene Stärken. Die unter dem Kürzel CNTs (CarboNanoTubes) bekannten Kohlenstoffröhrchen etwa sind ausgesprochen leicht und dabei rund 135 Mal reißfester als Stahl. Zudem können sie als elektrische Leiter oder Halbleiter fungieren.

Wie mit solchen speziellen Werkstoffen Prozesse gesteuert und innovative Produkte entwickelt werden können, zeigen Wissenschaftler des Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen der TU Clausthal. Beteiligt sind auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin. Die Forscher arbeiten an Werkstoffen für die unterschiedlichsten Anwendungen, von ultraleichten Flugzeugen über Ultraschallrasierer bis hin zu schallschluckenden, selbstreinigenden Fensterscheiben, die sogar noch Solarstrom erzeugen können. Der Campus hat aber nicht nur zukunftsweisende Forschungsthemen, sondern auch eine ganz besondere Organisationsform. Er vereint drei unterschiedliche Institutionen und ermöglicht so einen unkomplizierten Austausch von Personal und Mitteln. Auch Patente können gemeinschaftlich angemeldet werden.

Some materials have very special properties. A piezoelectric crystal under mechanical pressure, for example, produces an electric current. Memory metals can return to specific shapes, time and again, when heat is applied or removed. Other materials react to light or magnetic pulses. Certain nanomaterials have very distinctive strengths that vary according to type, shape, and size. Take carbon nanotubes (CNTs): they are astonishingly light, but at the same time around 135 times more resistant to strain than steel. What is more, they can function as electric conductors and semiconductors too.

Showing how these special materials can be used to control processes and develop innovative products is the job of the scientists based at TU Clausthal's Functional Materials and Structures campus. Their partners in the project are the German Aerospace Center (DLR) in Braunschweig and the Federal Institute for Materials Research and Testing in Berlin. The researchers work on materials for a huge variety of applications, from ultra-lightweight aircraft, through ultrasound razors, to sound-absorbing, self-cleaning window glass that can also generate solar electricity. It is not just the research that is pioneering at this new technology park, but also the very special nature of the organization itself. It unites three different institutions and facilitates uncomplicated exchange of both staff and resources. This even extends to submitting joint patents.



Ein Schwerpunkt des Campus ist es, Funktionswerkstoffe und -strukturen zu entwickeln, die unerwünschte Schwingungen mindern, zum Beispiel solche die für den Lärm von Flugzeugen verantwortlich sind. Piezokeramiken könnten Abhilfe schaffen, sind aber in ihrer gängigen Form zu spröde und brechen leicht. Zudem enthalten sie in der Regel das giftige Schwermetall Blei. Die Forscher arbeiten deshalb an bleifreien und an besonders robusten Piezokeramiken mit einem bienenwabenartigen Aufbau. Fertigungsmethoden für einen besonders stabilen dreidimensionalen Aufbau der Wabenstruktur, etwa mit einem 3D-Drucker, stehen ebenfalls auf der Agenda des Campus.

Und die Wissenschaftler entwickeln sich selbst organisierende Strukturen. Dabei nehmen sie etwa im Piezo-Fall einmal mehr die Bienen zum Vorbild, deren Waben sich über eine Kombination aus Temperaturveränderungen und Enzymbeigabe quasi von selbst in die perfekte Form bringen. Und weil Funktionswerkstoffe und -strukturen auch als Sensoren taugen, lassen sich Materialien kreieren, die Schäden nicht nur selber reparieren, sondern auch erkennen können. Der Einsatz solcher sich selbst heilenden Werkstoffe ist für viele Anwendungen von Nutzen, unter anderem für Autolacke, Flugzeugbauteile und auch für medizinische Implantate. Nicht zuletzt aktivieren die Wissenschaftler die unterschiedlichsten technischen Oberflächen mit Funktionswerkstoffen.

One of the main areas of focus at the campus is the development of functional materials and structures that minimize unwanted vibrations, such as those that are responsible for the noise from aircraft. Piezoceramics might be part of the solution, but they are too brittle and easy to break in their current form. As well as this, they also usually contain lead, a poisonous heavy metal. Researchers are therefore working on lead-free, highly robust piezoceramics with a honeycomb structure. Manufacturing methods for building highly stable, three-dimensional honeycomb structures (using a 3D printer for example) are also on the agenda here.

