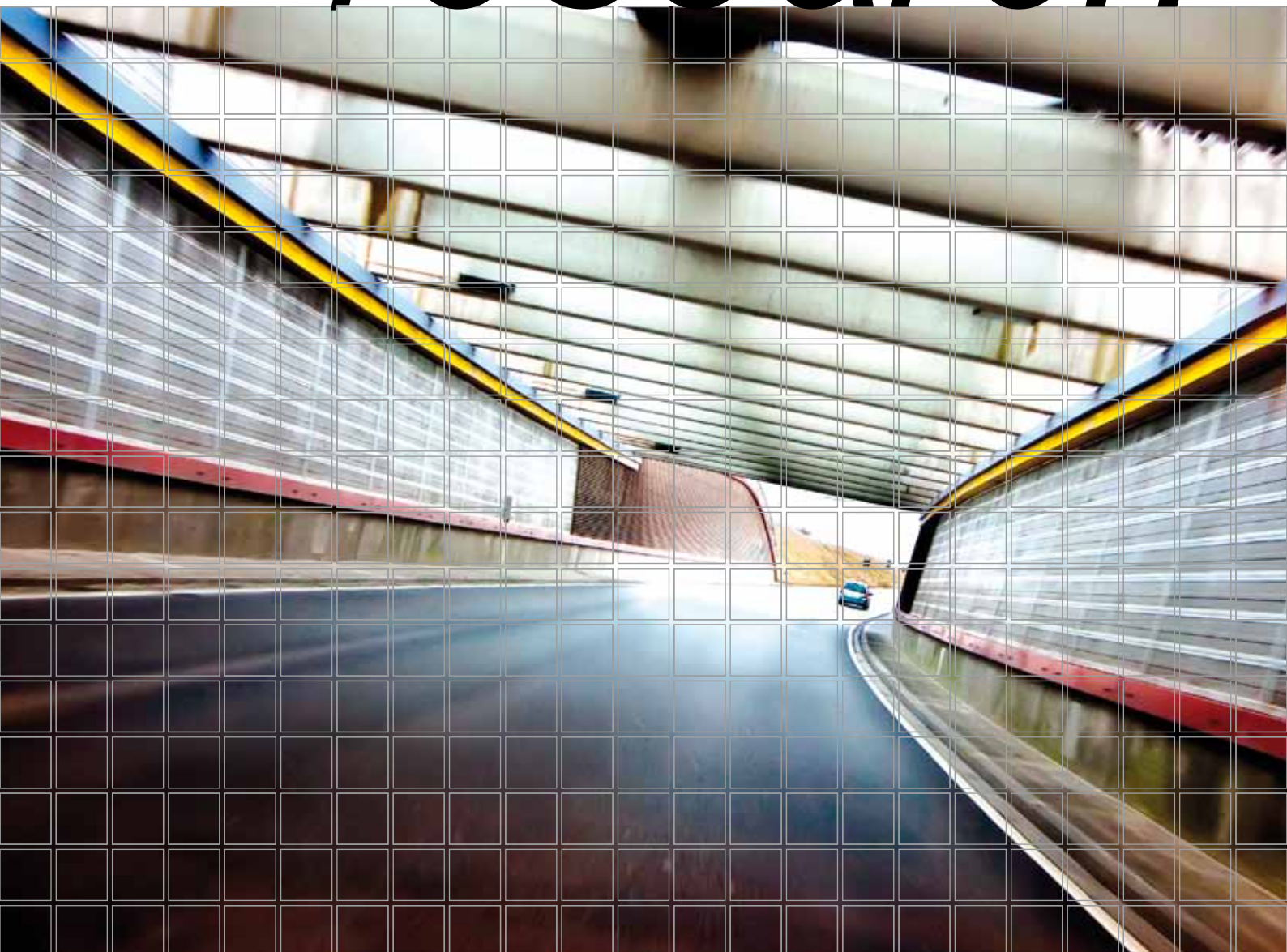


# *TU GRAZ* research



## Forschen auf der Überholspur

Mobility & Production an der TU Graz

## Research in the Fast Lane

Mobility & Production at Graz University of Technology



# Contents

## Preface

p. 4

---

### ■ Face to Face

*We ask well-known experts for a statement on our current topic of focus*

Together to Success

p. 6

An interview with Volker Schulte, head of development at GE Jenbacher  
*Ines Hopfer-Pfister*

---

### ■ Focus: Mobility & Production

*Scientists present selected projects and research areas in the framework of the FoE Mobility & Production*

“Electrified Drives”: Opportunities and Challenges in the Various Vehicle Categories  
*Helmut Eichlseder*

p. 10

Smart Production Graz

p. 14

*Christof Sommitsch, Ralf Kolleck*

VIRTUAL VEHICLE: Research Partnership for the Development of the Vehicles of the Future  
*Jost Bernasch*

p. 18

Research on Lithium-Ion Conductors for Batteries

p. 21

*Illie Hanzu, Martin Wilkening*

Sustainable Railway Infrastructure

p. 24

*Stefan Marschnig*

---

### ■ Life

*Research and technology in everyday life: how results of research affect our lives and can improve them*

The Guardrail as Ramp – the Vehicle Takes Off

p. 27

*Ernst Tomasch*

---

### ■ Cooperations

*Conducting research and development together: how interdisciplinary cooperation between experts leads to success and further development*

Graz University of Technology and Magna Extend their Cooperation Agreement for Another 5 Years

p. 31

*Ralf Kolleck*

---

### ■ Innovation in Teaching & Research

*What's new in teaching and research: how Graz University of Technology is proving and distinguishing itself as a hotbed of ideas*

Highly Efficient Combustion Concept for Large Gas Engine Wins Houska Prize

p. 35

*Andreas Wimmer*

---

## Imprint

p. 40

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	S. 4
<hr/>	
<b>■ Face to Face</b>	
<i>Wir bitten namhafte Expertinnen und Experten um ein Statement zum Schwerpunktthema</i>	
Gemeinsam zum Erfolg	S. 6
Ein Interview mit Volker Schulte, Leiter der Entwicklungsabteilung von GE Jenbacher <i>Ines Hopfer-Pfister</i>	
<hr/>	
<b>■ Fokus: Mobility &amp; Production</b>	
<i>Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler präsentieren ausgewählte Projekte und Forschungsbereiche im Rahmen des Field of Expertise Mobility &amp; Production</i>	
„Elektrifizierte“ Antriebe – Chancen und Herausforderungen in verschiedenen Fahrzeugkategorien	S. 10
<i>Helmut Eichlseder</i>	
Smart Production Graz	S. 14
<i>Christof Sommitsch, Ralf Kolleck</i>	
VIRTUAL VEHICLE: Forschungsk Kooperationen für die Entwicklung der Fahrzeuge von morgen	S. 18
<i>Jost Bernasch</i>	
Forschung an Lithium-Ionenleitern für Batterien	S. 21
<i>Illie Hanzu, Martin Wilkening</i>	
Nachhaltige Eisenbahninfrastruktur	S. 24
<i>Stefan Marschnig</i>	
<hr/>	
<b>■ Life</b>	
<i>Forschung und Technik im Alltäglichen – Wie Forschungsergebnisse auf unser Leben wirken und es verbessern können</i>	
Die Leitschiene als Rampe – Fahrzeuge heben ab	S. 27
<i>Ernst Tomasch</i>	
<hr/>	
<b>■ Cooperations</b>	
<i>Gemeinsam forschen und entwickeln – Wie spezialisierte interdisziplinäre Zusammenarbeit in Erfolg und Weiterentwicklung resultiert</i>	
TU Graz und Magna verlängern ihre Zusammenarbeit um weitere fünf Jahre	S. 31
<i>Ralf Kolleck</i>	
<hr/>	
<b>■ Innovation in Teaching &amp; Research</b>	
<i>Neues aus dem Bereich Lehre und Forschung – Wie sich die TU Graz als erfolgreiche „Ideenschmiede“ bewährt und auszeichnet</i>	
Preisgekrönt: Gasmotoren-Verbrennungskonzept mit Houska-Preis ausgezeichnet	S. 35
<i>Andreas Wimmer</i>	
<hr/>	
<b>Impressum</b>	S. 40





Liebe Kolleginnen und Kollegen,  
sehr geehrte Forschungspartner und  
an unserer Forschung Interessierte!

Dear colleagues,  
research partners and those  
interested in our research,



Horst Bischof,  
Vizerektor für Forschung.

Horst Bischof,  
Vice Rector for Research.

Dieses TU Graz *research* ist bereits das dritte Heft unter meiner Ägide als Vizerektor für Forschung, was wiederum heißt, dass ich bereits ein volles Jahr im Amt bin. Die Zeit vergeht wahnsinnig schnell. Es war ein sehr turbulentes Jahr, geprägt von den Verhandlungen zur Leistungsvereinbarung mit dem Ministerium. Zum Zeitpunkt, wo ich diese Zeilen schreibe, weiß ich leider noch nicht, wie die Verhandlungen ausgehen. Wenn Sie das Heft lesen, kennen wir die Zahlen bereits. Aber der Verhandlungsverlauf bisher stimmt mich vorsichtig optimistisch, dass uns das vom Ministerium zugesagte Budget erlaubt, den einen oder anderen Impuls in der Forschung zu setzen. Ich bin aber auch Realist und weiß, dass wir leider nicht jene Summen bekommen werden, die wir tatsächlich benötigen. Die Zielsetzung beim Einsatz der Mittel geht daher in Richtung des Stärkens der Stärken und trägt damit zu einer Profilbildung innerhalb der Forschungslandschaft der TU Graz bei. Eines der Stärkefelder der TU Graz ist zweifelsohne der Bereich Mobility & Production, hier gibt es auch eine sehr starke Anbindung an die regionale Wirtschaft. Diese Ausgabe des TU Graz *research* ist diesem auch international sichtbaren Bereich gewidmet.

Die Forschungen im FoE Mobility & Production an der TU Graz sind ein ganz wesentlicher Motor für den Automobil Cluster in der Steiermark. Um einige Beispiele zu nennen: Die TU Graz betreibt gemeinsam mit anderen Partnerinnen und Partnern das größte K2-Kompetenzzentrum in Österreich, das „Virtuelle Fahrzeug“. Dieses Kompetenzzentrum hat gerade eine sehr erfolgreiche Evaluierung hinter sich und wurde für weitere fünf Jahre verlängert. Gemeinsam mit Magna hat die TU Graz das österreichweit größte Public-Private-Partnership-Modell in Form des Frank Stronach Institute [FSI] etabliert. Erst kürzlich ist es uns gelungen, den Vertrag zwischen Magna und TU Graz um weitere

This issue of TU Graz *research* is the third in my tenure as Vice-Rector of Research, which means that I've already been in office for one full year. Time goes very quickly. It was a very turbulent year, shaped by negotiations with the ministry over the performance agreement. To date, as I write these lines, I do not know the results of the negotiations; by the time you're reading this issue, however, we'll have the figures at our disposal. The course of the negotiations up to now gives me reason to be cautiously optimistic that the budget promised by ministry will allow us to set at least a few balls rolling in research. But I'm also realistic enough to know that unfortunately we will not receive the amount of funds that we actually need. The use of the funds will go towards strengthening our strengths and they will thus contribute to cultivating a profile in the research community of Graz University of Technology. One of the fields of strength of Graz University of Technology is without doubt Mobility & Production, and this is strongly linked to the regional economy. This issue of TU Graz *research* is dedicated to this field, which also has an international presence.

Research in the FoE Mobility & Production at Graz University of Technology is a driving force behind the automotive cluster in Styria. Just to mention a few examples: Graz University of Technology together with other partners operates the biggest K2 competence centre in Austria – the “Virtual Vehicle”. This competence centre has just completed a very successful evaluation and has been prolonged for another five years. Together with Magna, Graz University of Technology established the biggest Austrian public-private partnership model in the form of the Frank Stronach Institute [FSI]. We've recently managed to extend the contract between Magna and Graz University of Technology for another five years (until 2018). Also, the biggest institute at the university – the Institute of

fünf Jahre (bis ins Jahr 2018) zu verlängern. Auch das größte Institut an der TU Graz, das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik von Helmut Eichlseder, ist dem Bereich Mobility zugeordnet. All dies zeigt, dass im Bereich Mobility wirklich kritische Massen angesiedelt sind und ein Leuchtturm mit internationaler Strahlkraft entstanden ist. Genau deshalb sucht die TU München bzw. die State University St. Petersburg Kooperationen mit der TU Graz.

Neben der Mobility spielt auch die Produktion eine wesentliche Rolle. Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung durch innovative und effiziente Produktionstechnik werden in dem institutsübergreifenden Themenschwerpunkt Smart Production Graz gelebt, mit dem die Kernkompetenzen der beteiligten Institute verbunden werden und Grundlagenforschung in der Produktionstechnik betrieben wird. Die wesentlichen Forschungsthemen sind: ressourceneffiziente Produktion, Modellierung und Simulation in der Metallverarbeitung und Produktion sowie neue interdisziplinäre Konzepte in der Produktionstechnik. Dieses beschriebene Kompetenzfeld ist an keiner anderen österreichischen Universität sichtbar. In dem Heft wird das eine oder andere Beispiel aus diesem Bereich vorgestellt.

Die Weihnachtszeit naht und nach der hektischen Vorweihnachtszeit bleibt hoffentlich während der Feiertage auch etwas Zeit, in diesem Forschungsjournal zu schmökern. In diesem Sinne wünsche ich bei der Lektüre dieses TU Graz *research* viel Freude und Ihnen und Ihren Familien frohe Weihnachten und einen guten Rutsch.



Horst Bischof

Internal Combustion Engines and Thermodynamics under Helmut Eichlseder is also firmly placed in the field of mobility. All this goes to show that a critical mass has been gathering in the field of mobility and a beacon of international brilliance has come into being. Exactly for this reason TU München and the State University of St. Petersburg are looking for cooperation agreements with Graz University of Technology.

In addition to Mobility, Production also plays an important role. Sustainability and careful use of resources through innovative and efficient production technology is being lived out in the cross-institute core area of Smart Production Graz, where the core competencies of the institutes involved are being joined together and basic research in production technology is carried out. The most important research fields are resource-efficient production, modelling and simulation in metal processing and production, and new interdisciplinary concepts in production technology. This field of competence has no visible profile at any other Austrian university, and examples from it will be described in this issue.

Christmas is approaching and, after the hectic pre-Christmas rush, hopefully they'll be time to browse through our journal during the holidays. In this spirit, I hope you enjoy reading this issue of TU Graz *research*, and I wish you and your families a merry Christmas and a happy new year.

## Gemeinsam zum Erfolg Together to Success

Ines Hopfer-Pfister

**Zusammen mit dem TU Graz-Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik entwickelte der österreichische Gasmotorenhersteller GE Jenbacher ein hocheffizientes Verbrennungskonzept für Gasmotoren, das heuer mit dem zweiten Platz des renommierten Houska-Preises prämiert wurde. Im Interview mit TU Graz research erzählt Volker Schulte, Leiter der Entwicklungsabteilung von GE Jenbacher, über die langjährige Kooperation mit der TU Graz und spricht sich dafür aus, dass es die Aufgabe von Universitäten ist, die Industrie mit innovativen Konzepten vermehrt herauszufordern.**

**Sehr geehrter Herr Schulte, Sie sind General Manager Engineering des Gasmotorenherstellers GE Jenbacher GmbH & Co OG. Seit 2003 gehört das österreichische Unternehmen Jenbacher zum US-Konzern General Electric. Was genau wird in Jenbach produziert, können Sie uns kurz Ihr Produktportfolio darlegen?**

Unser Portfolio besteht aus Gasmotoren der Leistungsklasse von 0.3 MW bis 10 MW. Es umfasst die Jenbacher Produktlinie, die überwiegend für Power-Generation eingesetzt wird und seit 2010 auch die Waukesha-Produktlinie, die überwiegend für mechanischen Kompressorenantrieb verwendet wird.

**Sie sind Leiter der Entwicklung von GE Gas Engines. Wie sieht Ihr Aufgabenbereich aus?**

Ich bin verantwortlich für Produkt- und Technologieentwicklung sowie für das Auftragsengineering. **Wie viel investiert Jenbacher jährlich in Forschung und Entwicklung? Wo setzen Sie in der F&E die Schwerpunkte?**

Wir investieren ungefähr 5 Prozent unseres Umsatzes in Technologieentwicklung. Wir setzen Schwerpunkte in Kernbereichen wie Verbrennungstechnologie, mechanische Komponenten, Steuerungstechnologie und Emissionsreduktion.



Volker Schulte, General Manager Engineering von GE Jenbacher GmbH & Co OG.

Volker Schulte is the general manager of engineering at GE Jenbacher GmbH & Co OG.

**Together with Graz University of Technology's very own Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, the Austrian manufacturer of gas engines – GE Jenbacher – has developed a highly efficient combustion concept for gas engines which picked up second place in the renowned Houska Prize earlier this year. In interview with TU Graz research, Volker Schulte, head of development at GE Jenbacher, talks about the cooperation with Graz University of Technology of many years, and speaks out in favour of the idea that it is the task of universities to increasingly lay down the challenge to industry in the form of innovative concepts.**

Volker Schulte ist General Manager Engineering von GE Jenbacher GmbH & Co OG. Der österreichische Gasmotorenhersteller Jenbacher, mit Firmensitz im namensgebenden Jenbach nahe Innsbruck, ist seit 2003 unter dem Dach des US-Konzerns General Electric (GE). Das Produkt- und Serviceportfolio von GE reicht von Flugzeugtriebwerken und Energieerzeugung über Finanzdienstleistungen und medizinische Bildgebung bis hin zu Fernsehprogrammen und Hochleistungskunststoffen. GE ist in über 100 Ländern tätig und beschäftigt derzeit über 300.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter weltweit.

Volker Schulte is the general manager of engineering at GE Jenbacher GmbH & Co OG. The Austrian gas engine manufacturer Jenbacher, with head office at Jenbach near Innsbruck, has been operating under the umbrella of the US group General Electric (GE) since 2003. The range of products and services of GE includes jet engines, energy production, financial services, medical imaging technologies, television programmes and high-performance plastics. GE has a presence in over 100 countries and employs a workforce of 300,000 world-wide.





© GE Gas Engines

**Die TU Graz ist langjähriger Kooperationspartner von GE Jenbacher. Was schätzen Sie an der TU Graz als Kooperationspartner?**

Wir schätzen die langjährige Erfahrung im Bereich Forschung und Entwicklung für Verbrennungsmotoren und speziell Großmotoren. Wir pflegen sehr enge Beziehungen in unseren Entwicklungsprojekten und sehen die TU Graz als wichtigen Partner, auch um uns neue technologische Richtungen zu eröffnen.

**In welchen konkreten Bereichen gibt es Zusammenarbeiten zwischen GE Jenbacher und der TU Graz?**

Wir haben gemeinsame Projekte, insbesondere bei der Entwicklung von Brennverfahren für Magergasmotoren. Wir vertiefen aber auch die Zusammenarbeit in der Simulation von Brennverfahren. Das Grundgerüst stellt die Entwicklung von Einzylindermotoren dar.

**Mr Schulte, you're the general manager of engineering of gas engine manufacturer GE Jenbacher GmbH & Co OG. The Austrian company Jenbacher is part of the US General Electric group since 2003. What do you make at Jenbacher and could you tell us about your product portfolio?**

Our portfolio consists of gas engines of 0.3 MW to 10 MW capacities. It comprises the Jenbacher product line, which is mainly used for power generation, and since 2010 also the Waukesha product line, which is chiefly used for mechanical compressor drives.

**You are head of development at the GE Gas Engines division. What is your field of activity?**

I'm responsible for product and technology development and also for contract engineering.

**How much money does Jenbacher invest in R&D on an annual basis? And what are your core areas in R&D?**

We invest about 5% of our turnover in technology development. Our core areas are in combustion technology, mechanical components, control technology and emissions reduction.



© GE Gas Engines



### **Inwieweit profitiert Ihr Unternehmen von dieser Kooperation?**

Wir haben die Möglichkeit, sehr frühe experimentelle Ergebnisse neuer Brennverfahren zu erhalten, weit bevor die ersten Prototypen gebaut werden. Dies sind deutliche Vorteile hinsichtlich der Entwicklungszeiten neuer Motoren.

### **Sind zukünftige Kooperationen geplant, wenn ja, wie sehen diese aus?**

Das sind Dinge, die wir in der Regel nicht öffentlich diskutieren. Wir setzen aber auf langfristige Zusammenarbeit.

### **Was würden Sie sich im Bereich Lehre und Forschung von der TU Graz wünschen?**

Ich denke, als Universität ist es wichtig, gute Kontakte zur Industrie zu haben. Das macht die Forschung und Lehre relevant und ist aus meiner Sicht auch ein großer Vorteil für die Ausbildung der Studierenden. Es gibt ein gutes Gefühl, an neuen Entwicklungen der Industrie mitzuwirken und diese auch zu gestalten. Gleichzeitig muss eine universitäre Zusammenarbeit mit der Industrie aber auch die Industrie herausfordern können. Das heißt, innovative Konzepte müssen von dem Universitätspartner kommen und den Status quo der Industrie infrage stellen.

### **Was sind Ihrer Meinung nach die Anforderungen aus der Praxis an die Ausbildung der Zukunft?**

Ich bin überzeugt, dass im Ingenieurbereich auch in Zukunft eine solide Grundausbildung in den grundlegenden Disziplinen wie Mathematik, Mechanik, Strömungsmechanik und Konstruktions- und Fertigungstechnik absolut notwendig ist. Darüber hinaus ist sicher eine frühe Einbindung in Projektarbeit möglichst mit der Industrie wichtig. Dadurch wird die Fähigkeit zur Arbeit in Projektteams früh geschult und Ingenieurslösungen werden gefunden.

### **Graz University of Technology has been a cooperation partner of GE Jenbacher for many years. What do you value most about Graz University of Technology as a cooperation partner?**

We value the many years of experience in the research and development of combustion engines and in particular large-scale engines. We cultivate close relations in our development projects and see Graz University of Technology as an important partner – also in helping us open up new technological directions.

### **In what specific areas do GE Jenbacher and Graz University of Technology collaborate?**

We're pursuing joint projects – in particular in the development of combustion processes for lean-burn gas engines. We are also intensifying cooperation in the simulation of combustion processes. The basic framework is the development of single-cylinder engines.

### **What does your company get out of this cooperation?**

We get the experimental results of new combustion processes very early on – long before the first prototypes are built. There are clear advantages in this regarding the development times of new engines.

### **Have you got any new cooperation projects in the pipeline, and if so, what?**

This is something we don't discuss in public. But we place emphasis on long-term collaboration.

### **How could Graz University of Technology best serve your needs in the field of teaching and research?**

I think it's important for universities to have good contacts with industry. It makes research and teaching relevant and, in my opinion, is of great benefit for students' education. It's a good feeling to be involved in new developments in industry and to be shaping them. At the same time, a university has to work together with industry and be able to lay down challenges. This means that innovative concepts must come from the partner university and question the status quo of the industry.





**Für die Entwicklung des Gasmotors J920 wurde Ihnen gemeinsam mit der TU Graz der zweite Platz des Houska-Preises verliehen. Was ist das Besondere an diesem Motor?**

Er ist der erste High-speed-Motor seiner Klasse. Er hat eine Nennleistung von 9,5 MW bei 1.000 rpm. Das resultiert in einer hohen Leistungsdichte und macht ihn ideal geeignet für verteilte Energieerzeugung und flexible Stromerzeugung – auch im Einklang mit erneuerbaren Energien. Er hat einen elektrischen Wirkungsgrad von mehr als 48,5 % und einen Gesamtwirkungsgrad inklusive Wärmenutzung von 90 %.

**Was bedeutet eine Auszeichnung wie der Houska-Preis für ein Unternehmen wie GE Jenbacher?**

Wir sind stolz darauf, einen solchen Preis für innovative Produktentwicklung zu gewinnen.

**Wenn wir in die Zukunft blicken: Wie sehen Ihrer Meinung nach die Großmotorenkonzepte der Zukunft aus? Was sind die Vor- und Nachteile?**

Die Leistungsdichte und Wirkungsgrade werden weiter steigen. Die Emissionen werden ein wichtigeres Thema, insbesondere bei Dieselmotoren. Gasmotoren werden dynamischer werden müssen und werden bessere Lastwechseleigenschaften haben müssen als heute, um im Bereich der flexiblen Energieversorgung und in Anwendungen außerhalb der stationären Stromerzeugung eine Rolle spielen zu können. ■

**In your opinion, what demands will be made on the education of the future from the point of view of practical experience?**

I'm convinced that a solid basic training in the fundamental disciplines, such as mathematics, mechanics, fluid mechanics and design and manufacturing technology will continue to be absolutely necessary for the future. Furthermore, an early integration in project work as far as possible with industry is definitely important. This will ensure an ability to work in a project team early on to find engineering solutions.

**GE Jenbacher and Graz University of Technology have both been awarded second place in the Houska Prize for the development of the J920 gas engine. What's so special about this engine?**

It's the first high-speed engine of its class. It has a rated output of 9.5 MW at 1,000 rpm. This gives it a high power density, making it ideally suited for distributed energy production and flexible power generation – also in accordance with renewable energies. It has an electrical efficiency of more than 48.5% and a total efficiency including energy recovery of 90%.

**What does an award like the Houska Prize mean for a company like GE Jenbacher?**

We're very proud to have won such a prize for innovative product development.

**If you look into your crystal ball for a minute, what will be the large-engine concepts of the future? What are their advantages and disadvantages?**

Power density and efficiency will continue to grow. Emissions will become an important topic – especially in diesel engines. Gas engines will have to become more dynamic and will have to have better alternating load properties than today's in order to play a role in the field of flexible energy production and in applications outside stationary power generation. ■

# „Elektrifizierte“ Antriebe – Chancen und Herausforderungen in verschiedenen Fahrzeugkategorien

## “Electrified Drives”: Opportunities and Challenges in the Various Vehicle Categories

Helmut Eichlseder



Helmut Eichlseder ist Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.

Seine Forschungsgebiete umfassen motorische Brennverfahren, alternative Motorkonzepte und Kraftstoffe, Energiemanagement, Fahrzeugantriebssysteme sowie umweltrelevante Fragestellungen.

Helmut Eichlseder is head of the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics. His research areas cover engine combustion methods, alternative engine concepts and fuels, energy management, vehicle drive systems and environmental issues.

**Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der TU Graz forscht nicht nur an Verbrennungsmotoren unterschiedlichster Größe und Anwendung, sondern auch an der Elektrifizierung derartiger Antriebe: Diese Aktivitäten umfassen neben Pkw-Antrieben auch den Einsatz in Zweiradfahrzeugen sowie bei Nutzfahrzeugen und Off-Road-Maschinen und untersuchen deren Potenziale und Herausforderungen bei der Anwendung.**

Die Hybridisierung von batterieelektrischen Fahrzeugen ist seit Beginn der Entwicklung von Elektrofahrzeugen vor mehr als 100 Jahren ein Thema. Bereits Ferdinand Porsche hat mit dem Lohner-Porsche Mixte 1902 einen seriellen Hybridantrieb entwickelt und in Serie gebracht, um die eingeschränkte Reichweite seines elektromotorisch angetriebenen Fahrzeuges zu vergrößern. Rein batterieelektrische Pkw (BEV Battery Electric Vehicles) spielen heute aus mehreren Gründen nur als Nischenlösung für innerstädtischen Verkehr eine (überschaubare) Rolle, der überwiegende Anteil von mehr als 99,9 % aller Pkw ist mit verbrennungsmotorischen Antrieben ausgestattet. Eine Kombination von Verbrennungs- und Elektromotoren zur Vermeidung der jeweiligen Schwächen wird mit Hybridantrieben angestrebt. Diese sind seit einigen Jahren und in unterschiedlichen Konfigurationen auf dem Markt und wurden mittlerweile weltweit etwa über sechs Millionen Mal verkauft.

Während der erforderliche Aufwand und die Potenziale der verschiedenen Konzepte hinsichtlich Verbrauch und Emissionen bei Pkw-Anwendungen ganz gut bekannt sind, sind geeignete Konfigurationen und Möglichkeiten bei Anwendung in anderen Segmenten noch nicht ausreichend untersucht. Ausgehend von am Institut durchgeführten Forschungsprojekten, die sich im Rahmen von Diplom-

*The Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics at Graz University of Technology is not only engaged in the research of the working process of internal combustion engines (ICE) but also in the electrification of such drivetrains. These activities not only cover passenger car drivetrains, but also the implementation in two-wheeler vehicles, as well as commercial and off-road vehicles and their potentials and aspects regarding application.*

The hybridization of battery-driven electric vehicles has been a research topic since the early days of the development of electric vehicles more than 100 years ago. In 1902 Ferdinand Porsche developed the Lohner-Porsche Mixte, a serial hybrid drive with hub-mounted electric motors, and began series production in order to enlarge the restricted range of its electrically driven vehicle. These days, purely battery-driven electric passenger vehicles (BEV) only play a minor role as niche solutions for inner-city traffic; 99.9 % of all passenger cars are equipped with ICE power trains.

Hybridization aims at a combination of combustion engines and electric motors to avoid their respective weaknesses. Such vehicles can be found in various configurations on the market with an actual share of 6 to 7 million of the worldwide vehicle fleet of about 1 billion. The necessary efforts and the potentials of different concepts regarding consumption and emissions are well known for passenger car applications, whereas for other segments appropriate concepts and possible implementations have not been thoroughly investigated yet.

Starting with research projects carried out at the Institute in the course of diploma and doctoral theses, which exemplarily cover the topics of the measurement and simulation of hybrid vehicles in actual city traffic<sup>1</sup>, the investigation of hybrid strategies for pas-



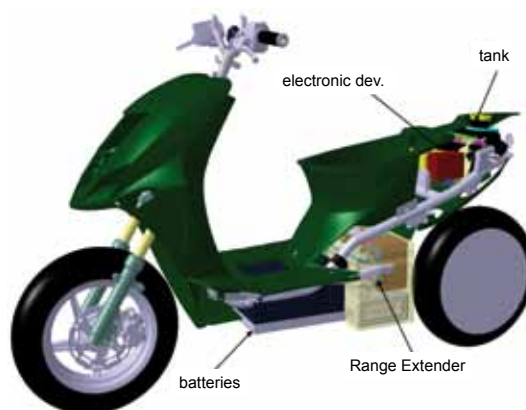


© fotolia.com

arbeiten und Dissertationen beispielsweise mit der Messung und Simulation von Hybridfahrzeugen im realen Stadtverkehr<sup>1</sup>, der Untersuchung von Hybridstrategien für Pkw-Dieselmotoren<sup>2, 5</sup> sowie der Methodik für den Vorentwicklungsprozess von teil-elektrifizierten dieselmotorischen Pkw-Antrieben<sup>3</sup> beschäftigen, wird aktuell die Auslegung von Hybridkonzepten für Anwendungen im Zweiradbereich und bei Off-Road-Fahrzeugen in mehrjährigen Forschungsprojekten untersucht. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden:

#### „Range Extender“-Konzept für Stadtscooter

Heute werden Stadtscooter überwiegend von kostengünstigen Zweitaktvergasermotoren angetrieben, die für die Erfüllung zukünftiger Abgasgrenzwerte in der derzeitigen Form nicht geeignet sind. Diese emissionsseitigen Anforderungen können entweder durch signifikante technologische Ertüchtigung an Zweitaktmotoren, deren Ersatz durch Viertaktmotoren oder batterieelektrische Antriebe erfüllt werden, die allesamt kostenintensiv sind.



senger car diesel engines<sup>2, 5</sup>, and the methodology for the pre-development process of partly electric diesel passenger engine powertrains<sup>3</sup>, the layout of hybrid concepts for application in the two-wheeler and off-road sectors is being investigated in long-term research projects and will be presented here.

#### Range extender concept for inner city scooters

Nowadays the scooter market is dominated by low-cost two-stroke carbureted engines, which will not be able to fulfill the future exhaust emission

**Abb. 1: Einbaustudie für einen Hybrid Scooter mit Range Extender<sup>4</sup>.**

*Fig. 1: Packaging study of the concept for a hybrid scooter with REX<sup>4</sup>.*





Im Rahmen des im COMET-Programm der FFG geförderten Projektes EcoPowerDrive wurde am Institut eine Bewertung unterschiedlicher Konzeptansätze durchgeführt, aus der eine Hybridvariante in serieller Konfiguration als vielversprechend hervorgeht.

Das in Abb. 1 dargestellte Konzept besteht aus einer Kombination eines Elektro-Scooters mit einer gegenüber einem Serienfahrzeug halbierten Batteriekapazität und einem „Range-Extender“, welcher im Bedarfsfall die Reichweite auf das Niveau einer konventionellen Verbrennungsmotorausführung erweitert. Diese Alternative ist in der Lage, Elektromobilität und damit lokale Emissionsfreiheit zu ermöglichen, ohne die bis dato immanente Reichweitenangst rein elektrischer Fahrzeuge zu verursachen. Die daraus resultierenden Anforderungen an den Verbrennungsmotor sind Kosten-, Gewichts- und Bauraumziele, die direkt aus dem zu 50 % entfallenden Batteriepaket resultieren.

Auf Basis einer Vielzahl ausgeführter Motorenkonzepte und Erfahrungen wurde wegen der einfachen und kompakten Konstruktion ein Zweitaktmotor mit Niederdruck-Direkteinspritzung gewählt und konzipiert. Dafür konnte konstruktiv eine Lösung in einem Standard-Scooter-Fahrgestell – unter Beibehaltung der äußeren Erscheinung eines konventionellen Scooters und unter Erhalt des Stauraumes (Helmfach) – gefunden werden.

Als Antriebsmotor wurde ein Radnabenmotor mit 2 kW effektiver Leistung definiert, der kurzzeitig 3 kW Antriebsleistung und damit recht ansprechende Fahrleistungen bereitstellen kann. Das simulatorisch ermittelte Verbrauchspotenzial von etwa 40 % im Normverbrauch ist sehr ermutigend und soll im Prototyp, der derzeit kurz vor der Fertigstellung steht, ermittelt bzw. verifiziert werden.<sup>4</sup>

regulations due to the lack of the requested durability of exhaust-gas after-treatment systems. These emission-related requirements can only be fulfilled using cost intensive methods, be they via significant technological improvement of two-stroke engines, their replacement by four-stroke engines, or their exchange with battery-driven electric powertrains.

The assessment of different conceptual approaches has resulted in a serial hybrid powertrain as one of the most promising solution.

The concept consists of a combination of an electric scooter with a halved battery size (in comparison to the series vehicle) and a range extender with the possibility, if necessary, to extend the range to the standard one of conventional ICE vehicles. This alternative is able to offer electro-mobility and thus local zero emissions without the immanent “range anxiety” usually caused by purely electric vehicles. The requirements on the ICE concerning cost, weight and packaging are directly derived from the battery size reduction of 50%.

On the basis of numerous engine concepts and experience, a two-stroke engine with low-pressure direct injection was chosen due to its simple and compact design. This concept along with the entire system layout represents an essential part of the sub-project HyScooter, embedded in the funded K-project “EcoPowerdrive”.

For this configuration, all system components could be integrated in a standard scooter chassis while maintaining the appearance of a conventional scooter and conserving the storage space (helmet case). The motor type was defined as hub motor with 2 kW of mechanical power output. For a short time a “boost function” up to 3k W is possible, thus increasing performance and driving fun. The simulated fuel reduction potential of about 40% in average consumption is promising, but naturally depends on the driving profile, which has to be verified in the nearly completed prototype.<sup>4</sup>



### Hybridantriebssystem für Non-Road-Anwendungen

Mit den Emissionsstufen „Euro Stage IV“ bzw. „Tier 4“ tritt 2013/2014 eine Gesetzgebung in Kraft, welche eine effiziente Abgasnachbehandlung auch im Non-Road-Bereich, also bei fahrenden Arbeitsmaschinen wie Baumaschinen etc., unabdingbar macht. Die Hybridisierung kann ein geeignetes Mittel darstellen, um die bestehenden Zielkonflikte bzgl. Emissions- sowie Verbrauchsreduktion bei leistungsstarken Antrieben zu vermindern. Um bezüglich der Gesamtsystemkosten wettbewerbsfähig zu bleiben, ist jedoch eine Reduktion oder aber zumindest eine Vereinfachung des Motors oder der Abgasnachbehandlung erforderlich.

Wesentliches Ziel dieses mit dem Institut für Mechanik und Mechatronik der TU Wien und einem Baumaschinenhersteller durchgeführten und von der FFG geförderten Projektes „GPA Non Road – Hybridantriebsstrang für Off-Road Anwendungen“ ist eine Gesamtsystemoptimierung hinsichtlich Effizienz, Emissionen und Kosten. Damit die im Hybridantrieb vorhandenen Freiheitsgrade optimal genutzt werden können, ist ein Energiemanagement zu entwickeln. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei eine modellprädiktive zyklusbasierte Folgeregelung.

Damit das Gesamtkonzept allgemein auf Baumaschinen wie beispielsweise in Abb. 2 dargestellt anwendbar ist, müssen zunächst die an den Non-Road-Hybridantrieb gestellten Anforderungen vollständig bekannt sein. Daher werden zunächst Lastzyklen von verschiedenen Zielgeräten erhoben. Die Modellierung des Batteriemoduls sowie ein adaptives Energiemanagementsystem sollen die Gesamtsystemoptimierung erweitern. Zur Realisierung reproduzierbarer Prüfstandtests wird ein echtzeitfähiger Batteriesimulator eingesetzt. Durch den Aufbau des Hybridantriebs an einem Prüfstand mit Integration obiger Komponenten und eines Startergenerators (65 kW elektrisch) soll abschließend eine Konzeptabsicherung erfolgen. ■

### Hybrid drivetrain for non-road applications

In the form of Euro Stage IV or Tier 4, an emission legislation comes into effect in 2013/2014 which enforces an efficient exhaust after-treatment in the non-road sector. The hybridization can be a convenient tool to advance the two tasks of emission and fuel consumption reduction and to enable an optimization between these two targets. To remain competitive with respect to the overall system costs, it is also necessary to reduce parts of the engine or the exhaust after-treatment or to at least simplify them.

The focal point of this project funded by Austrian Research Promotion Agency (FFG) and carried out with the Institute for Mechanics and Mechatronics/TU Wien and a non-road vehicle manufacturer is the exposition of a hybrid-propulsion-system for non-road application, including enhanced and alternative combustion concepts as well as the requirements of the market. The main goal will be an optimization with regard to efficiency, emissions and cost. To be able to generally apply the overall concept to construction vehicles, the demands on the non-road hybrid drive have to be fully known. Therefore, cycles of different target devices are being collected. An essential component of energy management is a model predictive cycle-based control sequence.