The researchers are also developing self-organizing structures. In the case of piezoceramics, they have turned to bees for inspiration. The combs they build effectively form themselves into the perfect shape through a combination of temperature changes and the introduction of enzymes. Because functional materials and structures can also serve as sensors, materials can be created that can detect damage and repair themselves. Many applications can benefit from the use of these self-healing materials, such as car paint, aircraft components, and medical implants. And if nothing else, researchers also have the option to activate a huge range of engineered surfaces using functional materials.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners
Koordinator
Fon +49 5323 72-1910
E-Mail dieter.meiners@tu-clausthal.de

Leichte Autos, hart wie Stahl

DFG-Transferprojekt: Emissionsarme Synthese von Titanlegierungen

Lightweight cars as tough as steel

DFG Transfer Project: Low-emission Synthesis of Titanium Alloys

Um den Klimawandel zu bremsen, muss der Kohlendioxidausstoß drastisch sinken. Automobilhersteller versuchen deshalb, Fahrzeuge durch den Einsatz neuer Materialien leichter zu machen. Bisher favorisieren sie dabei vor allem Aluminium und faserverstärkte Kunststoffe. Doch auch Titan könnte künftig eine buchstäblich tragende Rolle spielen. Das Metall ist hart wie Stahl, zugleich aber nur halb so schwer. Wie Aluminium bildet es an seiner Oberfläche eine silbrig-weiße Oxidschicht, die vor Korrosion schützt.

Carbon dioxide emissions need to fall drastically to put a brake on climate change. That is why automotive manufacturers are trying to make vehicles lighter by using new materials. To date they have mainly favoured aluminium and carbon-fibre-reinforced plastics. However, titanium could also play a crucial role in future. This metal is as tough as steel yet only half as dense. Like aluminium, a silvery white layer of oxidation forms on its surface, which protects it from corrosion.





Aus Titan könnten ganze Karosserien, Sprungfedern und Auspuffrohre, aber auch Motorenbauteile wie Ventile, Stößel oder Kurbelwellen gefertigt werden. Allerdings ist das stabile Leichtmetall für einen Masseneinsatz noch viel zu teuer, denn die Herstellung ist aufwändig und energieintensiv. Die ehemalige DFG-Forscherguppe „Prozessstufenoptimierte Herstellung von Titan und Titanlegierungen“ an der TU Clausthal hat jetzt Abhilfe geschaffen. Im Rahmen eines Transferprojektes sind auch Wissenschaftler der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und der TU Bergakademie Freiberg beteiligt. Das Transferprojekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Titanium can be used to make entire vehicle bodies, springs, and tailpipes, as well as engine components such as valves, lifters or crankshafts. This stable light metal is still far too expensive for mass usage because the manufacturing process is complicated and energy-intensive. At TU Clausthal, the former DFG-research group into optimizing production process steps for titanium and titanium alloys has now provided a remedy. Scientists from RWTH Aachen and Freiberg University of Mining and Technology are also involved as part of a transfer project supported by the German Research Foundation (DFG).

Üblicherweise wird Titan aus Titandioxid hergestellt, das als Weißpigment vor allem in Wand- und Fassadenfarben, aber auch in Zahnpasta und als Nanomaterial in Sonnencremes steckt. Titandioxid wiederum wird aus Erzen gewonnen, vor allem aus dem eisenhaltigen Erz Ilmenit. Die Chemiker, Physiker und Ingenieure der DFG-Forschergruppe haben neue Produktionsprozesse entwickelt, um den Preis des Leichtmetalls zu senken. So sind für die Titandioxidproduktion im Rahmen der klassischen sogenannten Sulfatroute, einem von zwei weltweit etablierten Herstellungsverfahren, bisher sieben Prozessschritte nötig. Diesen Aufwand konnten die Wissenschaftler auf fünf Prozessstufen reduzieren, die zudem insgesamt deutlich weniger Energie verschlingen. Anders als im herkömmlichen Prozess werden dabei konzentrierte titanhaltige Erze fein gemahlen und mit atomarem Wasserstoff behandelt.

Die neue Methode hat noch mehr Vorteile, vor allem für die Produktion von Titan-Aluminium-Vanadium-Legierungen. Dabei wird ein Gemisch aus Titandioxid, Aluminium und Vanadiumpentoxid gezündet, das unter hohen Temperaturen die gewünschte Legierung liefert. Weil das mit dem innovativen Verfahren gewonnene Titandioxid eine besonders reaktive Oberfläche hat, können rund 30 Prozent der bisher erforderlichen chlorhaltigen Zündmittel eingespart und so schädliche Emissionen gesenkt und die Kosten für Titan-Aluminium-Vanadium-Legierungen um etwa die Hälfte vermindert werden.

Die drei anwendungsorientierten Institute des Transferprojektes führen in den jetzt kommenden drei Jahren gemeinsam mit Industriepartnern das Verfahren in die industrielle Anwendung. Geplant ist eine Pilotanlage zur aluminothermischen Erzeugung von Titan-Aluminium-Vanadium-Legierungen im Tonnenmaßstab.