The development and the online-calibration of battery models are necessary to carry out reproducible tests at the engine test bed. A real-time battery simulator will be fundamental for the validation of the complete concept. The overall concept, developed and optimized within the project, should be the modeling of a battery-unit and of an adaptive energy-management-system and will enhance the optimization of the complete system. Finally, the hybrid drive will be built up on a test bed by integrating the above components and a starter-generator (65 kW) to ensure this concept. ■

Abb. 2: Antriebsstrang Non Road Fahrzeug.

Fig. 2: Drivetrain non-road vehicle.

### Literatur/References

- <sup>1</sup> Glauning Franz: Messung und Simulation von Hybridfahrzeugen im realen Stadtverkehr, Diplomarbeit, TU Graz/Institut f. Verbrennungskraftmaschinen & Thermodynamik, 2011.
- <sup>2</sup> Wagner Andreas: Untersuchung von Hybridstrategien für Pkw-Dieselmotoren, Diplomarbeit, TU Graz/Institut f. Verbrennungskraftmaschinen & Thermodynamik, 2011.
- <sup>3</sup> Klima Bernd: Vorentwicklungsprozess „Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebsstränge“, Dissertation, TU Graz/Institut f. Verbrennungskraftmaschinen & Thermodynamik, 2012.
- <sup>4</sup> Kirchberger R., Schacht H.-J., Eichlseder H.: Potenzial eines REX Konzeptes für Stadtscooter – eine Alternative zur rein elektrischen Mobilität? 33. Wiener Motorensymposium, 26 bis 27.04.2012 ISBN 978-3-18-374912-6.
- <sup>5</sup> Luz R., Hausberger S., et. al.: HERO: Optimisation tool for Hybrid Electric Recuperation and Operation Strategies; Projekt im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogramms iv2splus; Endbericht 26.07.2011.

## Smart Production Graz

### Smart Production Graz

Christof Sommitsch, Ralf Kolleck



***Ineinergreifend, systemisch und fokussiert auf die spezifischen Projektanforderungen haben sich sieben Institute der TU Graz zur Initiative Smart Production Graz zusammengeschlossen und verpflichtet sich zu einer gemeinsamen Mission: Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung durch innovative und effiziente Produktionstechnik. Durch eine intelligente Bündelung der vorhandenen F&E-Expertisen der Institute und durch ein zielgerichtetes Projektteamsetting verfolgt Smart Production Graz folgende Vision: Wir sind international anerkannte Expertinnen und Experten, die durch ihre interdisziplinären Ansätze Lösungen im Bereich der Produktion im Maschinenbau anbieten.***

***Interconnected, systemic and focused on specific project requirements, seven institutes of Graz University of Technology have joined together for the Smart Production Graz initiative and are committed to a common mission: sustainability and careful use of resources through innovative and efficient production technology. By intelligently combining the available R&D expertise of the institutes and supported by a target-oriented project-team setting, Smart Production Graz pursues the following vision: internationally recognised experts providing solutions in the field of production in mechanical engineering through interdisciplinary approaches.***

Österreich ist traditionell ein Produktionsland. Unternehmen wie auch Forschungseinrichtungen befinden sich in einem globalen sich ständig verändernden Wettbewerb und sind mit großen Herausforderungen konfrontiert. Die österreichische produzierende Industrie gerät immer stärker unter Druck, den Industriestandort Österreich für die Zukunft abzusichern. In diesem immer komplexer und wissensintensiver werdenden Umfeld steigt die Anzahl an Mitbewerberinnen und Mitbewerbern. Gleichzeitig nimmt die Vielfalt an angebotenen Produkten sowie Dienstleistungen stetig zu. Immer kürzere Produktlebenszyklen und die damit verbundene stark verkürzte Entwicklungszeit zwingen den Beteiligten teils widersprüchliche Solleigenschaften auf. Agilität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bei gleichbleibender oder gar steigender Qualität sind die aktuellen Rahmenbedingungen der produzierenden Industrie. Zusätzlich müssen in diesem Spannungsfeld die Herstellkosten gesenkt werden. Zur Sicherung des Standortes sind somit intelligente Produktionskonzepte unverzichtbar.

Am Beispiel Mobilität ist es möglich, den Wandel der Zeit und die damit verbundenen Herausforderungen darzustellen. Ausgehend von der reinen

Traditionally, Austria is a manufacturing country. Companies and research establishments are finding themselves in an ever-changing state of global competition and are confronted with huge challenges. The Austrian manufacturing industry is increasingly coming under pressure to safeguard the industrial location of Austria for the future. In this environment, which is becoming more and more complex and knowledge intensive, the number of competitors is rising. At the same time, the variety of products and services offered is constantly increasing. Increasingly shorter product life-cycles and substantially reduced development times associated with this are imposing demands on those involved, which are to some extent contradictory. Agility, flexibility and adaptability in the face of unchanging or even increasing quality are the general conditions under which the manufacturing industry operates. Additionally, manufacturing costs in this area of tension have to be reduced. Thus, to safeguard the location for the future, intelligent production concepts are indispensable.

The vicissitudes of the industry and the challenges it is facing can be represented using the example of mobility. Starting from the purely transport func-

Christof Sommitsch ist Dekan der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Vorstand am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik und Sprecher des Forschungsschwerpunktes Smart Production Graz. Seine Forschungsthemen sind Werkstoffentwicklung und Werkstoffwahl, Prozesssimulation und Werkstoffmodellierung sowie Fügetechnik und Schadensanalyse.

Christof Sommitsch is dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Economic Sciences, head of the Institute for Materials Science and Welding, and spokesman for the research core area Smart Production Graz. His research topics are materials development and choice of materials, process simulation and materials modelling, joining technology and damage analysis.





Abb. 1: Schlüsselkompetenzen  
in Smart Production Graz.

Fig. 1: Key competencies in  
Smart Production Graz.

© TU Graz

Transportfunktion des Autos stehen mittlerweile Sicherheit, Energiespar- und Verkehrsleitsysteme sowie verschiedene kundinnen- und kunden-spezifische Unterhaltungsmöglichkeiten im Fokus der Entwicklerinnen und Entwickler. Mehr Zusatzfunktionen erfordern zunehmend interagierende Fachbereiche, dessen Spezialistinnen und Spezialisten am Puls der Zeit die Zukunft verändern wollen.

### Einzigartige Kooperation

Um diesen veränderten Anforderungen und dem Erhalt des Wettbewerbsvorsprunges des europäischen Marktes zu entsprechen, erscheint eine gezielte Verknüpfung von Produktionstechnik und -management in gesamtheitlich konzipierten Innovationsansätzen unverzichtbar. Die Universitäten sind gefordert, ihren Beitrag zur Entwicklung von innovativen Produktionslösungen zu leisten. Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung durch innovative und effiziente Produktionstechnik werden in dem institutsübergreifenden Themenschwerpunkt Smart Production Graz im Field of Expertise Mobility & Production gelebt, mit dem die Kernkompetenzen der beteiligten Institute verbunden werden und Grundlagenforschung in der Produktionstechnik betrieben wird. Die Schlüsselthemen dazu sind: ressourceneffiziente Produktion, Modellierung und Simulation in der Produktion sowie neue interdisziplinäre Konzepte in der Produktionstechnik. Dieses beschriebene Kompetenzfeld ist an keiner anderen österreichischen Universität sichtbar.

tion of the car, the focus of developers has meanwhile been directed to safety, energy-saving and traffic guidance systems as well as a variety of customer-specific entertainment possibilities. Increasingly interacting departments whose experts wish to change the future in tune with the times are demanding even more additional functions.

### Unique cooperation

In accord with these changed demands and the competitive advantages of the European market, a specific link-up between production technology and management in holistically conceived approaches to innovation appears indispensable. Universities are also required to contribute to the development of innovative production solutions. Sustainability and the careful use of resources through innovative and efficient production technology is being lived out in the cross-institute core area of Smart Production Graz, where the core competencies of the institutes involved are being

### Die beteiligten Institute von Smart Production Graz:

- Institut für Fertigungstechnik: Heinrich Hochleitner
- Institut für Technische Logistik: Dirk Jodin
- Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion: Ralf Kolleck
- Institut für Produktionswissenschaften und -management sowie Institut für Industriebetriebslehre und Innovation: Christian Ramsauer
- Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik: Christof Sommitsch
- Institut für Maschinenbau- und Betriebsinformatik: Siegfried Vössner

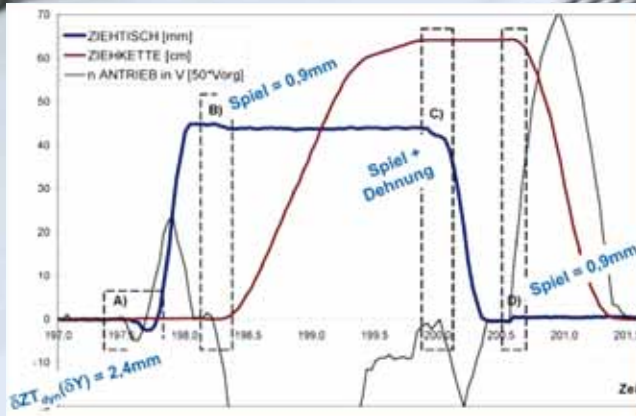
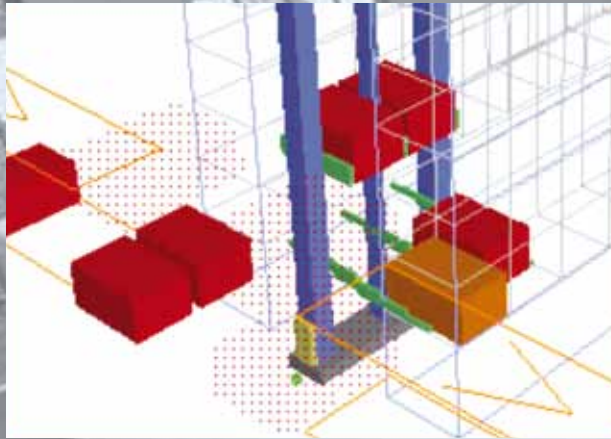
### Participating institutes in Smart Production Graz:

- Institute of Production Engineering: Heinrich Hochleitner
- Institute of Logistics Engineering: Dirk Jodin
- Institute of Tools and Forming: Ralf Kolleck
- Institute of Production Science and Management, and the Institute of Industrial Management and Innovation Research: Christian Ramsauer
- Institute for Materials Science and Welding: Christof Sommitsch
- Institute of Engineering and Business Informatics: Siegfried Vössner



Ralf Kolleck ist Vorstand am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion, Sprecher des Frank Stronach Institute und Sprecher des FoE Mobility & Production. Seine Forschungsthemen sind Produktionskonzepte für Leichtbaufahrzeuge, Technologien für die spanlose Formgebung sowie Temperatur- und Oberflächenbehandlungen.

Ralf Kolleck is the head of the Institute of Tools and Forming, spokesman for the Frank Stronach Institute and the FoE Mobility & Production. His research topics are production concepts for lightweight vehicles, forming technologies, and temperature and surface treatments.



Mit international anerkannten Expertinnen und Experten, die durch interdisziplinäre Ansätze Lösungen im Bereich der Produktion im Maschinenbau entwickeln und anbieten, ist es möglich, im Wettbewerb zu bestehen. Jede einzelne Disziplin der Produktion weist dabei Vorteile, jedoch auch Beschränkungen auf, die durch eine geeignete Zusammenführung im Sinne eines größeren Ganzen überwunden werden können. Bei den dadurch entstehenden Kooperationen und Produktionsnetzwerken wird durch den gezielten Einsatz von Kernkompetenzen der einzelnen Partnerinnen und Partner den hohen Anforderungen an die Prozess- und Ergebnissicherheit entsprochen. Ein wesentlicher Punkt der Smart Production Graz ist die feste Verbindung des Material- und Informationsflusses über genau definierte Schnittstellen und Freiheitsgrade. Kleinstmögliche qualitätsgetriebene Regelkreise versprechen bessere Produkte aus besseren Prozessen. Smart Production Graz stärkt die bereits vorhandenen fakultätsübergreifenden Stärkefelder, die Fields of Expertise Mobility & Production,

joined together and basic research in production technology carried out. The most important research fields are resource-efficient production, modelling and simulation in production, and new interdisciplinary concepts in production technology. The field of competence thus described has no visible profile at any other Austrian university. It is possible to compete on the market with the help of internationally recognised experts who can develop and provide solutions in production and mechanical engineering through interdisciplinary approaches. Each individual discipline in production has both advantages and limitations; these can be overcome by combining them appropriately to the benefit of the greater whole. The cooperation and production networks emerging from this will satisfy the high demands made on the certainty of results and processes through the specific use of the core competencies of the individual partners. An important aspect of Smart Production Graz is the concrete integration of the material and information flow by means of precisely defined points of intersection and degrees

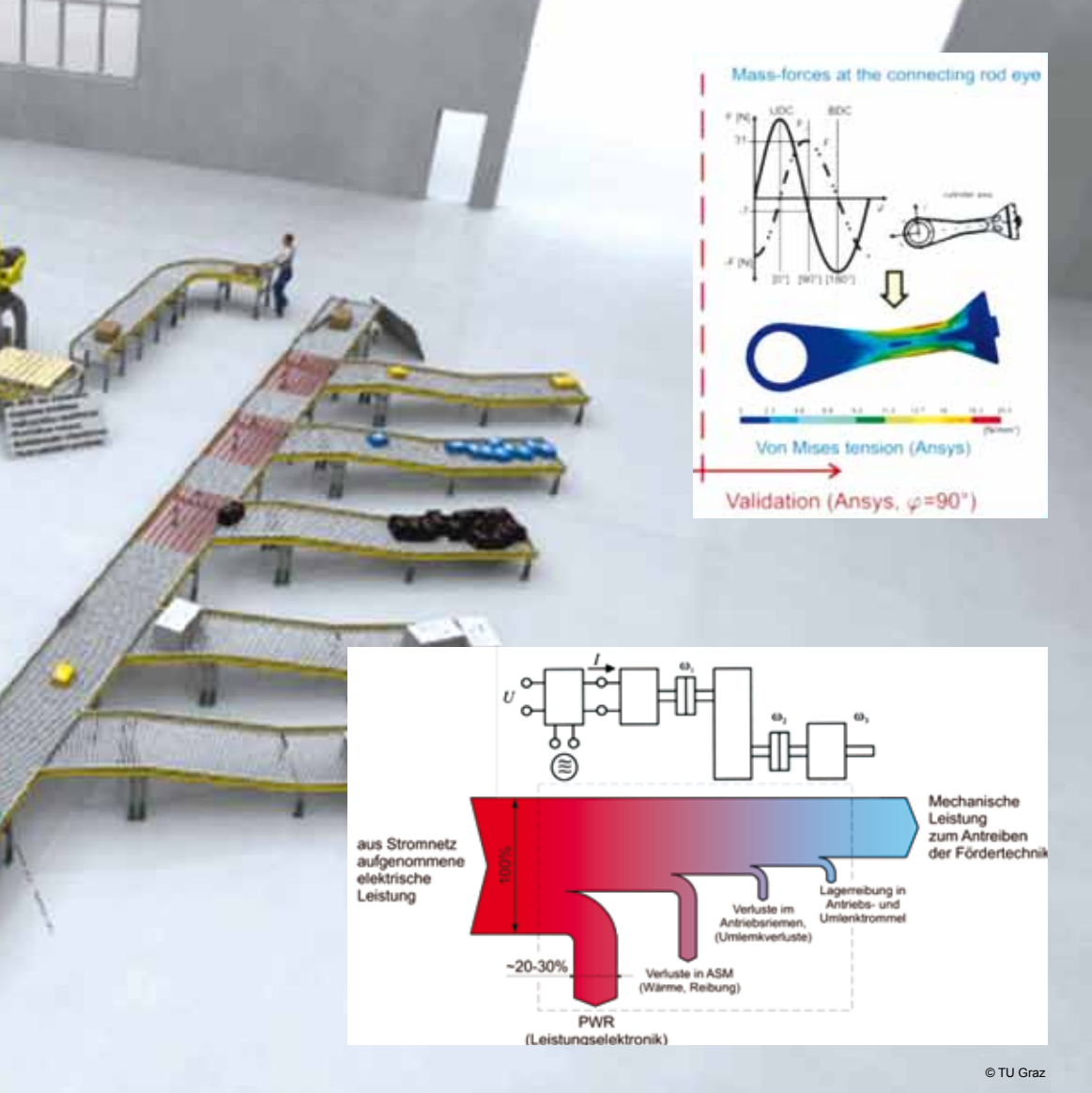


Abb. 2: Kompetenzbündelung aus der Spitzenforschung der Kerninstitute zur Entwicklung innovativer Produkte und Produktionsverfahren am Beispiel von Shuttlefahrzeugen in Lagersystemen der Technischen Logistik.

Fig. 2: Pooled expertise from the top research of the core institutes for developing innovative products and production methods using the example of shuttle vehicles in storage systems used by the Institute of Logistics Engineering.

Advanced Materials Science und Sustainable Systems. Die Initiative stimuliert über die forschungsgeleitete Lehre die Vertiefung Produktionstechnik in den Masterstudien Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau und Production Science and Management und damit die Ausbildung von qualifiziertem Nachwuchs und Führungskräften, die unseren Kernpartnern aus der produzierenden Industrie, wie etwa Andritz, Siemens, MAGNA, voestalpine, AVL etc., zugutekommt. Ein weiterer positiver Aspekt ist der langfristige Auf- und Ausbau eines Kompetenznetzwerkes durch Absolventinnen und Absolventen auf diesem Gebiet, das wiederum neue Projektideen an die Universität zurückbringt. ■

of freedom. The smallest possible feedback-control systems driven by quality promise better products and better processes. Smart Production Graz is reinforcing the already available cross-faculty fields of strength, the FoEs Mobility & Production, Advanced Materials Science and Sustainable Systems, and by means of research-led teaching, stimulates the area of concentration of production technology in the master's programmes of mechanical engineering, mechanical engineering and business economics, and production science and management, thus advancing the training of a new generation of scientists and managers who will benefit our core partners in the manufacturing sector, such as Andritz, Siemens, MAGNA, voestalpine and AVL, etc. A further positive aspect of this is the long-term establishment and expansion of a network of expertise by graduates in this field, which, in turn, will benefit the university in terms of new ideas for projects. ■



# VIRTUAL VEHICLE: Forschungsk Kooperation für die Entwicklung der Fahrzeuge von morgen

## VIRTUAL VEHICLE: Research Partnership for the Development of the Vehicles of the Future

Jost Bernasch



**Hochgradig vernetzte Hightech-Partnerinnen und Partner arbeiten am COMET K2-Zentrum VIRTUAL VEHICLE an effizienten Methoden und Werkzeugen für die Entwicklung der Fahrzeuge von morgen.**

**At the VIRTUAL VEHICLE COMET K2 Center, a high-tech network of partners are working on efficient methods and tools for the development of vehicles of the future.**

Hohe Anforderungen an eine effiziente Gesamt-fahrzeugentwicklung erfordern die intelligente Kombination von numerischer und experimenteller Simulation. Eine wachsende Zahl an Modellvarianten muss in kürzeren Entwicklungszeiten bei gleichzeitig steigender Komplexität des Gesamtsystems Fahrzeug (u. a. Fahrerassistenzsysteme, Antriebskonzepte, gesetzliche Regelungen) realisiert werden. Die dafür erforderliche Systemsimulation setzt technische und wissenschaftliche Exzellenz voraus. Das VIRTUAL VEHICLE ist führend auf dem Gebiet der Integration von Simulationen zu einem Gesamtsystem. Das Fundament dieser Exzellenz sind bestens ausgebildete Forscherinnen und Forscher. Die enge Zusammenarbeit des VIRTUAL VEHICLE mit der TU Graz bildet dafür einen wesentlichen Grundpfeiler. Die TU Graz ist nicht nur wissenschaftliche Partnerin, sondern auch zu 40 Prozent gesellschaftsrechtlich am K2-Zentrum beteiligt. Darüber hinaus ist die Partnerschaft des VIRTUAL VEHICLE mit über 100 internationalen Industrieunternehmen und renommierten wissenschaftlichen Partnerinnen und Partnern enorm wichtig, um anspruchsvolle und hochinnovative Forschungsprojekte durchzuführen. Das COMET K2-Forschungsprogramm oder auch diverse EU-Förderprogramme bieten für diese Projekte attraktive Bedingungen.

### Projekt Gesamtfahrzeug Thermalmodellierung

Das intelligente Verknüpfen verschiedener Simulationen gilt als die „Königsklasse“ der virtuellen Entwicklung und ermöglicht es, teure Hardware-Prototypen zu reduzieren. Die am VIRTUAL VEHICLE entwickelte unabhängige Co-Simulati-

on High demands on efficient full-vehicle development require the intelligent combination of numerical and experimental simulation. A growing number of model variants have to be produced in shorter development time, and the complexity of the full-vehicle system (e.g. driver assistance systems, drive concepts, legal provisions) continues to increase. Technical and scientific proficiency will be necessary to develop the system simulation needed to meet these challenges, and the VIRTUAL VEHICLE is a leader in the field of integrating simulations into a full system.

Since highly trained researchers provide the basis for the requisite competence, the close cooperation between the VIRTUAL VEHICLE and Graz University of Technology represents an essential cornerstone. Graz University of Technology is not only scientific partner but also a 40% company shareholder under corporate law of the K2 center. Moreover, the VIRTUAL VEHICLE's partnerships with over 100 international industrial enterprises and renowned scientific partners are extremely important for enabling ambitious and highly innovative research projects. For such projects, the COMET K2 research projects and various EU funding programs offer attractive conditions.

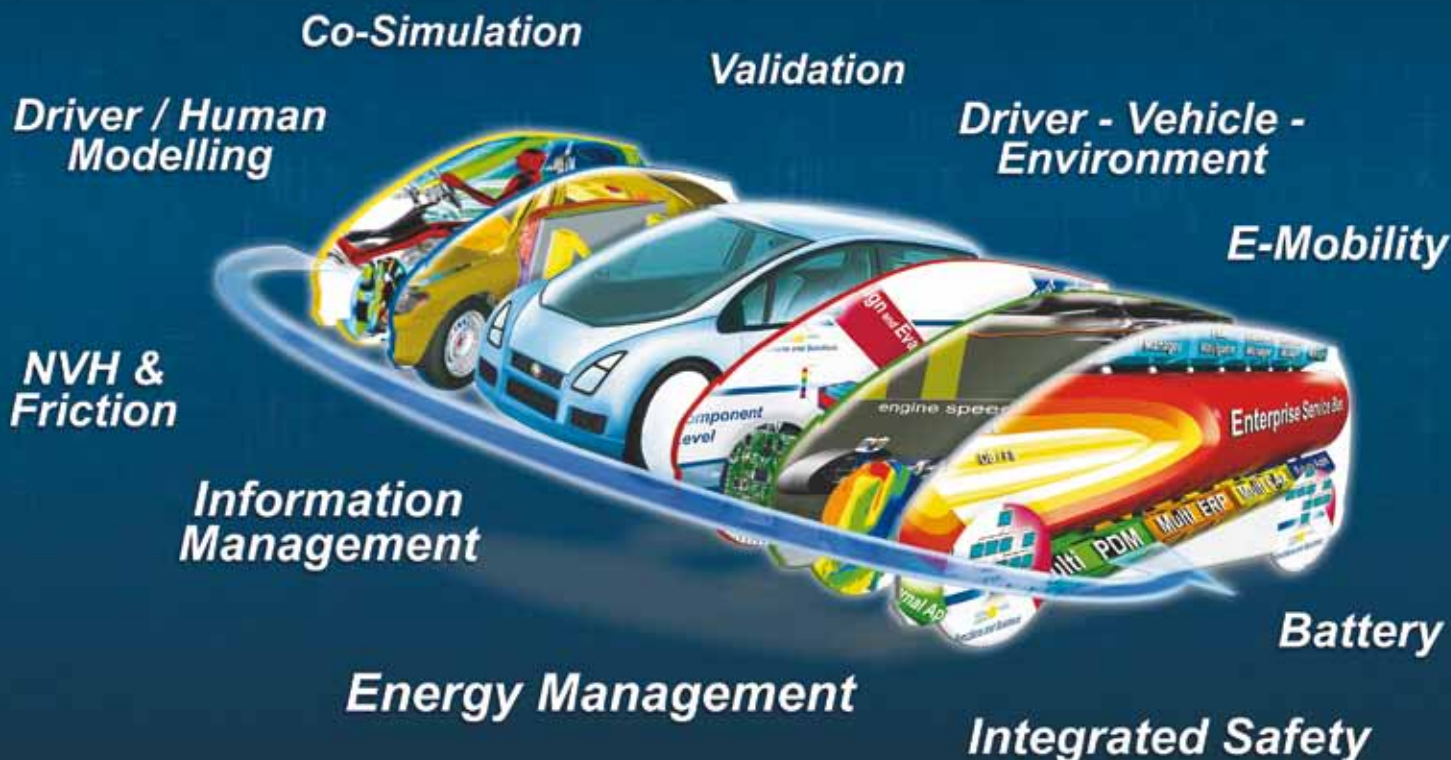
### Full-vehicle thermal modeling project

The intelligent linking of different simulations, which is considered the “champion's league” of virtual development, enables the reduction of expensive hardware prototypes. The independent co-simulation platform “ICOS”, developed at the VIRTUAL VEHICLE, serves as a central tool in the “full-vehicle thermal modeling” project. Together with the Institute of Internal Combustion

Jost Bernasch ist seit 2004 Geschäftsführer des VIRTUAL VEHICLE Kompetenzzentrums in Graz, Österreich. Jost Bernasch ist Mitglied im Steering Committee der International Driving Simulation Conference (DSC), Gründer und Vorsitzender des Grazer Symposiums Virtuelles Fahrzeug (GSVF) und seit 2010 Vorsitzender des International Styrian Noise, Vibration & Harshness Kongress (ISNVH) in Zusammenarbeit mit SAE.

Jost Bernasch has headed the VIRTUAL VEHICLE Research Center in Graz, Austria, as managing director since 2004.

He is steering committee member of the International Driving Simulation Conference (DSC), founder and chair of the Graz Virtual Vehicle Symposium (GSVF) and since 2010 chair of the International Styrian NVH Conference (ISNVH) in cooperation with SAE.



© VIRTUAL VEHICLE

onsplattform „ICOS“ dient als zentrales Werkzeug bei dem Projekt „Gesamtfahrzeug Thermalmodellierung“. Gemeinsam mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT, Helmut Eichlseder), der Porsche AG, AVL List GmbH und dem ECS Engineering Center Steyr entwickelte das Projektteam ein Gesamtfahrzeugmodell zur Beurteilung von Thermomanagement-Maßnahmen in der frühen Phase der Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen und Antriebssträngen. Damit können Prüfstandsversuche reduziert, die Entwicklungszeit verkürzt und Entwicklungskosten verringert werden.

#### Systemsimulation für die integrale Sicherheit

Der Einfluss integraler Sicherheitssysteme auf das Unfallgeschehen kann im Gegensatz zu passiven Sicherheitssystemen aufgrund fehlender Erfassung von Beinahe- und vermiedenen Unfällen nicht auf Basis von Unfallstatistiken ermittelt werden. Zur Bewertung der Wirksamkeit von Fahrerassistenzsystemen entwickelte das VIRTUAL VEHICLE gemeinsam mit der BMW AG und dem Frank Stronach Institute für Fahrzeugsicherheit der TU Graz (VSI, Hermann Steffan) eine Methodik auf Basis von numerischen Simulationen. Diese erlaubt erstmalig die durchgängige automatisierte Berechnung des gesamten Zeitraums vom unkritischen über den kritischen Fahrzustand bis hin zum Crash. Für jede der etwa zehn

Engines and Thermodynamics (IVT, Helmut Eichlseder), Porsche AG, AVL List GmbH and the ECS Engineering Center Steyr, the project team developed a full-vehicle model for the evaluation of thermal management measures in the early phases of the development of internal combustion engines and powertrains, thereby reducing test bench tests, development time and costs.

#### System simulation for integral safety

In contrast to passive safety systems, the influence of integral safety systems on accidents cannot be determined because “near accidents” and avoided accidents are not included in accident statistics. Therefore, the VIRTUAL VEHICLE, in collaboration with BMW AG and the Frank Stronach Institute for Vehicle Safety of the Graz University of Technology (VSI, Hermann Steffan), developed a methodology for evaluating the efficiency of driver assistance systems that is based on numerical simulations. For the first time, this enables a continuous, automated calculation of the entire incident, from the non-critical to the critical driving conditions and all the way to the crash. Specialist simulation tools are used for each of the approx. 10 required individual simulations, which are then combined into a system simulation via the ICOS co-simulation platform.

**Abb. 1: Effiziente Gesamtfahrzeugsimulation durch die Verknüpfung von Einzeldisziplinen.**

*Fig. 1: Efficient full-vehicle simulation by linking individual disciplines.*

Abb. 2: Das intelligente Verknüpfen verschiedener Simulationen gilt als die „Königsklasse“ der virtuellen Entwicklung. Damit können Prüfstandversuche reduziert, die Entwicklungszeit verkürzt und Entwicklungskosten verringert werden.

Fig. 2: The intelligent connection of diverse simulations is considered the "champion's league" of virtual development. This makes it possible to reduce test-bench tests, development time and costs.



erforderlichen Einzelsimulationen werden die fachspezifischen Simulationenwerkzeuge genutzt, die über die Co-Simulationsplattform ICOS zu einer Systemsimulation verknüpft werden.

#### Starker Forschungsstandort Graz

Internationale Spitzenforschung braucht die hellsten Köpfe und High Potentials. Die dafür erforderliche Exzellenz ist seit der Gründung des Zentrums im Jahr 2002 in enger Kooperation mit der TU Graz aufgebaut worden.

Eine Reihe laufender oder bereits erfolgreich abgeschlossener Projekte in Zusammenarbeit mit den Instituten der TU Graz zeigt die Bandbreite der gemeinsamen Forschung, z. B. „Modellbasiertes Testen von Diagnose- und Systemfunktionen“ zusammen mit der AUDI AG, der VW AG und dem Institut für Softwaretechnologie (IST), das Projekt „Future PLM“ mit dem Institut für Technische Logistik (ITL) und dem Institut für Wissensmanagement (IWM) oder einige erfolgreiche Projekte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Informatik (ITI).

Das VIRTUAL VEHICLE konnte sich nicht zuletzt dank dieser erfolgreichen Zusammenarbeit als führendes Forschungszentrum im Bereich innovativer Simulationstechnologien und virtueller Fahrzeugentwicklung etablieren. Durch die starke internationale Vernetzung – mittlerweile laufen mehr als zehn EU-Projekte am K2-Zentrum – arbeitet das VIRTUAL VEHICLE mit Expertinnen und Experten aus ganz Europa intensiv an interdisziplinären Forschungsthemen.

Gemeinsam mit der TU Graz und dem weltweiten Partnernetzwerk produziert das VIRTUAL VEHICLE Wissen „am Puls der Zeit“ und forciert erfolgreich den Forschungsstandort Graz. ■

#### Graz – a powerful research location

Top-level international research requires the brightest minds and high potentials. Since the foundation of the center in 2002, the necessary excellence has nurtured in close cooperation with Graz University of Technology.

A number of ongoing or successfully completed projects conducted in cooperation with the institutes of Graz University of Technology show the diversity of the joint research, including “Model-based tests of diagnostic and system functions” in collaboration with AUDI AG, VW AG and the Institute of Software Technology (IST); the “Future PLM” project with the Institute of Logistics Engineering (ITL) and the Knowledge Management Institute (KMI); and a variety of successful projects conducted with the Institute for Technical Informatics (ITI).

Not least because of this successful cooperation, the VIRTUAL VEHICLE has managed to establish itself as a leading research institute in the field of innovative simulation technologies and virtual vehicle development. Due to strong international networking – there are currently over 10 EU projects at the K2 center – the VIRTUAL VEHICLE collaborates intensively with experts from all over Europe on interdisciplinary research topics.

Together with Graz University of Technology and the worldwide partner network, the VIRTUAL VEHICLE is generating knowledge at the cutting edge of vehicle development and successfully promoting Graz as a research location. ■



## Forschung an Lithium-Ionenleitern für Batterien – Atomare Einblicke in die dynamischen Prozesse von Festkörpern mit NMR-Spektroskopie

### Research on Lithium-Ion Conductors for Batteries – Atomic-scale insights into the dynamic processes in solids using NMR

Ilie Hanzu, Martin Wilkening

**Die Erschließung von neuen, sauberen und zuverlässigen Energiequellen ist nötig, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Dieses Interesse hat die materialwissenschaftliche Forschung im Bereich elektrochemischer Energiespeicherung und -konversion auf ein bisher beispiellos hohes Niveau getrieben. Gegenwärtig sind große Anstrengungen im Gange, die sich insbesondere der Entwicklung neuer ionenleitender Festkörper widmen, die in Batterien, Brennstoffzellen und Superkondensatoren ihre Anwendung finden sollen. Die kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR) kann helfen, diese Aktivitäten maßgeblich voranzutreiben.**

Für die Speicherung von Elektrizität z. B. aus Sonnenenergie, Wind- oder Wasserkraft sind nachhaltige Energiespeichersysteme nötig, die u. a. in Elektrofahrzeugen Anwendung finden. Hauptforschungsaktivitäten konzentrieren sich zurzeit auf Lithium(Li)-Ionenbatterien mit ihrer im Vergleich zu herkömmlichen Blei- oder Nickelsystemen nachgewiesenermaßen weitaus höheren Speicherkapazität und Energiedichte.

Festkörper-Li-Ionenbatterien, die keinen flüssigen Elektrolyten mehr nutzen, zeichnen sich durch eine höhere Sicherheit und Stabilität aus. Einen geeigneten hochleitfähigen Festkörperelektrolyten zu finden, ist die zentrale Aufgabe, die es zu lösen gilt, um praktikable Festkörperbatterien zu entwickeln. Ein kristalliner Feststoff, wie z. B. ein Oxid oder ein Sulfid, ist aus positiv und negativ geladenen Atomen, den sogenannten Ionen, aufgebaut. Ionen sind in vielen Fällen sehr mobil, d. h., sie „springen“ in irregulärer Weise im starren Kristallgitter von Platz zu Platz. Dieses Phänomen heißt Selbstdiffusion und steht in enger Beziehung zur Ionenleitfähigkeit.

Die Entdeckung, dass einige Festkörper eine außerordentlich schnelle Kationen- (z. B.  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ) oder Anionen- (z. B.  $\text{F}^-$ ) -Leitfähigkeit zeigen, kann als die Geburtsstunde eines

*Urgent environmental issues and the increasing necessity for alternative, clean and reliable energy sources able to successfully replace fossil fuels have driven the global-scale interest in the field of energy storage and conversion to unprecedented levels. Currently, significant research efforts are in progress which are dedicated to the development of ionically conducting solids with applications in batteries, fuel cells and supercapacitors. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy helps significantly advance these activities.*

Electricity generated by wind, wave, or solar power, for example, requires sustainable energy storage as also do electric vehicles. The main research activities are focused on lithium(Li)-ion batteries which have been proven to show a significantly higher capacity and higher energy density than conventional batteries based on lead or nickel.

Li-ion batteries which are solely composed of solids instead of a liquid electrolyte show improved safety and stability. Finding a suitable solid electrolyte with a sufficiently high ionic conductivity is the pivotal issue which has to be solved to develop practical solid-state batteries. In general, a crystalline compound, such as an oxide or a sulfide, is composed of positively and negatively charged atoms – so-called ions. In many cases, these ions are quite mobile. This means that within the crystal lattice they may hop from site to site in an irregular manner. This phenomenon is called self diffusion and is directly related to ion conduction.

The recognition that some solids could exhibit fast cation (e. g.  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ) or anion (e. g.  $\text{F}^-$ ) conduction similar to that found in a liquid can be regarded as the birth of a new research field which is today called solid-state ionics. Considering a very fast solid lithium-ion conductor, the average residence time of an  $\text{Li}^+$  ion between two



*Ilie Hanzu hat 2010 in Materialchemie an der Université de Provence, Marseille (Frankreich) promoviert. Seine Forschungsthemen sind NMR-Spektroskopie und Transportphänomene in Festkörpern, Elektrochemie von selbstorganisierenden Materialien sowie Nanomaterialien für die Energiespeicherung. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Chemische Technologie von Materialien.*

*Ilie Hanzu received his doctoral degree in materials chemistry in 2010 from Université de Provence, Marseille (France). His research topics include NMR spectroscopy and transport phenomena in solids, electrochemistry of self-assembled materials as well as nanomaterials for energy applications. He is currently a post-doctoral fellow at the Institute for Chemistry and Technology of Materials.*



Martin Wilkening ist Universitätsprofessor an der TU Graz (Institut für Chemische Technologie von Materialien). Schwerpunkte seiner Arbeit sind impedanz- und NMR-spektroskopische Untersuchungen zur Dynamik von Lithium- und Fluor-Ionen in Festkörpern für moderne Energiespeichersysteme. Während seiner wissenschaftlichen Tätigkeit ist er mit mehreren Preisen ausgezeichnet worden, wie z. B. dem Starck-Promotionspreis der Gesellschaft Deutscher Chemiker und dem ADUC-Jahrespreis 2009 für Habilitanden der GDCh.

Martin Wilkening is professor at Graz University of Technology (Institute for Chemistry and Technology of Materials). His research focuses on impedance and NMR spectroscopy to study dynamic properties of both lithium and fluorine ions in solids which are useful for modern energy storage systems. Over the course of his career he has been awarded several honors such as the "Starck-Promotionspreis" of the German Chemical Society and the "ADUC-Jahrespreis 2009 für Habilitanden".