Ordinarily, titanium is extracted from titanium dioxide, which is primarily used as the white pigment in interior and exterior paints for walls and façades, as well as in toothpaste and as nano-scaled particles in sunscreen. Titanium dioxide in turn is obtained from ores, particularly ilmenite which contains iron. The chemists, physicists, and engineers in the DFG research group have developed new production processes to reduce the price of the light metal. Producing titanium dioxide from what is known as the sulphur route, one of two worldwide established manufacturing methods, thus far involves seven process steps. Scientists have been able to reduce this effort to five steps, which also consume less energy overall. Unlike in the conventional process, concentrated ores containing titanium are finely ground and treated with atomic hydrogen.

The new method has even more advantages, especially in the production of alloys of titanium/aluminium/vanadium. A mixture of titanium dioxide, aluminium, and vanadium pentoxide is ignited to yield the desired alloy at high temperature. Because the titanium dioxide obtained using this innovative method has a particularly reactive surface, some 30 percent of the igniter containing chlorine can be saved, thus reducing harmful emissions. The costs of producing alloys of titanium, aluminium, and vanadium are reduced by around half.

Over the next three years, the three institutes involved in the transfer project are rolling the method out in industrial applications together with industry partners. A pilot plant is planned for the aluminothermic bulk production of alloys containing titanium, aluminium, and vanadium.

■ KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gock
Koordinator
Fon +49 5323 72- 2037 / 2038
E-Mail gock@aufbereitung.tu-clausthal.de

Forschen für Mobilität von morgen DFG-Graduiertenkolleg: Social Cars – Kooperatives (de)zentrales Verkehrsmanagement

Researching the mobility of tomorrow German Research Foundation (DFG) Research Training Group: Social Cars – Cooperative (De-)centralized Traffic Management

Wie könnte der Verkehr der Zukunft aussehen? Im Graduiertenkolleg „Social Cars – Kooperatives (de)zentrales Verkehrsmanagement“ entwickeln Doktoranden der TU Clausthal, der TU Braunschweig und der Leibniz-Universität Hannover Konzepte für die Mobilität von morgen. Die Nachwuchswissenschaftler arbeiten dazu während ihrer Promotion jeweils drei Tage die Woche am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) auch vor Ort zusammen. Das Graduiertenkolleg wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Die jungen Forscher untersuchen dabei unter anderem Risiken und Nutzen sogenannter Shared Spaces, also von Verkehrsräumen, in denen es weder Schilder oder Ampeln noch Bürgersteige oder Fahrbahnmarkierungen gibt, und die Auto-, Radfahrern und Fußgängern gleichberechtigt zur Verfügung stehen. Hier müssen die Verkehrsteilnehmer miteinander kooperieren und Rücksicht aufeinander nehmen, ganz ähnlich wie vor 100 Jahren, als sich noch Fußgänger, Tram und Kutschen die Straßen teilten. Aber auch Hightech kann helfen, die aktuellen und drohenden Probleme zu entschärfen. Im Zentrum stehen dabei Autos, die vor allem im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen immer mehr Daten erfassen. Sie können quasi zu Sensoren für das aktuelle Verkehrsaufkommen werden, Daten austauschen. Die riesigen Daten-

What kind of traffic will we have in the future? Concepts for the mobility of tomorrow are being developed by postgraduate students in the Research Training Group „Social Cars: Cooperative (de-)centralized traffic management“. The group includes members from TU Clausthal, Braunschweig University of Technology, and Leibniz Universität Hannover. During their doctoral studies, these up-and-coming researchers meet three days a week at the Automotive Research Center Niedersachsen (NFF). The Research Training Group is funded by the German Research Foundation (DFG).

One topic being explored by the young researchers is the risks and opportunities presented by shared spaces. These are public places that can be accessed by car drivers, cyclists, and pedestrians on equal terms, but have no signs, traffic lights, footpaths or road markings. Such an approach means that all road users must cooperate with, and be considerate towards, each other. Much like 100 years ago when pedestrians, trams, and carriages shared the streets. That does not mean that there is no place for hightech solutions to current and imminent problems though. The center also has cars equipped to gather the increasing volumes of



mengen und die großen, äußerst komplexen Systeme lassen sich dann allerdings nicht mehr mit den aktuellen zentralen Verkehrsmanagementsystemen steuern und optimieren.

Deshalb untersuchen die Doktoranden des Grauiertenkollegs auch Methoden des dezentralen Verkehrsmanagements. Zum Beispiel könnten in Kreuzungsbereichen Ampeln miteinander und mit herannahenden Autos kommunizieren, um Staus zu verhindern. Die Nachwuchswissenschaftler gehen unter anderem folgenden Fragen nach: Wie kann man Verkehrsregeln und -zeichen und was sie bedeuten so darstellen, dass sie auch von autonomen Fahrzeuge verstanden werden. Wie können effektiv und sicher kollektive Entscheidungen zum Beispiel für das Fahren im Konvoi oder kooperative Fahrmanöver getroffen werden? Und wie lässt sich das Verhalten aller Verkehrsteilnehmer im Sinne des Verkehrsmanagements beeinflussen?