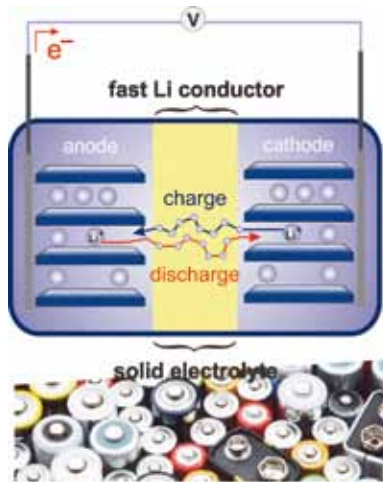
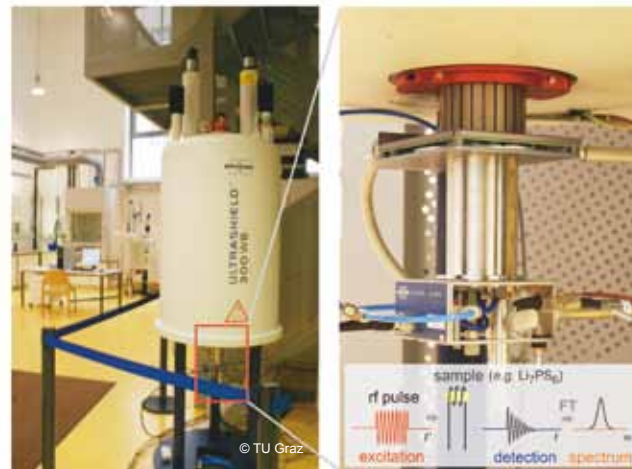


Abb. 1/ Fig. 1



Forschungsgebietes angesehen werden, das heute als „solid-state ionics“ bekannt ist. In einem schnellen Ionenleiter liegt die mittlere Verweilzeit eines Li-Ions zwischen zwei Sprüngen im Bereich von wenigen Nanosekunden. Die entsprechende Sprungrate liegt bei  $10^9$  Sprüngen pro Sekunde. Trotz dieser enormen Anzahl von Sprungprozessen beträgt das zugehörige mittlere Verschiebungsquadrat nur wenige Millimeter pro Jahr. Die gesamte Li-Ionenbatterietechnologie, mit ihrer Markteinführung in den 90er-Jahren, gründet auf dem Einsatz von Ionenleitern und nutzt somit die schnellen Platzwechselprozesse von Li-Ionen in kristallinen und amorphen Festkörpern. Während des (Ent-)Ladens einer Batterie wandern die Ionen durch den Elektrolyten zwischen den Elektroden (Abb. 1). Die Elektrodenmaterialien müssen eine gute elektronische ( $e^-$ ) und ionische Leitfähigkeit zeigen. Gewöhnlicherweise werden schichtstrukturierte Interkalationsverbindungen wie z. B. Graphit ( $\text{Li}_x\text{C}$ ) und Übergangsmetall-(Me)oxide ( $\text{Li}_y\text{MeO}_2$ ) als  $\text{Li}^+$ -Wirtsmaterialien genutzt. Mit der Erforschung neuer Materialien sind auch komplementäre Methoden zu entwickeln, um Li-Transporteigenschaften präzise zu erfassen. Zu diesem Zweck wird an der TU Graz kernmagnetische Resonanzspektroskopie (engl. Nuclear Magnetic Resonance – NMR – spectroscopy) eingesetzt, um Li-Sprünge auf atomarer Skala zu verfolgen. Neben einem 300-MHz-Gerät (Abb. 1) besteht mit dem kürzlich installierten und optimal ausgestatteten 500-MHz-Spektrometer nun Zugang zu einem großen Li-NMR-Methodenrepertoire.

hops is in the order of only a few nanoseconds. This gives a corresponding jump rate as high as  $10^9$  jumps per second. In spite of what seems an almost incredible number of hops per second, the mean displacement of the charge carrier via self diffusion is just a few mm per year.

The entire lithium-ion battery technology, introduced on the market in the early 1990s, is based on the use of fast lithium-ion conductors and therefore on Li hopping processes in crystalline and amorphous solids. During charging and discharging a battery, the Li ions migrate across the electrolyte located between the anode and the cathode (see Figure 1). Importantly, the electrode materials should exhibit both a good electronic ( $e^-$ ) as well as ionic conductivity. Usually, so-called layer-structured intercalation compounds such as graphite ( $\text{Li}_x\text{C}$ ) and transition metal (Me) oxides ( $\text{Li}_y\text{MeO}_2$ ) are used to serve as powerful host materials. In parallel with the research for new materials, battery research also requires the development of complementary techniques to accurately determine and quantify ionic transport properties. These are indispensable to understand the general rules Li ion self diffusion processes obey.

For this purpose, at the Graz University of Technology solid-state Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy is used to trace  $\text{Li}^+$  hopping at an atomic scale. In combination with a 300 MHz spectrometer (Figure 1), the recently installed optimally equipped 500 MHz NMR spectrometer opens access to a broad range of experimental techniques.

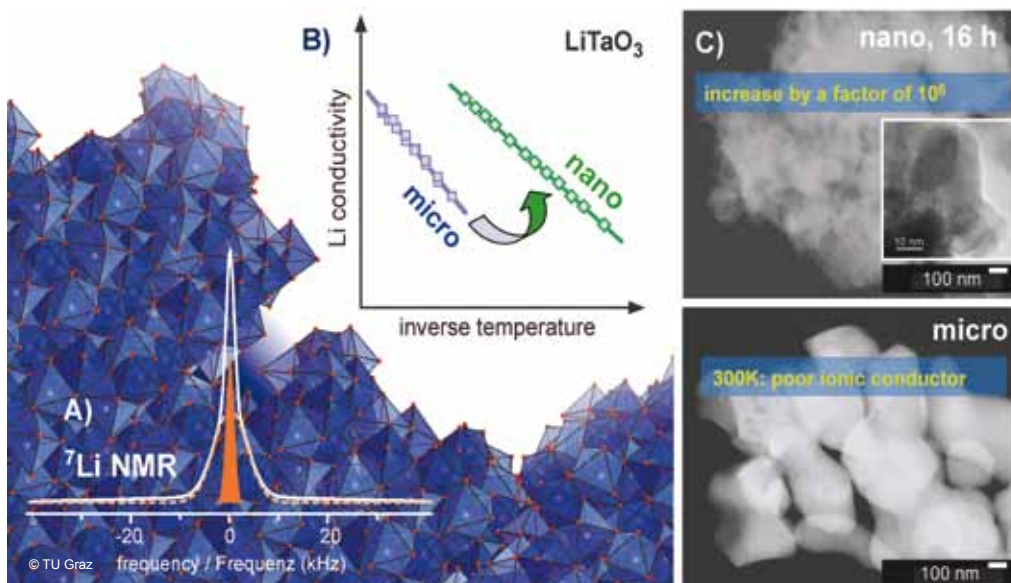


Abb. 2/ Fig. 2

Vereinfacht dargestellt tritt während eines NMR-Experimentes der Li-Kernspin in Wechselwirkung mit dem äußeren Magnetfeld und den internen, lokalen Feldern in der direkten Nachbarschaft des Kerns. Die Spin-Wechselwirkungen sind entweder von magnetisch dipolarer oder elektrisch quadrupolarer Natur. Mithilfe der NMR-Spektroskopie können die Feldfluktuationen erfasst werden, die auftreten, wenn ein Li-Ion zwischen den Kristallgitterplätzen hin und her springt. Somit bietet die NMR-Spektroskopie die Möglichkeit, Li-Selbstdiffusionskoeffizienten aus atomarer Sicht zu ermitteln<sup>1</sup>. Werden die Ergebnisse mit der Mikrostruktur der Probe korreliert, dann zeigt sich in vielen Fällen, dass strukturell ungeordnete Festkörper oder solche mit nm-großen Kristalliten eine ungewöhnlich hohe Li-Diffusivität aufweisen. Beispielsweise kann die Li-Dynamik im eigentlich schlechten Ionenleiter  $\text{LiTaO}_3$  um mehr als den Faktor 1.000.000 erhöht werden, wenn die Probe für einige Stunden in einer Hochenergiekugelmühle zerkleinert und strukturell geschädigt wird (Abb. 2, Ref.<sup>2</sup>). Angesichts dieser Möglichkeiten zur Verbesserung der Ionenleitfähigkeit ist es nicht verwunderlich, dass nanostrukturierte Materialien, die *per se* kurze Diffusionslängen bieten, unentwegt weiterentwickelt und zunehmend in neuen Li-Speichersystemen eingesetzt werden. ■

Simply speaking, in an NMR experiment the Li nuclear spin interacts with both the external magnetic field applied and the local, internal fields in the direct neighborhood of the nucleus. The various interactions can be of magnetic dipolar or electric quadrupolar nature. NMR spectroscopy is sensitive to the fluctuations of the interactions which occur when the ion is jumping from site to site in the crystal lattice. Thus, Li dynamic parameters such as diffusion coefficients can be directly accessed by NMR from an atomic scale point of view<sup>1</sup>. By correlating the NMR results with the microstructure of the sample, it often turned out that materials showing a high degree of structural disorder or being characterized by nm-sized crystallites show an unexpected high Li self diffusivity.

As an illustration, Li dynamics of the actually poor ion conductor  $\text{LiTaO}_3$  can be increased by more than a factor of 1,000,000 when the sample is treated for several hours in a high-energy ball mill that reduces the crystallite size (Figure 2, Ref.<sup>2</sup>). Therefore, given these improvement possibilities, it is not surprising that nanostructured materials, which *per se* offer short diffusion lengths, are continuously being developed and increasingly used in new lithium-ion storage systems. ■

Abb. 1: Links: Schematische (vereinfachte) Darstellung einer Festkörper-Lithium-Ionen-Batterie; Mitte: 300-NMR-Magnet an der TU Graz; rechts: Hochtemperatur-NMR-Probenkopf und Illustration eines NMR-Experiments.

Abb. 2: A)  $^7\text{Li}$ -NMR-Spektrum von nanokristallinem  $\text{LiTaO}_3$ ; die schmale NMR-Komponente (orange) repräsentiert schnelle Li-Ionen, die für den Leitfähigkeitsanstieg (siehe B) verantwortlich sind; C) TEM-Bilder der Probe vor und nach dem Kugelmahlen.

Fig. 1: Left: Sketch of an all-solid-state lithium-ion battery; middle: 300 MHz NMR magnet at the Graz University of Technology; right: high-temperature NMR probe used to study Li ion conductors. The simplified scheme illustrates an NMR experiment.

Fig. 2: A)  $^7\text{Li}$  NMR spectrum of nanocrystalline  $\text{LiTaO}_3$ ; the NMR component with the small line width (orange) represents the fast Li ions responsible for the enhancement of ionic conductivity (B); C) TEM micrographs of the sample before and after high-energy ball milling.

#### Literatur/References

<sup>1</sup> Li self-diffusion in garnet-type  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  as probed directly by diffusion-induced  $^7\text{Li}$  spin-lattice relaxation NMR spectroscopy.

A. Kuhn, S. Narayanan, L. Spencer, G. Goward, V. Thangadurai, M. Wilkening, *Phys. Rev. B.* 83 (2011) 094302.

<sup>2</sup> Tuning the Li diffusivity of poor ionic conductors by mechanical treatment: High Li conductivity of strongly defective  $\text{LiTaO}_3$  nanoparticles.

M. Wilkening, V. Epp, A. Feldhoff, P. Heitjans, *J. Phys. Chem. C* 112 (2008) 9291.



## Nachhaltige Eisenbahninfrastruktur Sustainable Railway Infrastructure

Stefan Marschnig



**Am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft wird das System Eisenbahn als ein Gesamtsystem betrachtet. Nachhaltiges Anlagenmanagement oder das Erstellen von Machbarkeitsstudien sind nur einige Aufgaben des TU Graz-Instituts, das diverse Infrastrukturbetreibergesellschaften wie beispielsweise die Österreichischen Bundesbahnen in all ihren Anliegen unterstützt. Denn umsetzungsorientiertes und systematisches Denken sind jene beiden Prämissen, unter denen das Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft Forschung und Lehre betreibt.**

Die Aufgaben einer modernen, auf Basis der europäischen Gesetzgebung aufgestellten Infrastrukturbetreibergesellschaft können in drei Hauptaspekte zusammengefasst werden:

- Zurverfügungstellen einer markadäquaten Infrastruktur, die in Auslegung und Ausgestaltung den Bedürfnissen der Nutzerinnen/Nutzer (Eisenbahnverkehrsunternehmen) und Endkundinnen und -kunden entspricht.
- Verfolgen eines Anlagenmanagements, das es ermöglicht, die Anlagen hinsichtlich ihrer aktuellen Qualität und spezifischen Nutzung zu beobachten und die zu setzenden Maßnahmen proaktiv zu planen, um die Kosten im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung so gering wie möglich zu halten.
- Konzeption eines effizienten Trassenmanagements, das die zur Verfügung stehende Kapazität bestmöglich nutzt, sowie die Anwendung eines Bepreisungsschemas, das die oben genannten Ziele unterstützt – sei es hinsichtlich der effizienten Nutzung der Kapazität oder in Bezug auf eine schonende Nutzung der Infrastruktur aus Verschleißsicht.

**At the Institute for Railway Engineering and Transport Economy, the railway system is looked at as a whole system. Sustainable asset management or carrying out feasibility studies are just two of the tasks of the institute at Graz University of Technology which supports a variety of infrastructure operators, such as the Austrian Railways, in all their concerns. Since implementation-oriented and systematic thinking are the two principles under which the Institute for Railway Engineering and Transport Economy carries out its research and teaching.**

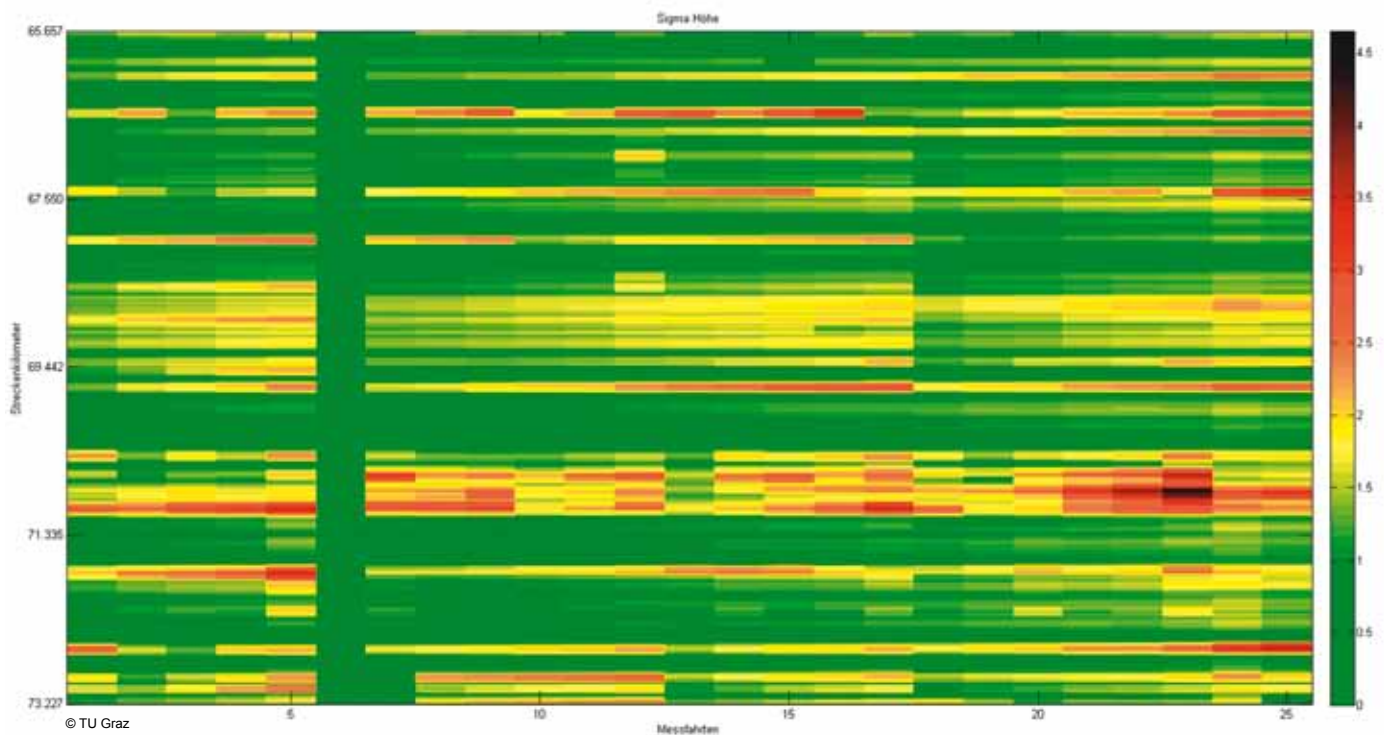
Based on European legislation, the tasks of a modern infrastructure manager can be summed up in three main aspects:

- Providing a market-adequate infrastructure meeting the needs of the users (railway companies) and consumers in conception and design.
- Setting up an asset management that allows monitoring of current quality and specific use of the assets in order to plan future measures proactively, keeping costs low.
- Following a train path management that assures an efficient use of the provided capacity combined with a pricing scheme supporting these aims and keeping wear of the assets low.

The Institute for Railway Engineering and Transport Economy supports infrastructure managers in all of the mentioned fields. One core area of the department is infrastructure development or, more precisely, the development of concepts and feasibility studies for extension of infrastructure. The most important projects in this field have been the feasibility study for the Koralm-link and the basic study for the concept of the Schober-Pyhrn-Axis<sup>1</sup>. Within such considerations it is necessary not only to focus on the civil engineering tasks but also to highlight the needs of the mar-

Stefan Marschnig ist Assistant Professor am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft. Seine Forschungsschwerpunkte sind lebenszykluskostenbasierte Fahrwegstrategien mit Fokus auf Life Cycle Management sowie verursachungsgerechte, kostenbasierte Trassenpreise.

Stefan Marschnig is assistant professor at the Institute for Railway Engineering and Transport Economy. His main research areas are life-cycle cost-based permanent way strategies with main focus on life cycle management and cost-by-cause and cost-based track access charges.



Das Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft unterstützt Infrastrukturbetreibergesellschaften bei Fragestellungen aus allen oben genannten Bereichen. Schwerpunkte des Instituts sind die Entwicklung der Infrastruktur bzw. die Erstellung von Konzepten oder Machbarkeitsstudien für den Infrastrukturausbau. Als wichtigste Projekte diesbezüglich können die Machbarkeitsstudie für die Koralmbahn und die Basisstudie für die Ausgestaltung der Schober-Pyhrn-Achse<sup>1</sup> als aktuellste Arbeit genannt werden. Bei dieser Beschäftigung werden nicht nur die bauphysikalischen Aspekte untersucht, sondern es wird auch eine Prüfung der Marktadäquanz hinsichtlich der derzeitigen und zukünftigen Nutzung aus Kundinnen- und Kundensicht, der betrieblichen Auswirkungen verschiedener Infrastrukturvarianten und der langfristigen Kosten im System durchgeführt.

Der derzeit größte Themenkreis, der am Institut behandelt wird, ist ein nachhaltiges Anlagenmanagement. Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Projektarbeit gehen dabei Hand in Hand, wobei die Übergänge zumeist fließend sind. Die seit Mitte der 1990er-Jahre aufgebaute Kompetenz hinsichtlich der Berechnung von Lebenszykluskosten für langlebige Infrastrukturanlagen des Eisenbahnfahrwegs und daraus ableitbaren Fahrwegstrategien bildet hier die Basis für weitreichende und internationale Arbeiten. Die genannten Basisstrategien wurden und werden neben dem Hauptkooperationspartner ÖBB-Infrastruktur AG auch für die kroatische Bahn, den norwegischen Infrastrukturbetreiber Jernbaneverket und die Schweizerische Bundesbahn<sup>2</sup> ausgearbeitet. Bereits aus den frühen Auswertungen für die ÖBB wurde jedoch

ket. Pointing out current and future benefits seen from the user's point of view, operational consequences of different infrastructure options, and long-term system costs results in an overall vision which compares what is planned and what is needed.

The currently far most important application area worked on at the Institute is sustainable asset management. Fundamental research is accompanied by application-oriented projects, mostly enmeshed with each other. Since the mid 1990s the Institute has been gathering competence on the calculation of life cycle costs of long-lasting railway infrastructure assets and the formulation of basic investment and maintenance strategies. This has led to numerous national and international activities. The mentioned basic strategies have been set up for Austrian Federal Railways (ÖBB) as well as for the Croatian and Norwegian infrastructure managers (HŽ and Jernbaneverket) and recently for Swiss Railways (SBB)<sup>2</sup>. Quite early on, the first elaborations showed that the followed methodology (experience-driven model) is not suitable for a through-going asset management for specific track sections. The site-specific long-term planning of maintenance and renewal actions requires detailed knowledge about the current condition of the assets and – and this is important – the development of this condition over time. Only a mathematical description of this development enables the infrastructure manager to carry out prognosis which is actually the precondition for estimating future needs. Since 2002 numerous master and doctoral theses have focused on the development of

Abb. 1: Zustand der Gleislagequalität über der Zeit.

Farbcode Grün: guter Zustand bis Rot: sehr schlechter Zustand.

Fig. 1: Status of geometric track quality over time. Colour code green: good condition, to red: very poor condition.

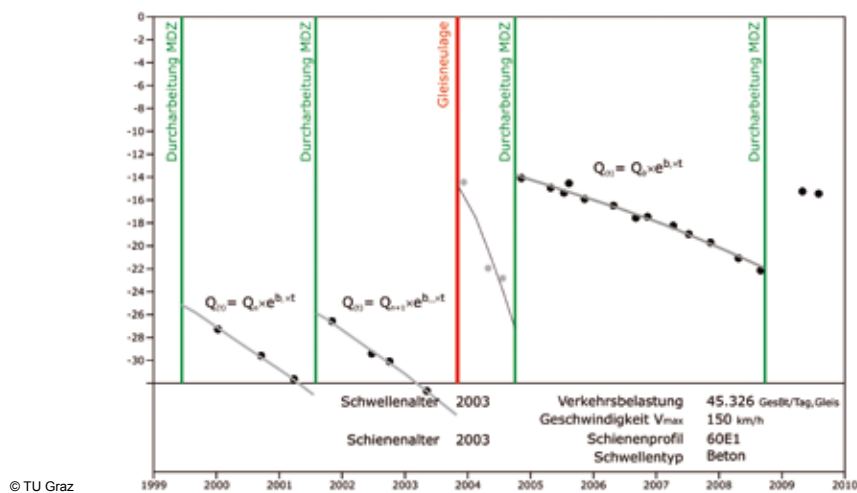


Abb. 2: Gleislage-qualitätsfunktion.

Fig. 2: Quality function of track geometry.

ersichtlich, dass der eingeschlagenen Methodik (erfahrungsbasiertes Modell) Grenzen gesetzt sind, wenn es um das Vor-Ort-Anlagenmanagement geht. Die ortsspezifische, langfristig vorausschauende Planung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen bedarf einer detaillierten Kenntnis des Anlagenzustands ebenso wie der Entwicklung dieses Zustands über der Zeit. Erst wenn die Entwicklung der Qualität mathematisch beschrieben werden kann, ist eine Prognose möglich, die letztendlich für die Abschätzung künftig notwendiger Arbeiten Voraussetzung ist. Seit 2002 hatten mehrere Diplomarbeiten und Dissertationen die Entwicklung der Gleisqualität, deren Beschreibung und mögliche Prognosen zum Ziel. Datengrundlage aller dieser Arbeiten sind die durch das Diagnosefahrzeug der ÖBB aufgenommenen Messdaten, die in der TUG-Datenbank für mehr als 4.000 km und über eine Zeitreihe von nunmehr zehn Jahren vorliegen. Während die Grundlagenforschung weiterläuft, sind die ersten Ergebnisse bereits in der Umsetzung: Im Projekt Life Cycle Management wird ein datenbasiertes Anlagenmanagement für den Eisenbahnoberbau bereits gelebt<sup>3,4</sup>.

Nachhaltige Infrastruktur bedeutet neben richtig dimensionierten und optimal instand gehaltenen Anlagen aber auch, eine schonende und effiziente Nutzung dieser Anlagen sicherzustellen. Die Nutzerinnen und Nutzer der Anlagen, die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), die die Zugfahrten auf dieser Infrastruktur abwickeln, müssen zu einer systemadäquaten Nutzung angehalten werden. Die Stellschraube stellen hierbei die Trassen-nutzungsgebühren dar. Anforderungen an die Infrastruktur, spezifischer Kapazitätsverbrauch und Anlagenverschleiß variieren für verschiedene Marktsegmente und Fahrzeugtypen. Auch in diesem Bereich forscht das Institut bereits seit einiger Zeit (Triebfahrzeugfaktor<sup>5</sup>, VIBER<sup>6</sup>, Verschleißfaktor Fahrbahn, verursachungsgerechte Kosten-zuscheidung für die Trassennutzung). ■

track quality and its description, and on prognosis and planning of maintenance measures. The data for these analyses, which are stored in the TUG data warehouse, come from the ÖBB's recording car which measured a variety of wear phenomena and comprises more than 4,000 kilometres of track over a period of 10 years. While basic research continues, the first results have already been implemented. The Life Cycle Management project was started back in 2010 with ÖBB-Infrastruktur AG in order to realise a data-based asset management for the permanent way<sup>3,4</sup>.

Sustainable infrastructure does not only cover accurately designed assets maintained in a proper way, but also guarantees a gentle and efficient use of these assets. The users, the railway enterprises operating trains on the network, must be incentivised to use the assets according to the needs of the total system. The respective optimisation tool here is setting up cost-related track access charges. Demands, specific capacity use and wear vary significantly from user to user and from train to train. The elaboration of such cost-by-cause charges is another main research field of the Institute (Triebfahrzeugfaktor<sup>5</sup>, VIBER, Verschleißfaktor Fahrbahn, Verursachungsgerechte Kosten-zuscheidung für die Trassennutzung). ■

#### Literatur/References

- <sup>1</sup> Pyhrn – Unteres Ennstal, Projektbericht – unveröffentlicht, 2011.
- <sup>2</sup> Netzweite Investitions- und Instandhaltungsstrategien im Bereich Fahrbahnoberbau der SBB, Eisenbahntechnische Rundschau 6, 2012.
- <sup>3</sup> Life Cycle Management in der Realität, ZEVrail 09, 2012.
- <sup>4</sup> Der GleisPROPHET – ein Impuls zur Nachhaltigkeit, ZEVrail 09, 2012.
- <sup>5</sup> Fahrzeugkonzeption und Gleisverschleiß – ÖBB-Triebfahrzeugfaktor, Elektrische Bahnen 110, 2012.
- <sup>6</sup> VIBER: Verursachungsgerechte Infrastrukturbenützungsentgelt Rechnung.



# Die Leitschiene als Rampe – Fahrzeuge heben ab The Guardrail as Ramp – the Vehicle Takes Off

Ernst Tomasch

**Rückhaltesysteme auf Straßen – Leitschienen und Betonbarrieren – sollen Fahrzeuge am Abkommen hindern, allerdings ist die derzeitige schräge Ausführung der Anfangselemente solcher Systeme eine kritische Stelle. Eine Tiefenanalyse von Unfällen mit diesen Anfangselementen wurde am Institut für Fahrzeugsicherheit durchgeführt und somit eine Möglichkeit aufgezeigt, derartige Situationen zu vermeiden.**

## Leiteinrichtungen – eine Absicherungsmaßnahme

Grundsätzlich werden Verkehrsunfälle in Österreich in zehn Hauptgruppen eingeteilt. Eine Hauptgruppe dabei stellt der Unfall mit nur einem Beteiligten dar. Insbesondere sind dies Unfälle, bei welchen Fahrzeuge von der Fahrbahn abkommen und mit ortsfesten Hindernissen kollidieren. Eine Absicherungsmaßnahme zur Vermeidung von Abkommensunfällen stellt hierbei das sogenannte Fahrzeugrückhaltesystem (FRS) – die Stahlleitschiene oder Betonbarriere – dar. Dieses wird entweder als Mitteltrennung zur Vermeidung von Gegenverkehrsunfällen oder am rechten Fahrbahnrand als Schutz vor Abkommensunfällen verwendet. Um ein FRS in Österreich verwenden zu dürfen, bedarf es einer erfolgreichen Prüfung nach europäischer Norm EN 1317, womit eine prinzipielle Eignung für die Verwendung im Straßenverkehr bestätigt wird. Eine Freigabe erfolgt durch das BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie), mit welcher die Einhaltung der Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen RVS 05.02.31 (Verkehrsführung, Leiteinrichtungen, Rückhaltesysteme, Anforderungen und Aufstellung) sowie eventuell weitere notwendige Richtlinien bestätigt werden.

Obwohl das FRS ein Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn sehr gut verhindern kann, ist das Anfangselement dieser Systeme

*Vehicle restraint systems (VRS) on roads – steel or concrete barriers – should prevent vehicles running-off the road. However, the turned-down initial element of this kind of protection system carries a potentially high risk. An in-depth analysis of road traffic accidents involving the turned-down initial elements of VRSs was conducted at the Vehicle Safety Institute, and a possible measure identified as to how to prevent such situations.*

## Vehicle restraint systems – a safety measure

Road traffic accidents in Austria are basically divided into ten main groups, one of which is an accident type where only one vehicle is involved. In particular these are accidents in which vehicles run-off the road and collide with hazards. One means of protecting against single vehicle run-off road accidents is the presence of a VRS. On Motorways the VRS is installed on the offside to prevent collisions with oncoming traffic and on the nearside to prevent the vehicle leaving the road. In order to be allowed to install a VRS in Austria, successful testing according to the EN 1317 European Standard is necessary, which confirms in principle suitability for the intended use in traffic. The final release is carried out by the Federal Ministry of Traffic, Innovation and Technology (BMVIT). When implementing permanent vehicle-restraint systems on Austria's roads, the relevant version of specifications of the national safety regulation RVS 05.02.31 have to be applied. Even if the VRS prevents the vehicle from running-off the road, the initial element is a crucial factor. Due to the ramped terminal that is currently in use, vehicles running off the roadway and hitting this initial element can lift off and without any means of protection collide with bridge beams, noise protection devices, etc., or they can tilt over or roll over (Figure 1). In the example, the vehicle took off due



Ernst Tomasch ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsicherheit. Seine Forschungsinteressen umfassen die Unfallforschung, seine Dissertation behandelte die Entwicklung einer Unfalldatenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen.

Ernst Tomasch is project senior scientist at the Vehicle Safety Institute. His research interests include accident investigation and research, and his doctoral thesis focused on the development of an in-depth accident database of road accidents.

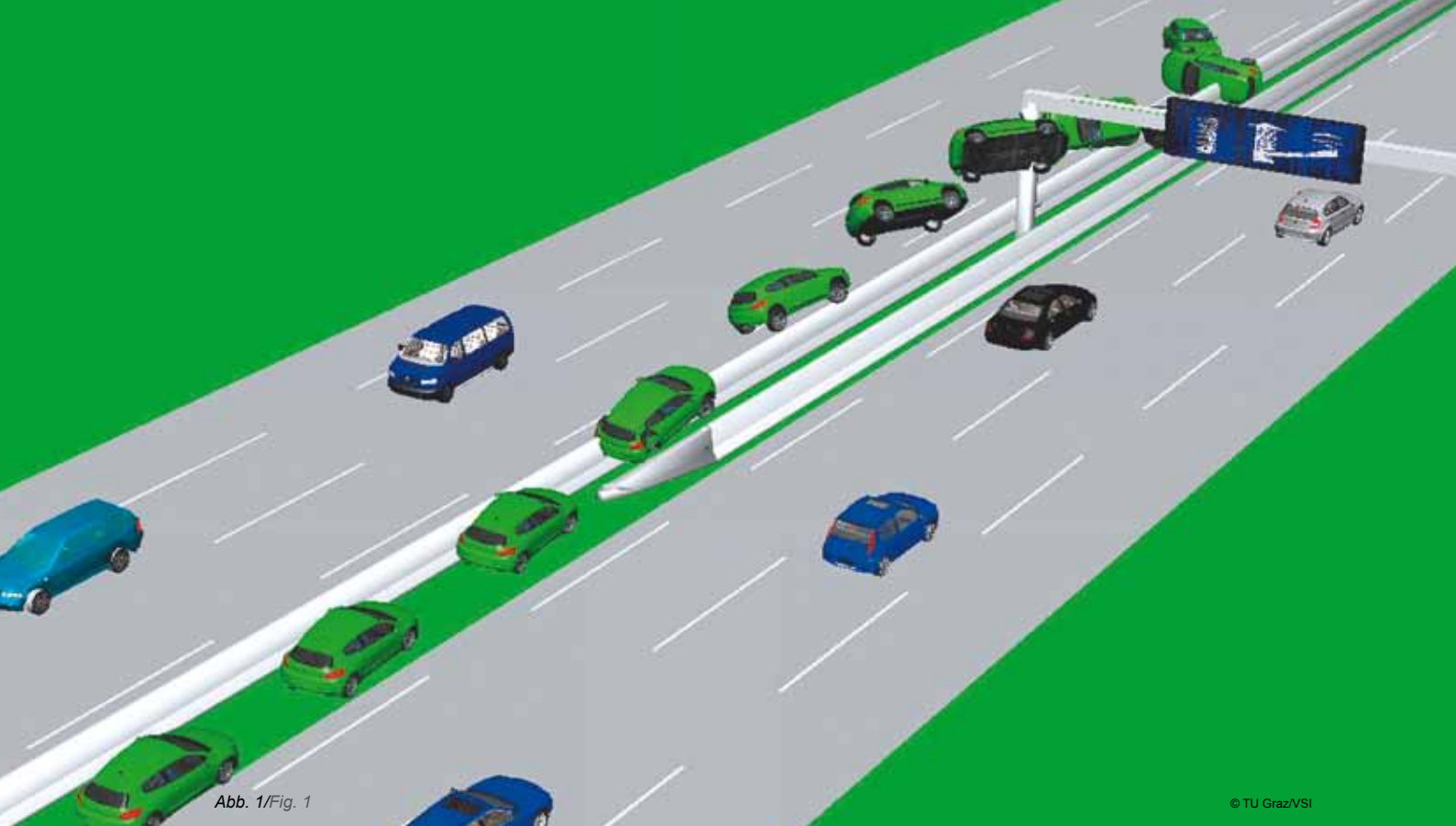


Abb. 1/Fig. 1

© TU Graz/VS

Abb. 1: Abkommensunfall mit Abheben des Fahrzeugs bei der Anrampung einer Betonleiteinrichtung.

Fig. 1: Run-off road accident where the vehicle takes off at the turned-down terminal of a VRS.

eine kritische Stelle. Durch den derzeitigen überwiegend schrägen Anlauf können abkommende Fahrzeuge bei einem Kontakt mit dem Leitelement abheben und ohne Schutzfunktion mit Stützen von Brücken, Lärmschutzeinrichtungen etc. kollidieren und/oder sich überschlagen (Abbildung 1). In diesem Beispiel wurde das Fahrzeug durch die schräge Anrampung hochkatapultiert und kollidierte in etwa vier Meter Höhe nach einer entsprechend weiten Flugphase mit dem Steher eines Überkopfwegweisers. Gerade im hochrangigen Straßennetz (A&S – Autobahnen und Schnellstraßen) ist durch die hohen Geschwindigkeiten eine besondere Gefährdung mit schweren Unfallfolgen gegeben. Insbesondere ist der Anteil an Abkommensunfällen auf A&S bei den Verkehrsunfällen mit tödlichem Ausgang besonders hoch (rd. 46 %). Als wesentliches Kollisionsobjekt gilt dabei die schräge Anrampung von FRS, welche als auslösendes Moment für ein Abheben oder Überschlagen des Fahrzeugs gilt. Daher müssen Maßnahmen überlegt werden, ob und in welcher Weise Verbesserungen möglich sind.

### Ziel

Eine immer wieder diskutierte Maßnahme gegen den schrägen Anlauf des FRS ist das Verschwenken der Anfangselemente von der Fahrbahn weg. Allerdings muss für diese Maßnahme die Realunfallsituation berücksichtigt werden, damit ein derart notwendiger Verschwenkwinkel wissenschaftlich begründet werden kann.

to the turned-down terminal and collided with a traffic signpost roughly four meters high. Motorways and dual carriageways in particular are often the scene of serious accidents due to vehicles travelling at high speed. In particular the share of fatal accidents in run-off road accidents on Austrian motorways is extremely high (approximately 46%). The turned-down terminals of VRSs were identified as significant collision objects. Countermeasures should be developed to prevent these accidents.

### Objective

One of the relevant countermeasures against the turned-down terminal design is to flare the initial elements away from the road. However, this countermeasure needs to be established taking into account the real world accident situation and justified. The main goal of the SANFTLEBEN (Sicherheitsbeurteilung der Anfangselemente von Leitschienen und Betonleitwänden, safety assessment of the initial elements of steel and concrete guardrails) study was a scientific assessment of run-off road accidents focusing on collisions with the turned-down terminals of VRSs. Factors in the collision situation, such as velocity and angle, etc., need to be identified in order to recommend the flare angle of the initial elements of VRSs.

### In-depth analysis of road accidents

For the development of appropriate countermeasures, a detailed knowledge of the accident

Das Ziel der Studie SANFTLEBEN (Sicherheitsbeurteilung der Anfangselemente von Leitschienen und Betonleitwänden) war die wissenschaftliche Untersuchung von Abkommensunfällen und hierbei insbesondere die Kollision mit dem schrägen Anlauf bei FRS zur Identifikation von Anprallkonfigurationen, welche für die Empfehlung eines Verschwenkwinkels der Anfangselemente verwendet werden können.

### Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen

Um geeignete Maßnahmen zu ergreifen, ist eine fundierte Kenntnis des Unfallgeschehens von Bedeutung. Am Institut für Fahrzeugsicherheit wurde zu diesem Zweck die Unfalldatenbank ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen) entwickelt, um Aussagen über das Gesamtunfallgeschehen zu ermöglichen. Jeder vorliegende Verkehrsunfall ist unfalltechnisch mit dem Unfallrekonstruktionsprogramm PC Crash aufbereitet und in codierter Form in der ZEDATU gesammelt.

Um nun geeignete Maßnahmen wie beispielsweise das Verschwenken der Anfangselemente von FRS zu begründen, wurden PKW-Abkommensunfälle der ZEDATU detailliert analysiert und Unfallparameter wie beispielsweise Ausgangsgeschwindigkeit, Geschwindigkeitswinkel etc. aufbereitet.

### Ergebnisse

Aus der Realunfallauswertung konnte ein Zusammenhang zwischen der Abkommensgeschwindigkeit und dem Geschwindigkeitswinkel des Fahrzeugs festgestellt werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der mögliche Geschwindigkeitswinkel ab (Abbildung 2). Dies ist deshalb von Bedeutung, da das Aufhaltevermögen eines FRS unter anderem von Geschwindigkeit und Kollisionswinkel abhängig ist. Durch das Verschwenken der Anfangselemente von FRS nimmt

scenario is essential. This is provided with the help of an in-depth road accident database called ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen) set up by the Vehicle Safety Institute. Each single accident in ZEDATU is reconstructed using the PC Crash accident reconstruction software and recorded completely anonymously in the database. In order to establish appropriate measures such as flaring the initial elements away from the road, passenger car accidents in ZEDATU were analysed and relevant accident parameters, such as initial velocity and angular velocity, etc., were highlighted.