Die Nachwuchsforscher nutzen Simulationen, um die Tauglichkeit solcher Konzepte zu testen. Und sie stellen das Verkehrsgeschehen mit physikalischen Modellen nach, in denen Verkehrsteilnehmer wie Wassertropfen oder chemische Moleküle betrachtet werden, auf die verschie-



data relating to driver assistance systems. These cars can be used as mobile „sensors“ to monitor and exchange real-time data on the current level of traffic. The huge data volumes and the large, extremely complex systems of interest can, however, no longer be controlled and optimized using the existing centralized traffic management systems.

Therefore, the doctoral students in the research group are also investigating methods for decentralized traffic management. For example, traffic lights around crossings could communicate with each other and approaching cars in order to prevent traffic jams. These scientists of the future are considering a number of other questions, including: How can we represent the meaning of traffic rules and road signs in such a way that they can be understood by autonomous vehicles? How can collective decisions be made effectively and safely in scenarios such as convoy driving or cooperative driving manoeuvres? In what ways can we influence the behaviour of all road users when considering traffic management issues?

To test the viability of these concepts, the young researchers use simulations. They use physical models that recreate road conditions by considering road users as if they were water droplets or chemical molecules being affected by various forces. In shared spaces, for example, pedestrians tend to exert a repulsive force on each other. Another type of model used is known as an agent-based model. These are much more labour-intensive to produce, but generate more precise results, because the model contains information about specific motivations, capabilities, and objectives.



dene Kräfte wirken. In Shared Spaces beispielweise üben Fußgänger eine abstoßende Kraft aufeinander aus. Aber auch sogenannte agentenbasierte Modelle kommen zum Einsatz. Sie sind wesentlich aufwändiger, liefern aber noch genauere Ergebnisse, denn sie können das Verhalten von Individuen mit bestimmten Motivationen, Fähigkeiten und Zielen beschreiben.

Neben den zwölf über das Graduiertenkolleg finanzierten Doktoranden profitieren auch zahlreiche assoziierte Nachwuchsforscher und wissenschaftliche Hilfskräfte der beteiligten Universitäten von den Kollegangeboten. Sie können zum Beispiel an Workshops und Vorträgen des Kollegs teilnehmen und das Qualifizierungsprogramm nutzen, um wertvolle Kontakte für ihre künftige Karriere zu knüpfen.

It is not just the twelve postgraduate students funded directly through the Research Training Group who benefit either. Numerous other early-career researchers and graduate assistants in related roles at the participating universities can take part too. For example, they can join workshops and lectures held by the Group and take part in a qualification program to help them make contacts that will be valuable in their future careers.

■ KONTAKT

Prof. Dr. Jörg Müller
Stellvertretender Sprecher
Fon +49 5323 72-7141
E-Mail joerg.mueller@tu-clausthal.de

Architektur aus Bits und Bytes

Institute of Applied Software Systems Engineering (IPSSE)

Architecture from bits and bytes

Von der Kaffeemaschine über Handys und Herzschrittmacher bis zum Flugzeug: Heute gibt es kaum noch ein Produkt, das ohne Software auskommt. Die auf winzigen Mikrochips versteckten Programme steuern dabei die unterschiedlichsten Abläufe, gelten als eine Art Gehirn aller Technik und sind ausgesprochen komplex. In einem gängigen Auto etwa steckt Software im Umfang von rund 100 Millionen Befehlszeilen. Würde man diese auf DIN-A4-Seiten ausdrucken und aneinanderreihen, könnte man darauf Europa durchqueren. Denkt man etwa an das selbstfahrende Fahrzeug der Zukunft, wird die Software noch deutlich komplexer und umfangreicher werden.

Softwareentwickler brauchen deshalb künftig nicht nur immer mehr Know-how, sondern auch innovative Werkzeuge und Systeme, die der Komplexität der Anforderungen gerecht werden und zugleich kostengünstig und variabel sind. Daran arbeiten im Forschungsverbund Institute for Applied Software Systems Engineering (IPSSE) Wissenschaftler der TU Clausthal gemeinsam mit Fachkollegen der TU Braunschweig. Das Institut wird von namhaften Unternehmen unterschiedlicher Branchen gestützt und auch mitfinanziert.

From coffee machines, through mobile phones and pacemakers, to aircraft – most products released these days include some kind of software element. The almost certainly complex programs hidden on the tiny microchips control all manner of processes, in a way acting as the brains behind the technology. A standard passenger car conceals around 100 million lines of code. If you printed this out onto standard paper and lined the pieces up end-to-end, then the line would stretch right across Europe. When it comes to the self-driving car of the future, the software will be even more complex and extensive.