### Results

Based on this real-world accident analysis, a relationship between run-off road velocity and run-off road angle of the passenger car could be established. It was observed that the vehicle angle in run-off road accidents decreased with increasing speed (2). This is of importance because the containment level of a VRS is dependent on factors such as vehicle speed and collision angles. By flaring the initial elements of a VRS, the possible impact angle of the vehicle will increase as will

Abb.2: Zusammenhang zwischen Abkommensgeschwindigkeit und Geschwindigkeitswinkel (ZEDATU).

Fig. 2: Relationship between run-off road velocity and velocity angle of the passenger car on motorways (ZEDATU).

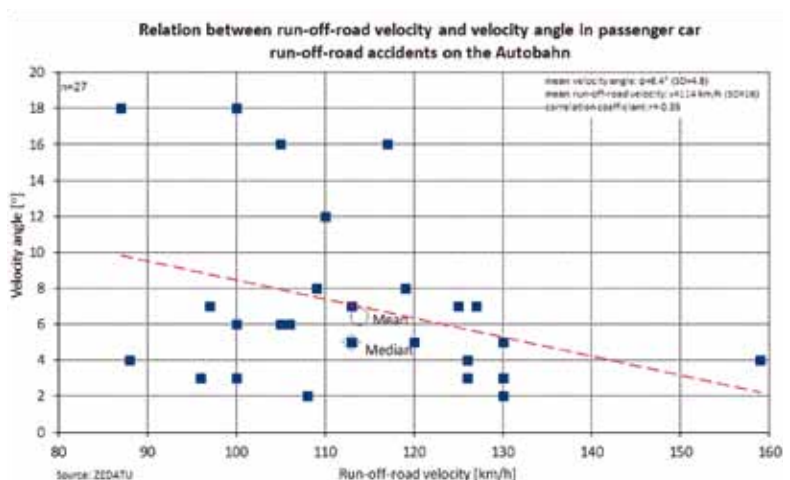


Abb. 2/ Fig. 2

© ZEDATU



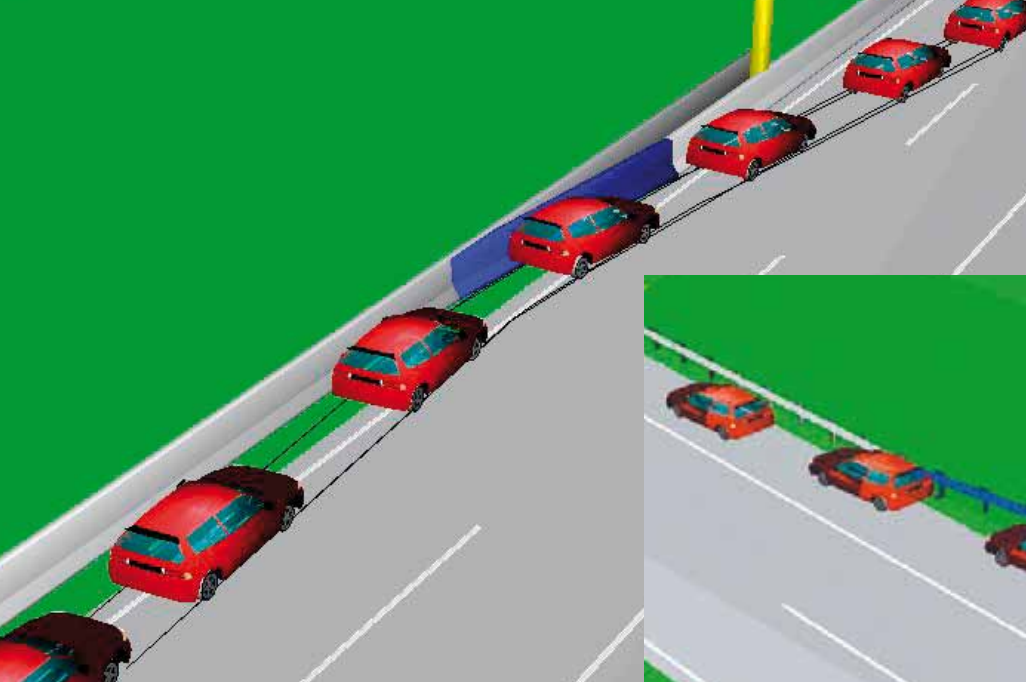
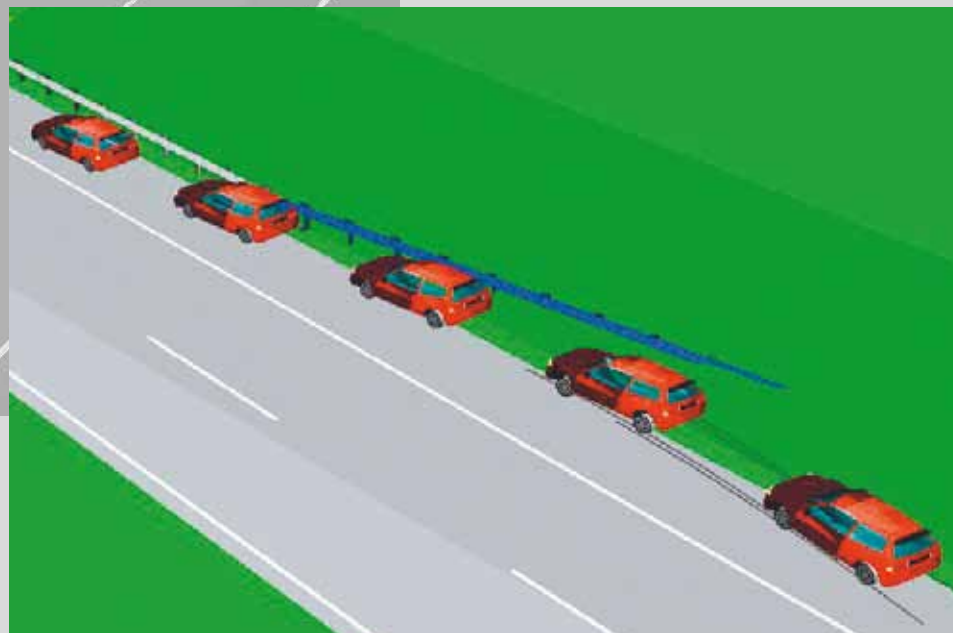


Abb. 3/4: Beispiele zur Integration der Anfangselemente von FRS.

Fig. 3/4: Examples of implementation of the initial elements of VRS.

© TU Graz/VS1



nämlich der Anprallwinkel des Fahrzeugs an das FRS zu und der Energieeintrag in das FRS würde ebenfalls steigen. Aus den Realunfällen wurden ohne Ausreißer Geschwindigkeitswinkel bis  $13^\circ$  festgestellt. Die Anprallprüfung nach EN1317 definiert einen Anprallwinkel von  $20^\circ$  und aus der Differenz der Realunfallsituation zur Normprüfung wurde daher ein maximaler Verschwenkwinkel von  $7^\circ$  empfohlen. Idealerweise können die Anfangselemente von FRS in bestehende Systeme bzw. Böschungen integriert werden (Abbildung 3/4).

Aufgrund der Realunfallanalyse konnte ein entsprechender Verschwenkwinkel für die Anfangselemente von FRS abgeleitet werden. Durch das Verschwenken der Anfangselemente mit dem empfohlenen Winkel werden jährlich rund fünf Verkehrstote auf A&S vermieden, da ein Abheben des Fahrzeugs beim Anprall verhindert wird. Die ASFINAG hat daher die Ergebnisse und Empfehlungen der SANFTLEBEN-Studie, welche Anfang 2010 abgeschlossen wurde, übernommen. Bereits Anfang 2011 wurden rund 300 von 700 Verschwenkungen realisiert und somit zahlreiche Leitschienen auf österreichischen Straßen verbessert und auf den neuesten Stand der Forschung gebracht. ■

the energy transfer into the VRS. Data such as collision speed and velocity angle gathered from real accident situations are essential parameters for justifying a maximum flare angle allowed. If velocity angles without possible statistical outliers are taken into account, a velocity angle of up to  $13^\circ$  can be observed. The impact test according to EN 1317 defines an impact angle of  $20^\circ$ . The difference between this and the real accident situation results in a maximum flare angle of  $7^\circ$ , corresponding to a ratio of 1:8. Ideally, the initial elements of a VRS can be integrated into an existing VRS or embankments (Figure 3/4).

On the basis of the real-world accident analysis, a corresponding flare angle of the initial elements of VRSs could be identified. Implementing this flare rate on Austrian motorways would save five lives each year on average. The federal road maintenance organisation ASFINAG included the recommendations of the SANFTLEBEN study, which was completed in spring 2010. In early 2011, flaring was introduced in approximately 300 out of 700 initial elements using the recommended flare angle and the initial elements improved. ■

# TU Graz und Magna verlängern ihre Zusammenarbeit um weitere fünf Jahre

## Graz University of Technology and Magna Extend their Cooperation Agreement for Another 5 Years

Ralf Kolleck

**Am 21. Juni 2012 war es so weit. Vertreter der TU Graz und Magna besiegelten die weitere Zusammenarbeit der beiden Organisationen. Public-Private-Partnership heißt das Erfolgsmodell einer bereits fast zehnjährigen bestehenden Kooperation. Die Verlängerung der Kooperationsvereinbarung sichert das Bestehen des Frank Stronach Institute [FSI] ab Jänner 2014 für weitere fünf Jahre. Die Ziele sind hoch gesteckt und fordern zum einen eine fundierte Ausbildung von angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren und zum anderen eine exzellente grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung im Bereich Automotive.**

FSI II: Hinter diesem Kürzel steckt – um mit einem in letzter Zeit häufig auftretenden Missverständnis gleich vorab aufzuräumen – keine politische Interessenvereinigung. Vielmehr steht dahinter eine Erfolgsgeschichte – FSI I –, welche 2003 begann. Damals wurde das Frank Stronach Institute [FSI] auf der Grundlage einer Kooperationsvereinbarung zwischen dem Automobilzulieferer Magna und der TU Graz ins Leben gerufen. Seitdem sind nun fast zehn Jahre vergangen. Wer glaubt, dass die Vertragsverlängerung eine reine Formsache war, der irrt, denn gut ein Jahr haben die Verhandlungen gedauert. Public-Private-Partnership ist zwar ein auch in Europa immer populärer werdendes Modell, jedoch gilt es, die in manchen Dingen unterschiedlichen Interessen der Partnerinnen und Partner abzustimmen und zu bündeln. Der Anspruch einer Universität, möglichst tief in die Grundlagen zu blicken, um daraus wissenschaftliche Erkenntnisse zu ziehen, auch wenn diese nicht immer unmittelbar monetär verwertbar sind, widerspricht auf den ersten Blick den Zielen eines Industriebetriebes. Dass dies dennoch zum Erfolgsmodell werden kann, beweisen die vergangenen Jahre der Zusammenarbeit. Letztendlich profitieren, langfristig gesehen, beide

*On June 21, 2012, representatives of both Graz University of Technology and Magna signed a contract that ensures the further collaboration of the two organizations. The cooperation model is called “Public-Private-Partnership” and stands for a mutually successful partnership that has existed for almost 10 years. Starting January 2014, the current extension of the agreement secures the existence of the Frank Stronach Institute [FSI] for another 5 years. The agreed goals are highly ambitious and demand a thorough education of all future engineers, as well as an excellent fundamental and application-based research in the automotive sector.*

FSI II: In order to avoid a recently quite common misunderstanding: this acronym does not envelop a political lobby. It rather defines a success story – FSI I – that started in 2003. It was the year when the Frank Stronach Institute was founded, based on a cooperation agreement between the automotive supplier Magna and Graz University of Technology. Since then ten years have passed. Whoever believes that the recent extension of the agreement is a mere formality is mistaken – extensive negotiations have been going on for almost a year. While the “Public-Private-Partnership” approach becomes more and more popular in Europe, it is still quite challenging to align and balance the, in some areas, differing interests of the partners. The University’s need to gain deeper insight into the fundamentals – in order to gain scientific knowledge – even if it is not immediately financially justifiable, might seem inconsistent with the goals of an industrial enterprise. Nevertheless, the recent history of this cooperation proves that the present constellation can become a successful model. On a long-term basis, all parties, including the students as well as Magna’s research and development departments, benefit from the partnership.



Ralf Kolleck ist Vorstand am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion, Sprecher des Frank Stronach Institute und Sprecher des FoE Mobility & Production. Seine Forschungsthemen sind Produktionskonzepte für Leichtbaufahrzeuge, Technologien für die spanlose Formgebung sowie Temperatur- und Oberflächenbehandlungen.

Ralf Kolleck is the head of the Institute of Tools and Forming, spokesman for the Frank Stronach Institute and the FoE Mobility & Production. His research topics are production concepts for lightweight vehicles, forming technologies, and temperature and surface treatments.



© TU Graz/Lunghammer

*Abb. 1/2: Feierlicher Moment: Verlängerung der Kooperation für das Frank Stronach Institute. V. l. n. r.: TU Graz-Rektor Harald Kainz, Magna Europe President Günther Apfalter und Markus Tomaschitz, Geschäftsführer Magna Education & Research.*

*Fig. 1/2: Moment of celebration: extension of the cooperation agreement with the Frank Stronach Institute. FLTR: TU Graz Rector Harald Kainz, Magna Europe President Günther Apfalter, and Markus Tomaschitz, Managing Director of Magna Education & Research.*

Seiten von dieser Partnerschaft, angefangen von den Studierenden bis hin zu Abteilungen für Forschung und Entwicklung seitens Magna. Für die nächste Periode ab 2014 wurden drei Schwerpunktfelder definiert:

- Production Science and Management
- Fahrzeugtechnik und (neu) Automotive Mechatronik
- Tools & Forming

Diese drei Themenschwerpunkte stellen ein optimales Bindeglied zwischen anwendungsorientierter Lehre und industrieller Praxis dar. Weitere Impulse sollen durch Bildung von Partnerschaften mit anderen Universitäten und Firmen weltweit gesetzt werden. Das FSI ist an der TU Graz in der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften eingegliedert und wird ab 2014 aus den drei oben genannten Instituten bestehen.

#### **Institut für Produktionswissenschaften und -management**

125 Studierende nutzen das Angebot im Studienjahr 2011/12 des englischsprachigen Masterstudienganges „Production Science and Management“, kurz PSM. Zahlreiche speziell zugeschnittene Lehrveranstaltungen werden hauptsächlich in englischer Sprache abgehalten. Studierende bekommen während ihrer Ausbildungszeit bereits die Möglichkeit, die Partnerunternehmen – neben Magna auch Siemens, AVL, Mahle und Böhler Uddeholm – kennen-

For the upcoming period, starting in 2014, the following key activities have been defined:

- Production science and management
- Automotive engineering and (newly) automotive mechatronics
- Tools & forming

These three core areas represent an ideal link between application-oriented teaching and industrial practice. Additional momentum should be gained by creating global partnerships with other universities and companies. The FSI is part of the Faculty of Mechanical Engineering and Economic Sciences at Graz University of Technology and, as of 2014, will consist of the three institutes of the same name listed above.

#### **Institute of Production Science and Management**

During the 2011/12 academic year, 125 students participated in the master's course "Production Science and Management". Several specially adapted lectures are held in English. All students have the opportunity to get to know collaborating companies as part of their education. In addition to Magna, these companies include Siemens, AVL, Mahle and Böhler Uddeholm. Practical traineeships grant an insight into the future working life. In a time when skilled employees are a scarce resource, the early acquaintance of the industry partners and the students is a win-win





© TU Graz/Lunghammer

zulernen. Durch Praktika wird so ein Einblick in den späteren Berufsalltag ermöglicht. Qualifizierte Fachkräfte sind heutzutage Mangelware. Durch das gegenseitige Kennenlernen von Industriepartner und Studierenden schon während des Studiums ist ein wesentlich erleichterter Einstieg in den Beruf möglich, eine Win-win-Situation für beide Seiten. Die Zahlen bestätigen diese Erfolgsbilanz. Seit der Gründung dieses Studiengangs haben insgesamt 9.739 Studierende an Lehrveranstaltungen teilgenommen. Für besonders begabte Studierende, die am FSI ihre Master- oder Doktorarbeit schreiben, gibt es einen gut dotierten Stipendienfonds.

#### **Institut für Fahrzeugtechnik und Automotive Mechatronik**

E-Mobilität und Hybridtechnologie sind Schlagworte, die von der Automobilindustrie in den vergangenen Jahren stark propagiert wurden. Dennoch steckt man in der praktischen Umsetzung noch in den Kinderschuhen. Auch alternative Antriebskonzepte bedürfen eines Umdenkens in der Gestaltung der Fahrzeuge. Am Institut für Fahrzeugtechnik leiten sich daher die Forschungsschwerpunkte von zukünftigen Herausforderungen an die Mobilität ab:

- Neue Mobilität und deren Entwicklungswerkzeuge für Fahrzeugkonzepte
- Energiemanagement von Fahrzeugen
- Automotive mechatronische Systeme

situation for both sides, as it also facilitates the students' transition into working life. Obtained figures back an excellent track record. Since its establishment, a total of 9,739 students have participated in this study program. For particularly gifted students that complete their master or doctoral thesis at the FSI, a scholarship fund has been established.

#### **Institute of Automotive Engineering and Automotive Mechatronics**

During the last few years, the catchphrases e-mobility and hybrid technology have extensively been promoted by the automotive industry. However, its practical application is not fully realizable. Alternative drive concepts require the rethinking of the vehicle design. Therefore the Institute of Automotive Engineering and Automotive Mechatronics focuses its main research on topics that are derived from future challenges to mobility concepts:

- New mobility approaches and their development tools for vehicle concepts
- Energy management of vehicles
- Automotive mechatronic systems

An essential base for the professional development of future engineers, as well as their products, is provided: scientific fundamentals combined with the practical orientation of the industry.



© TU Graz/Bergmann

*Abb. 3: Das Frank Stronach Institute [FSI] als fruchtbares Miteinander zwischen universitärer Forschung und angewandter Praxis.*

*Fig. 3: The Frank Stronach Institute [FSI] embodies a fruitful cooperation between university research and technology in practice.*

Hier finden wesentliche Bausteine für eine erfolgreiche Entwicklung der Ingenieurinnen und Ingenieure und ihrer Produkte zusammen: Wissenschaftliche Grundlagen verbinden sich mit der Praxisorientierung der Industrie.