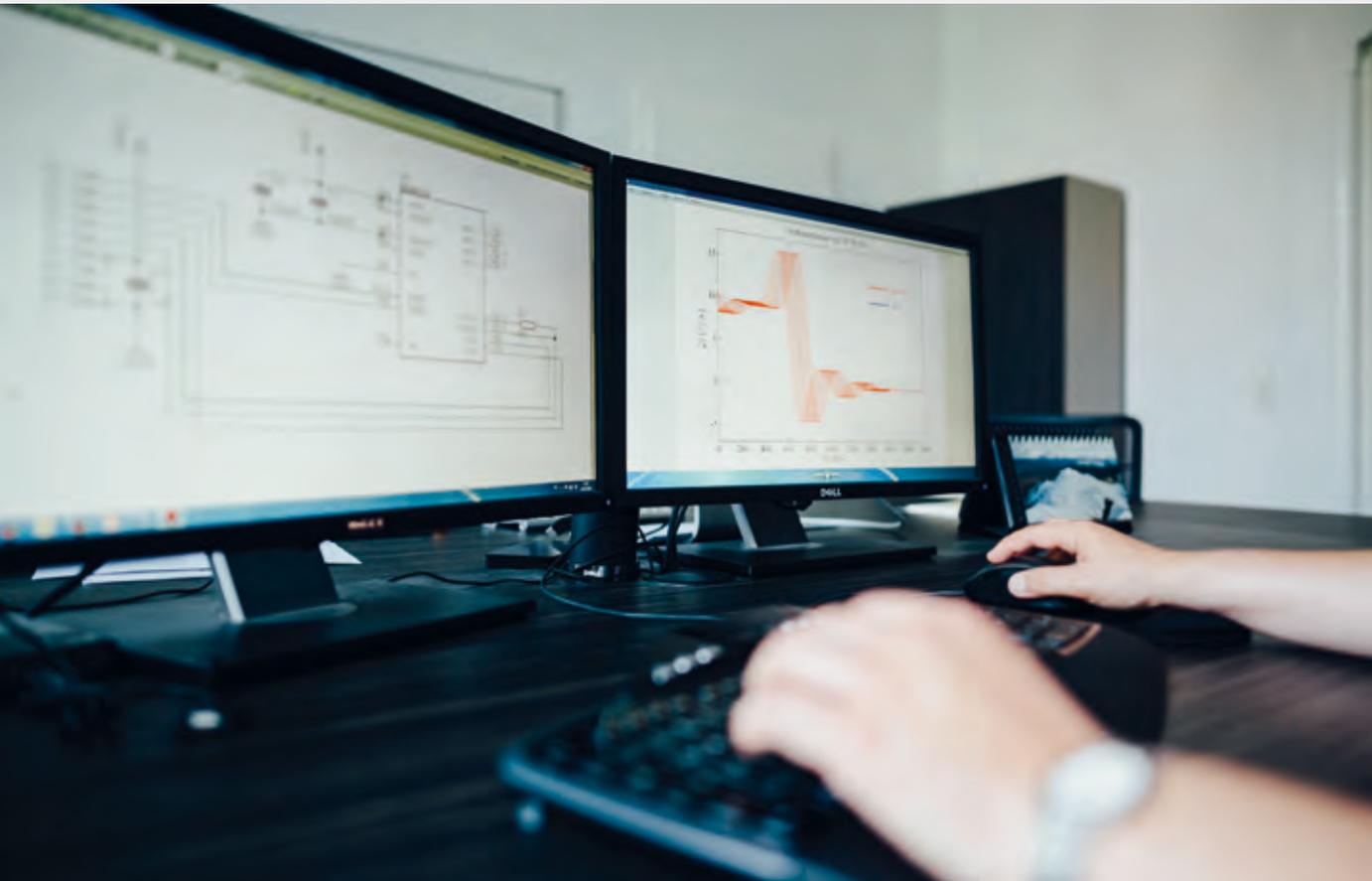
Software developers of the future therefore don't just need ever greater knowledge, they also need innovative tools and systems that can deal with the complexity of requirements, while at the same time remaining affordable and flexible. This is the problem addressed by the research association formed by the Institute for Applied Software Systems Engineering (IPSSE) at TU Clausthal and their expert colleagues at Braunschweig University of Technology. The institute is supported and partially funded by notable companies from various sectors.