#### **Institut Tools & Forming**

Die immer restriktiver werdenden CO<sub>2</sub>-Emissionsvorgaben der EU können nur durch konsequenten Leichtbau der Automobilhersteller erreicht werden. Hier sind die Grenzen des Machbaren längst noch nicht erreicht. Zum einen gibt es durch den Einsatz von höchstfesten und ultrahochfesten Stählen noch weiteres Gewichtseinsparungspotenzial, zum anderen sind durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien wie zum Beispiel Aluminium, Magnesium und Verbundwerkstoffen enorme Gewichtsreduktionen bei gleichem Fahrkomfort bzw. Insassensicherheit möglich. Aufgrund dieser Tatsache wurden folgende Forschungsthemen für die kommenden Jahre festgelegt:

- Leichtbaumaterialien
- Umformung höchstfester Werkstoffe

Der Leichtbau trägt besondere Herausforderungen an die Automobilindustrie heran. Unter Berücksichtigung nachhaltiger Produktion werden am Institut neue Materialien und Herstellverfahren erforscht und entwickelt. ■

#### **Institute of Tools & Forming**

The increasingly challenging CO<sub>2</sub> emission demands, issued by the EU, can only be met by the consequent application of lightweight principles by the automotive manufacturers. So far, the feasible limits of the production process have not been reached. The further usage of high-strength and ultra high-strength steels, on the one hand, and the introduction of lightweight materials, like aluminum, magnesium and sandwich materials, on the other, can provide a significant weight benefit. These weight reductions can be achieved, while maintaining the driving comfort as well the passenger safety. The future research topics are based on the above considerations:

- Lightweight materials
- Forming of high-strength and ultra high-strength materials

The principles of lightweight construction create particular requirements that have to be met by the automotive industry. While also considering a sustainable production, new materials and production techniques will be examined and developed at the Institute of Tools & Forming. ■

# Preisgekrönt: Gasmotoren-Verbrennungskonzept mit Houska-Preis ausgezeichnet

## Highly Efficient Combustion Concept for Large Gas Engine Wins Houska Prize

Andreas Wimmer

**Gemeinsam mit dem Unternehmen GE Jenbacher entwickelte das Large Engines Competence Center (LEC) der TU Graz ein Verbrennungskonzept für einen neuen Hochleistungsgasmotor, der mit seinem ausgezeichneten Wirkungsgrad einen weltweiten Spitzenplatz einnehmen soll. Mit dem dieser Entwicklung zugrundeliegenden Forschungsprojekt konnte das Team um Andreas Wimmer vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik den mit 70.000 Euro dotierten zweiten Platz im Rahmen des im April 2012 vergebenen Houska-Preises der B&C Privatstiftung gewinnen. Seit 2005 verleiht die B&C Privatstiftung jährlich den Houska-Preis für praxisorientierte Forschung an österreichischen Universitäten.**

Gasmotoren spielen aufgrund der hohen Verfügbarkeit von gasförmigen Kraftstoffen, der ausgezeichneten Umweltverträglichkeit und nicht zuletzt aufgrund der großen Entwicklungsfortschritte der letzten Jahre eine zunehmende Rolle für Antriebskonzepte und für die Energieerzeugung. Das LEC am Institut für Verbrennungskraftmaschinen der TU Graz hat sich in diesem Zusammenhang – neben der Weiterentwicklung von Großdieselmotoren – auf die Entwicklung und Optimierung neuer Verbrennungskonzepte für Großgasmotoren spezialisiert.

### Großmotoren im Fokus

Erdgasbetriebene Großmotoren zeichnen sich durch eine sehr geringe Emission von Luftschadstoffen (insbesondere Stickoxide und Partikel) aus und können einen maßgeblichen Beitrag zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten. Der CO<sub>2</sub>-Vorteil ergibt sich zum einen aus dem höheren massenbezogenen Energieinhalt sowie dem geringeren Kohlenstoffgehalt von Erdgas im Vergleich zu konventionellen Flüssigkraftstoffen und

*Together with the GE Jenbacher company, the Large Engines Competence Center (LEC) of Graz University of Technology developed a combustion concept for a new high-performance gas engine which has become a world innovation leader for its excellent efficiency. For the research project described below, Andreas Wimmer and his team from the Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics won second place worth 70,000 euros of the Houska Prize awarded by the B & C Foundation in April 2012. The award is for business-oriented and practice-relevant research projects from Austria. The B & C Foundation has been awarding the Houska Prize for practical research at Austrian universities each year since 2005.*

Gas engines are playing an increasingly bigger role in propulsion concepts and power generation due to the extensive availability of gaseous fuel, their low environmental impact and the great progress in development that has been made in the last few years. The Large Engines Competence Center (LEC) of the Institute of Internal Combustion Engines at Graz University of Technology specializes in the development and optimization of new combustion concepts for large gas engines.

### Large engines in focus

Large engines operated with natural gas are characterized by very low emissions of airborne pollutants (in particular nitrogen oxides and particulate matter) and can make a significant contribution to reducing CO<sub>2</sub> emissions. The CO<sub>2</sub> advantage arises from the higher energy content in terms of mass and from the lower carbon content of natural gas as compared to conventional liquid fuels as well as from the high efficiency of the lean burn concept used with these engines. Natu-



Andreas Wimmer ist Leiter des Large Engines Competence Centers (LEC) und stellvertretender Vorstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Verbrennungsentwicklung für Großmotoren, der Motorprozesssimulation und der Motorenmesstechnik.

Ralf Kolleck is the head of the Institute of Tools and Forming, spokesman for the Frank Stronach Institute and the FoE Mobility & Production. His research topics are production concepts for lightweight vehicles, forming technologies, and temperature and surface treatments.





© TU Graz/Wilfried Eichlseder

Abb. 1: Verleihung  
des Houska-Preises am

26. April 2012.

Fig. 1: Award of the  
Houska Prize on  
26 April 2012.

zum anderen vor allem auch aus dem hohen Wirkungsgrad des für diese Motoren eingesetzten Magerkonzepts. Gegenüber Diesel besteht ein  $\text{CO}_2$ -Vorteil von über 30 %. Jede weitere Verbesserung des Motorwirkungsgrads trägt zu einer erheblichen Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Emission bei. So ergibt eine Steigerung des Wirkungsgrads um 1 Prozentpunkt bei einem 10-MW-Motor einen um ca. 750 Tonnen pro Jahr verringerten  $\text{CO}_2$ -Ausstoß.

GE zählt mit Jenbacher Gasmotoren zu den renommiertesten Herstellern von Gasmotoren. Bisher hat sich GE mit Jenbacher Gasmotoren im Leistungsbereich bis zu 4,4 MW sehr erfolgreich etabliert. In den letzten Jahren konnte jedoch weltweit ein eindeutiger Trend zu Gasmotoren mit einer Leistung von über 5 MW festgestellt werden. Mit der Entwicklung eines neuen Motors in der 10-MW-Klasse stellt sich Jenbacher Gasmotoren von GE dieser Herausforderung und zielt mit einem Hochtechnologiekonzept mit herausragenden Motorfunktionswerten insbesondere in Bezug auf den Wirkungsgrad auf einen optimalen Kundinnen- und Kundennutzen ab. Den Schlüssel zur Erreichung dieser Zielsetzung stellt ein optimales Verbrennungskonzept dar, das im Rahmen des Forschungsprojekts am LEC zu entwickeln war.

Neben einem Wirkungsgrad von nahezu 50 % wurde dabei auch eine sehr hohe Leistungsdichte angestrebt. Die dafür gewählte Motordrehzahl von 1.000 U/min ergibt in Kombination mit einem

ral gas engines have a  $\text{CO}_2$  advantage of over 30% on diesel engines. Every new improvement in engine efficiency reduces  $\text{CO}_2$  emissions even more. An increase in efficiency of 1% point for a 10 MW engine results in a reduction of around 750 tons of  $\text{CO}_2$  emissions per year.

With its Jenbacher Gas Engines division, GE is one of the most renowned manufacturers in the area of gas engines for power generation. GE has been very successful in offering Jenbacher gas engines with a power output ranging up to 4.4 MW. In the last few years, however, a clear global trend toward gas engines with a power output of more than 5 MW has become apparent. GE's Jenbacher has now set itself the challenge of developing a new gas engine in the 10 MW class with a high technology concept in order to achieve excellent efficiency and thus an optimal benefit for the customers. The key to achieving these targets is a sophisticated combustion concept which was developed within the research project at the LEC.

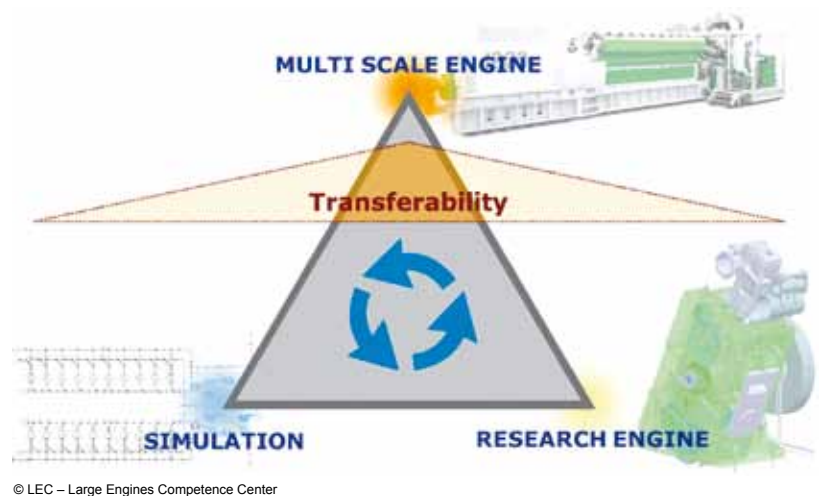
The concrete objective of the project was to develop a lean burn combustion concept with an effective efficiency of nearly 50% while meeting high power output. The high speed of 1,000 rpm chosen for the engine and the required BMEP and efficiency levels place great demands on the combustion concept. Furthermore, the concept must be able to meet future emission limits.

hohen Mitteldruck- und Wirkungsgradniveau höchste Anforderungen an das Verbrennungskonzept. Zudem muss das Konzept in der Lage sein, auch zukünftige Emissionsvorschriften einhalten zu können.

### Die Entwicklungsmethodik

Für die Durchführung des Projektes wurde die zur Entwicklung und Optimierung von Verbrennungskonzepten für Großmotoren am LEC abgeleitete Methodik LDM (LEC Development Methodology) eingesetzt. LDM basiert auf einer intensiven Interaktion von Simulation und experimentellen Untersuchungen an Einzylinder-Forschungsmotoren sowie Vollmotoren. Im Rahmen der Entwicklungsmethodik werden sowohl die dreidimensionale CFD-Simulation als auch die null- und eindimensionale Motorprozessrechnung eingesetzt. Während die 3D-CFD-Simulation vor allem für die Detailoptimierung der relevanten Vorgänge eingesetzt wird, werden null- und eindimensionale Motorprozesssimulationen für die Voroptimierung maßgeblicher Motorparameter angewandt.

Die Vorauslegung des Verbrennungskonzeptes des J920-Motors erfolgte zum größten Teil auf Basis der Simulation, wobei intensiv auf die am LEC entwickelten Modelle zur Simulation der Verbrennung, des Klopfens und der Schadstoffbildung zurückgegriffen wurde. Dieser virtuelle Ansatz wurde vor allem wegen der sehr kurzen Entwicklungszeit, die für das Gesamtprojekt zur Verfügung stand, gewählt. Die weitere thermodynamische Optimierung wurde in weiterer Folge auf dem speziell für diese Aufgabe am LEC aufgebauten Einzylinder-Forschungsmotor durchgeführt. Nach umfangreichen Tests des entwickelten Verbrennungskonzeptes am Einzylinder-Forschungsmotor wurde das Konzept schließlich auf den Prototyp-Vollmotor bei Jenbacher Gasmotoren übertragen.



### Development methodology

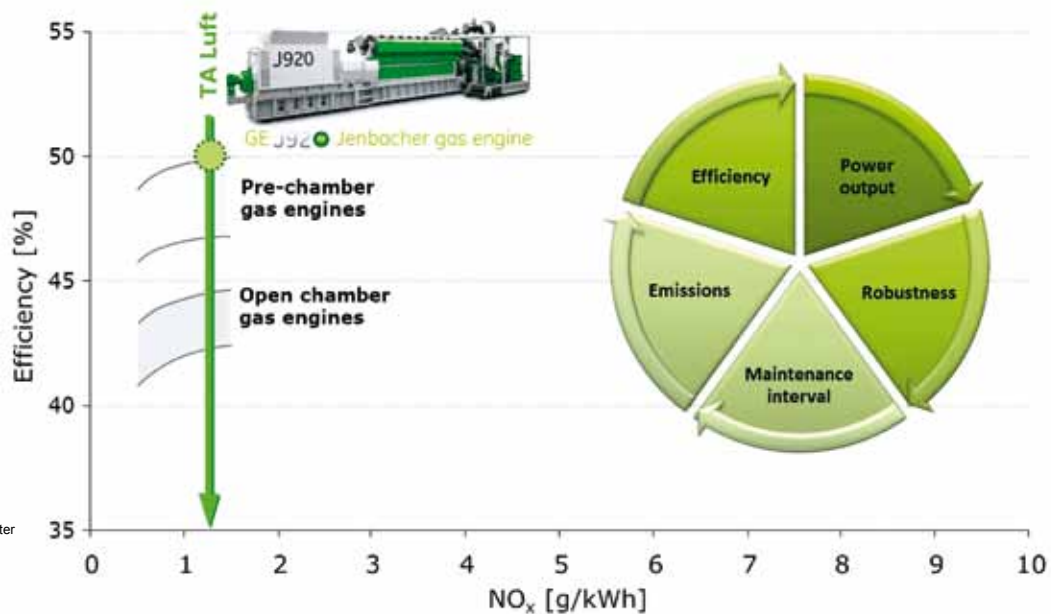
LDM (LEC Development Methodology), a methodology for developing and optimizing combustion concepts for large engines that was developed at the LEC, was used to implement the project. LDM is based on an intensive interaction between simulation (SIM) and experimental investigations on single-cylinder research engines (SCE) and multi-cylinder engines (MCE). The development methodology makes use of three-dimensional CFD simulation and zero- and one-dimensional engine cycle simulation. While 3D CFD simulation is employed above all to optimize the details of relevant processes, zero- and one-dimensional engine cycle simulation is applied to pre-optimize significant engine parameters.

The combustion concept for the J920 engine was largely pre-designed on the basis of simulation, which relied intensively on the models simulating combustion, knock and pollutant formation developed at the LEC. This virtual approach was chosen above all due to the very short development time available for the entire project. Further thermodynamic optimization work was done on the single-cylinder research engine set up at the LEC specially for this project. Extensive tests of the combustion concept under development were carried out on the single-cylinder research engine during which the operating limits and the engine parameters were determined. The concept was then transferred to the prototype multi-cylinder engine from GE's Jenbacher Gas Engines.

Abb. 2: LEC

Entwicklungsmethodik.

Fig. 2: LEC Development Methodology.



© LEC – Large Engines Competence Center

Abb. 3: J920 im Vergleich zu Wettbewerbsmotoren.

Fig. 3: J920 in comparison to engines of competitors.

### Anwendungsgebiete

Großgasmotoren werden bereits heute für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt, wobei die Anzahl der möglichen Anwendungsgebiete stetig steigt. Die wichtigsten Einsatzgebiete sind dezentrale Erzeugung von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken (der Gesamtwirkungsgrad einer BHKW-Anlage liegt bei über 90 %), Gen-Sets und mechanische Antriebe. Mit den zukünftig strenger werdenden Emissionsvorschriften im Marinebereich ist auch die Verwendung von Gasmotoren als Schiffsantrieb in das Interesse der Hersteller und Reedereien gerückt. Zunehmend an Bedeutung gewinnt die Anwendung von Großmotoren auch als Biogas- und Sondergasmotoren (Deponiegase, Abfallgase aus der Industrie, Erdölbegleitgase etc.).

### Conclusio

Insgesamt können die Ergebnisse des preisgekrönten Projektes wie folgt zusammengefasst werden: Es wurde ein hocheffizientes Verbrennungskonzept für den neuen 9,5 MW Jenbacher Gasmotor von GE entwickelt. Insbesondere der Wirkungsgrad von 48,7 % elektrisch stellt einen weltweiten Spitzenwert dar. Die Basisauslegung des Brennverfahrens erfolgte praktisch ausschließlich auf Simulationsbasis. Sowohl die Messungen am Einzylinder-Forschungsmotor als auch am Prototyp des Vollmotors bestätigten die hervorragende Qualität der Vorausoptimierung. Durch den virtuellen Ansatz konnte eine sehr kurze Entwicklungszeit für das Motorkonzept eingehalten und eine wesentliche Reduktion der Entwicklungskosten erzielt werden. Das Konzept wurde bereits erfolgreich durch ein umfassendes Versuchsprogramm am Vollmotor bei Jenbacher Gasmotoren validiert und befindet sich in der Serienüberleitung. ■

### Applications of large gas engines

The excellent qualities of large gas engines make them suitable for a wide variety of applications, and the number of potential areas of application continues to rise. The most important areas of use are the decentralized production of electricity and heat in combined heat and power plants (CHPP) (the overall efficiency of a CHPP is over 90%), gen-sets and mechanical drive applications. As future emission regulations become more stringent in the area of marine applications, manufacturers and shipping companies are becoming increasingly interested in using gas engines for ship propulsion. The use of large engines for biogas and special gas engines is also gaining in importance. Special gas engines allow environmentally sound power generation using gases that in many cases cannot otherwise be exploited, e.g. landfill gas, waste gas from industry, and flare gas.

### Conclusion

Overall the results of the awarded project can be summarized as follows:

A highly efficient combustion concept was developed for GE's new 9.5 MW Jenbacher gas engine. The electrical efficiency level of 48.7% is best of class worldwide. The combustion concept was pre-designed to a very large degree using simulation. The measurements on both the single-cylinder research engine and the prototype of the multi-cylinder engine confirmed the outstanding quality of pre-optimization. The use of this virtual approach enabled the engine concept to be developed within a very short time and very cost-effectively. The concept developed has already been successfully validated on the multi-cylinder engine at GE's Jenbacher Gas Engines through an extensive test program and is currently being put into series production. ■





# Mobility & Production

FOE

Field of Expertise

Fünf zukunftssträchtige Bereiche in Forschung und Lehre bilden den unverwechselbaren Fingerabdruck der TU Graz auf dem Weg zur Exzellenz. Diese Fields of Expertise sind Kompetenzbereiche, die zu einzigartigen Markenzeichen der TU Graz im 21. Jahrhundert werden sollen. Gestärkt werden die Fields of Expertise durch thematisch neue Professuren und Investitionen sowie intensive Zusammenarbeit mit Industrie und Wirtschaft in Form von zahlreichen gemeinsamen Beteiligungen an wissenschaftlichen Kompetenzzentren und Forschungsnetzwerken. Kooperationen mit wissenschaftlichen Partnereinrichtungen wirken als weiterer Motor zum Erfolg.

Five fields of the future in research and teaching go to form the unmistakable fingerprint of Graz University of Technology on its path to excellence. These fields of expertise will become distinctive hallmarks of Graz University of Technology in the 21<sup>st</sup> century. They will be strengthened by thematically new professorships and investments as well as intensive cooperation with industry and business in the form of numerous shared participations in scientific competence centres and research networks. Cooperations with scientific partner institutes represent a further dynamo to success.



Advanced Materials Science



Human- & Biotechnology



Information, Communication & Computing

# FOE

Fields of Expertise

Mobility & Production



Sustainable Systems



**Impressum:** Eigentümer: TU Graz. Herausgeber: Vizerektor für Forschung. Chefredaktion: Ines Hopper-Pfister, Büro des Rektorates – Kommunikation, Rechbauerstraße 12/I, 8010 Graz. E-Mail: [TU-research@tugraz.at](mailto:TU-research@tugraz.at). Gestaltung/Layout/Satz: Christina Fraueneder. Druck: Medienfabrik Graz. Auflage: 4.800 Stück. Wir danken den Autorinnen und Autoren für die Bereitstellung der Texte und Fotos. Geringfügige Änderungen sind der Redaktion vorbehalten. Titelbild: © Miredi – Fotolia.com. TU Graz *research* erscheint zweimal jährlich.  
► [www.tugraz.at/research-journal](http://www.tugraz.at/research-journal)

ISSN 2074-9643

© Verlag der Technischen Universität Graz 2012, [www.ub.tugraz.at/Verlag](http://www.ub.tugraz.at/Verlag)