Ein Schwerpunkt des Forschungsverbunds liegt auf modularen Architekturen. Dabei kommen Softwarebausteine zum Einsatz, die eine unkomplizierte Veränderung und Weiterentwicklung eines Programms ermöglichen. Das senkt den Aufwand und zugleich die Gefahr, dass sich bei Änderungen fatale Fehler einschleichen. Die Wissenschaftler beschäftigen sich außerdem mit Konzepten, die die Verteilung der Aufgaben auf Hard- und Software optimieren. Denn nur was auch längerfristig Bestand haben soll, darf in Hardware gegossen werden. Komponenten dagegen, die veränderbar und damit leicht zugänglich bleiben sollen, gehören in die Software. Die IPSSE-Forscher wollen zudem Ingenieuren das Programmieren erleichtern und entwickeln dafür geeignete Werkzeuge. Mit

One focus area for the research association is modular architecture. Their approach employs software components that provide an uncomplicated way to modify and extend a program. This reduces both the workload and the risk that fatal errors are introduced by changes. The researchers are also investigating concepts that can provide optimization of task distribution between hardware and software. They work on the principle that only elements intended to last for a long time should be cast as hardware. By contrast, components that are changeable, and therefore need to be readily accessible, should be realized in software. IPSSE researchers also want to make programming easier for



diesen können auch die innovativen Methoden der anderen Forschungsschwerpunkte leichter in die praktische Anwendung gebracht werden.

Nicht zuletzt will das Institut den Nachwuchs auf diesem Gebiet fördern. Studenten können von einem praxisnahen Masterstudiengang und maßgeschneiderten Schulungen profitieren. Und die Absolventen haben gute Chancen auf einen attraktiven Arbeitsplatz in der der Industrie.

engineers and are developing suitable tools for the job. Their work has the additional goal of making it easier to implement practical applications using the innovative methods developed in the other research focus areas.

It is important to the Institute to also support budding researchers in this field. Students can benefit from a practical master's program alongside a tailored program of instruction. What is more, the graduates have a good chance of getting an attractive job in industry.

■ KONTAKT

Prof. Dr. Andreas Rausch
Leiter

Fon +49 5323 72-7160

E-Mail andreas.rausch@tu-clausthal.de



Fakultäten und Institute

Faculties and Institutes



■ Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften

- Institut für Anorganische und Analytische Chemie
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien
- Institut für Metallurgie
- Institut für Nichtmetallische Werkstoffe
- Institut für Organische Chemie
- Institut für Physikalische Chemie
- Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
- Institut für Technische Chemie
- Institut für Theoretische Physik
- Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik

■ Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

- Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Institut für Bergbau
- Institut für deutsches und internationales Berg- und Energerecht
- Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme
- Institut für Endlagerforschung
- Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
- Institut für Erdöl- und Erdgastechnik
- Institut für Geologie und Paläontologie
- Institut für Geophysik
- Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
- Institut für Umweltwissenschaften
- Institut für Wirtschaftswissenschaft

■ Fakultät für Mathematik/ Informatik und Maschinenbau

- Institut für Angewandte Stochastik und Operations Research
- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik
- Institut für Elektrische Informationstechnik
- Institut für Elektrochemie
- Institut für Informatik
- Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit
- Institut für Maschinenwesen
- Institut für Mathematik
- Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
- Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik
- Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren
- Institut für Technische Mechanik
- Institut für Thermische Verfahrenstechnik und Prozesstechnik
- Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen

■ Faculty of Natural and Materials Science

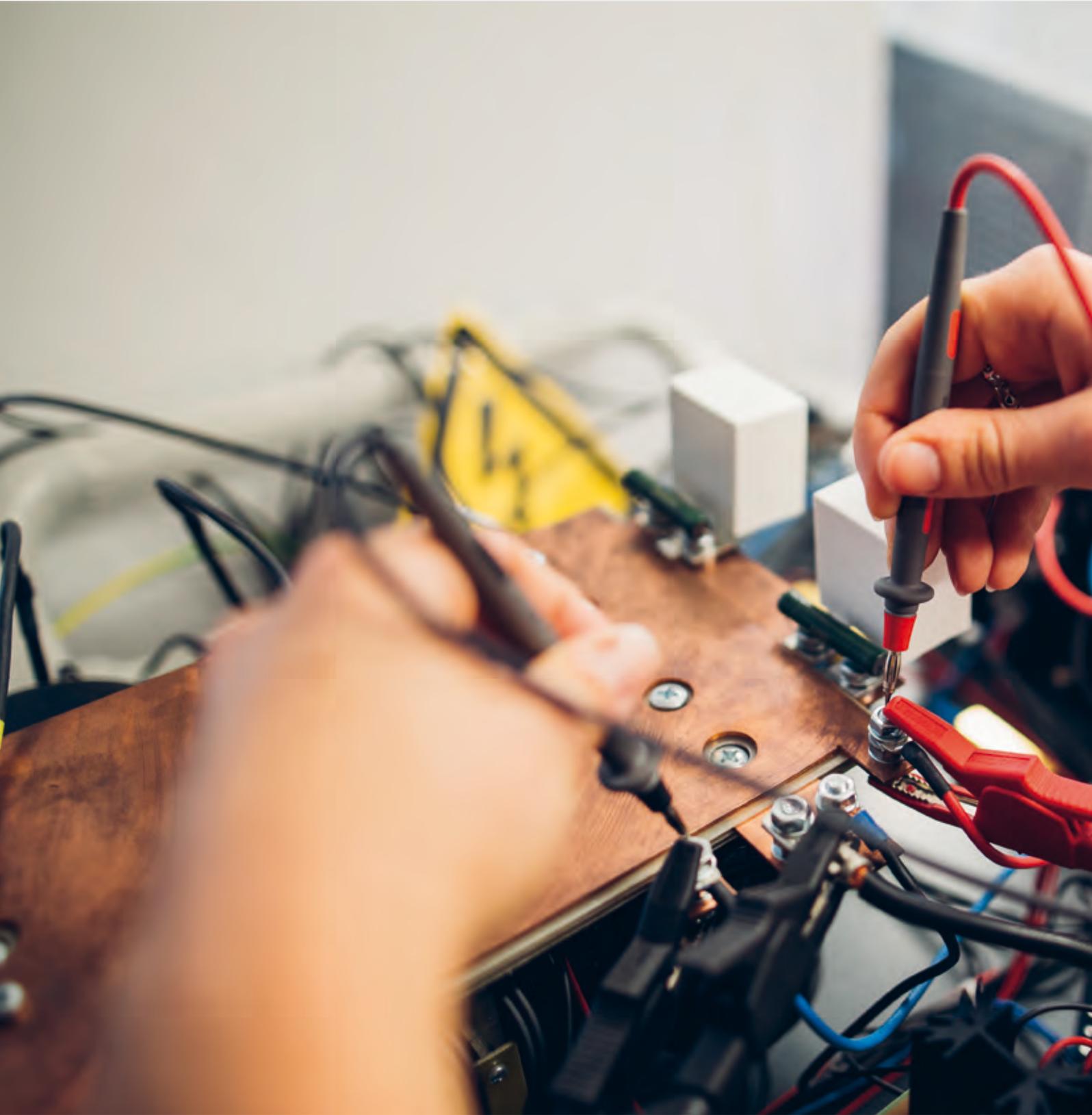
- Institute of Energy Research and Physical Technologies
- Institute of Inorganic and Analytical Chemistry
- Institute of Materials Science and Engineering
- Institute of Metallurgy
- Institute of Non-Metallic Materials
- Institute of Organic Chemistry
- Institute of Physical Chemistry
- Institute of Polymer Materials and Plastics Engineering
- Institute of Technical Chemistry
- Institute of Theoretical Physics

■ Faculty of Energy and Management Science

- Institute of Disposal Research
- Institute of Electrical Power Engineering and Energy Systems
- Institute of Energy Process Engineering and Fuel Technology
- Institute of Environmental Sciences
- Institute of Geology and Paleontology
- Institute of Geophysics
- Institute of Geotechnical Engineering and Mine Surveying
- Institute of German and International Mining and Energy Law
- Institute of Management and Economics
- Institute of Mineral and Waste Processing, Waste Disposal and Geomechanics
- Institute of Mining
- Institute of Petroleum Engineering

■ Faculty of Mathematics/ Computer Science and Mechanical Engineering

- Institute of Applied Mechanics
- Institute of Applied Stochastics and Operations Research
- Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering
- Institute of Computer Science
- Institute of Electrical Information Technology
- Institute of Electrochemistry
- Institute of Mathematics
- Institute of Mechanical Engineering
- Institute of Particle Technology
- Institute of Plant Engineering and Fatigue Analysis
- Institute of Process and Production Control
- Institute of Separation and Process Technology
- Institute of Tribology and Energy Conversion Machinery
- Institute of Welding and Machining





Kontakte Contacts



Universität University

Technische Universität Clausthal
Clausthal University of Technology
 Adolph-Roemer-Straße 2a
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Fon: +49 5323 72-0
 E-Mail: info@tu-clausthal.de

Vizepräsident für Forschung und Technologietransfer

**Vice-President Research and
Technology Transfer**
 Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts
 Fon: +49 5323 72-3901
 E-Mail: vpf@tu-clausthal.de

Technologietransfer und Forschungsförderung

Technology Transfer and Research Funding
 Dipl.-Geophys. Mathias Liebing
 Fon: +49 5323 72-7754
 E-Mail: transfer@tu-clausthal.de

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

**Communication Services and
Media Relations**
 Christian Ernst, M.A.
 Fon: +49 5323 72-3904
 E-Mail: presse@tu-clausthal.de

www.tu-clausthal.de

Forschungsschwerpunkte Research Focus Areas

Nachhaltige Energiesysteme
Sustainable Energy Systems
 Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
 Institut für Elektrische Energietechnik
 und Energiesysteme
 Leibnizstraße 28
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Fon: +49 5323 72-2570
 E-Mail: hans-peter.beck@tu-clausthal.de

Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz

**Raw Materials Supply and
Resource Efficiency**
 Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
 Institut für Aufbereitung, Deponietechnik
 und Geomechanik
 Walther-Nernst-Straße 9
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Fon: +49 5323 72-2735 / 2038
 E-Mail: goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte

**Innovative Materials and Processes for
Competitive Products**
 Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling
 Institut für Schweißtechnik und Trennende
 Fertigungsverfahren
 Agricolastraße 2
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Fon: +49 5323 72-3776
 E-Mail: volker.wesling@tu-clausthal.de

Offene Cyberphysische Systeme und Simulation

**Open Cyber-Physical Systems
and Simulation**
 Prof. Dr. Jörg Müller
 Institut für Informatik
 Julius-Albert-Straße 4
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Fon: +49 5323 72-7141
 E-Mail: joerg.mueller@tu-clausthal.de

Forschungszentren Research Centers

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)

Energy Research Center of Niedersachsen
Am Stollen 19A
38640 Goslar
Fon: +49 5321 3816-8000
E-Mail: geschaeftsstelle@efzn.de

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM)

Clausthal Center of Material Technology
Agricolastraße 2
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49-5323 72-3330
E-Mail: sekretariat@czm.tu-clausthal.de

Simulationswissenschaftliches Zentrum Clausthal – Göttingen (SWZ)

Simulation Science Center
Arnold-Sommerfeld-Straße 6
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-2966
E-Mail: alexander.herzog@tu-clausthal.de

Forschungskooperationen Collaborative research projects

Batterie- und Sensoriktestzentrum Goslar Battery and Sensor Test Center

Am Stollen 19H
38640 Goslar
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
Fon: +49 5321 3816-8005
E-Mail: hans-peter.beck@tu-clausthal.de
Prof. Dr. Wolfgang Schade
Fon: +49 5321 3816-8410
E-Mail: wolfgang.schade@tu-clausthal.de

Drilling Simulator Celle

Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt
Baker-Hughes-Straße 5
29221 Celle
Fon: +49 171 2284041
E-Mail: joachim.oppelt@tu-clausthal.de

Forschungsplattform ENTRIA

ENTRIA Research Platform
Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Institut für Endlagerforschung
Adolph-Roemer-Straße 2a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-4920
E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de

KIC EIT Raw Materials
und
German Resources Research
Institute (GERRI)
und
Recyclingcluster wirtschaftsstrategische
Metalle (REWIMET)
Cluster for Recycling of Economically
Strategic Metals (REWIMET)
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik
und Geomechanik
Walther-Nernst-Straße 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-2735 / 2038
E-Mail: goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Campus Funktionswerkstoffe
und -strukturen
Campus Functional Materials and Structures
Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners
Institut für Polymerwerkstoffe und
Kunststofftechnik
Agricolastraße 6
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-1910
E-Mail: dieter.meiners@tu-clausthal.de

DFG-Transferprojekt: Emissionsarme
Synthese von Titanlegierungen
DFG Transfer Project: Low-emission
Synthesis of Titanium Alloys
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gock
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik
und Geomechanik
Walther-Nernst-Straße 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-2037 / 2038
E-Mail: gock@aufbereitung.tu-clausthal.de

DFG-Graduiertenkolleg: SocialCars
German Research Foundation Research
Training Group: Social Cars
Prof. Dr. Jörg Müller
Institut für Informatik
Julius-Albert-Straße 4
38678 Clausthal-Zellerfeld
Fon: +49 5323 72-7141
E-Mail: joerg.mueller@tu-clausthal.de

Institute for Applied Software Systems
Engineering (IP SSE)
Prof. Dr. Andreas Rausch
Wallstraße 6
38640 Goslar
Fon: +49 5323 72-7160
E-Mail: andreas.rausch@tu-clausthal.de



Impressum

Herausgeber

Der Präsident der Technischen Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Straße 2 a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Postfach 12 53, 38670 Clausthal-Zellerfeld
Fon: (05323) 72-0
Fax: (05323) 72-3500
E-Mail: praesident@tu-clausthal.de
Internet: www.tu-clausthal.de

Redaktion

Christian Ernst, Mathias Liebing

Text

Andrea Hoferichter, Frank Luerweg

Übersetzung

Tech GmbH, Magdeburg

Satz und Gestaltung

Melanie Bruchmann

Bildnachweis

Alle Fotos von Christian Kreuzmann, außer
S. 2 links, 6, 23, 69, 70, 71 (Olaf Möldner)
S. 2 rechts, 63, 64 (Christian Ernst)
S. 21 (Ansgar Pudenz)
S. 25, 33 (Fotolia.com)
S. 31 (HHLA)
S. 36 (Astrid Strüber)
S. 57, 60, 61 (Archiv)
S. 67 (k+s)
S. 95 unten (Harzwasserwerke)

Druck

Quensen Druck + Verlag GmbH, Hildesheim

1. Auflage, Juli 2016

The background features a complex geometric pattern of white and light green hexagons and diamonds on a light green background. The shapes are interconnected, creating a network-like structure. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on geometric forms.

www.tu-clausthal.de