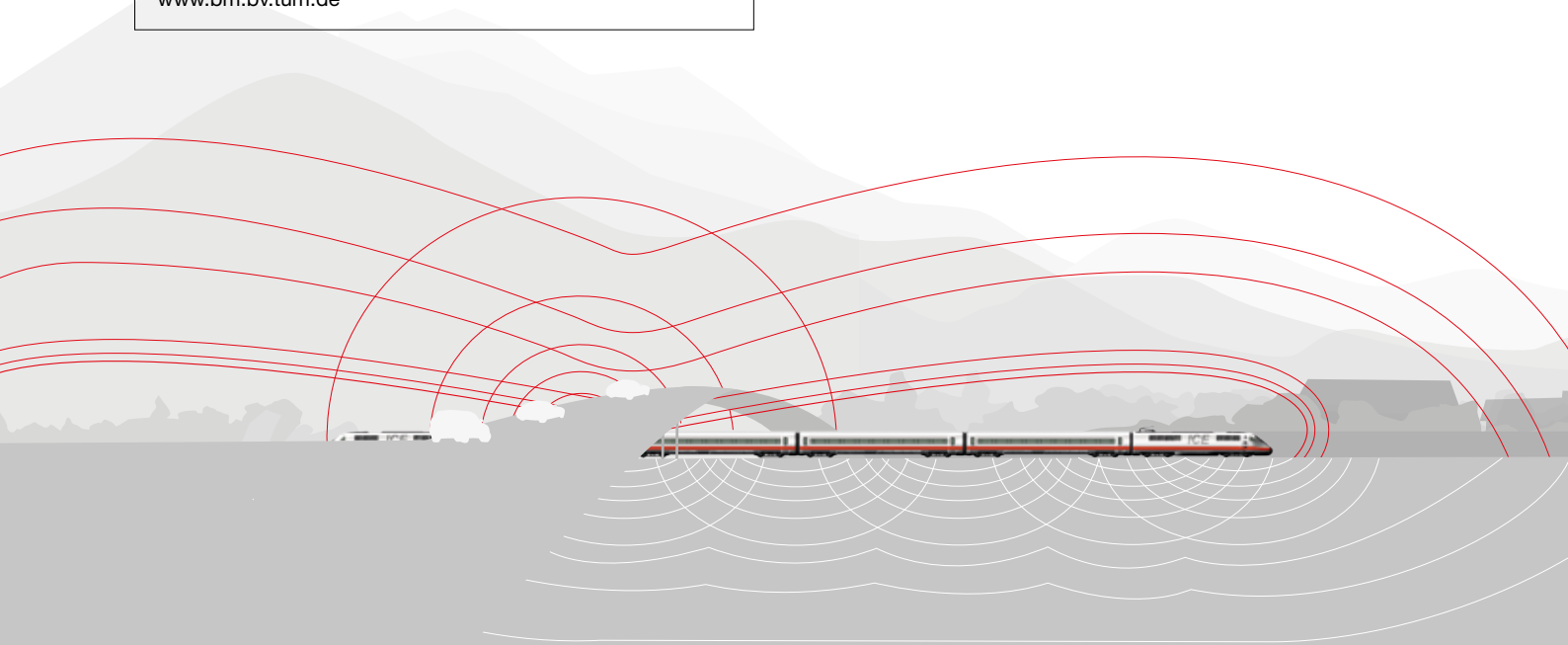


Link

[www.bm.bv.tum.de](http://www.bm.bv.tum.de)



# Wenn Häuser lebendig werden

**Schall ist unsichtbar, kann aber am falschen Ort sehr lästig sein. Forscher der TUM benutzen mathematische Methoden der Computersimulation und kombinieren sie mit Messungen. So kommen sie unerwünschten Schwingungen auf die Spur**

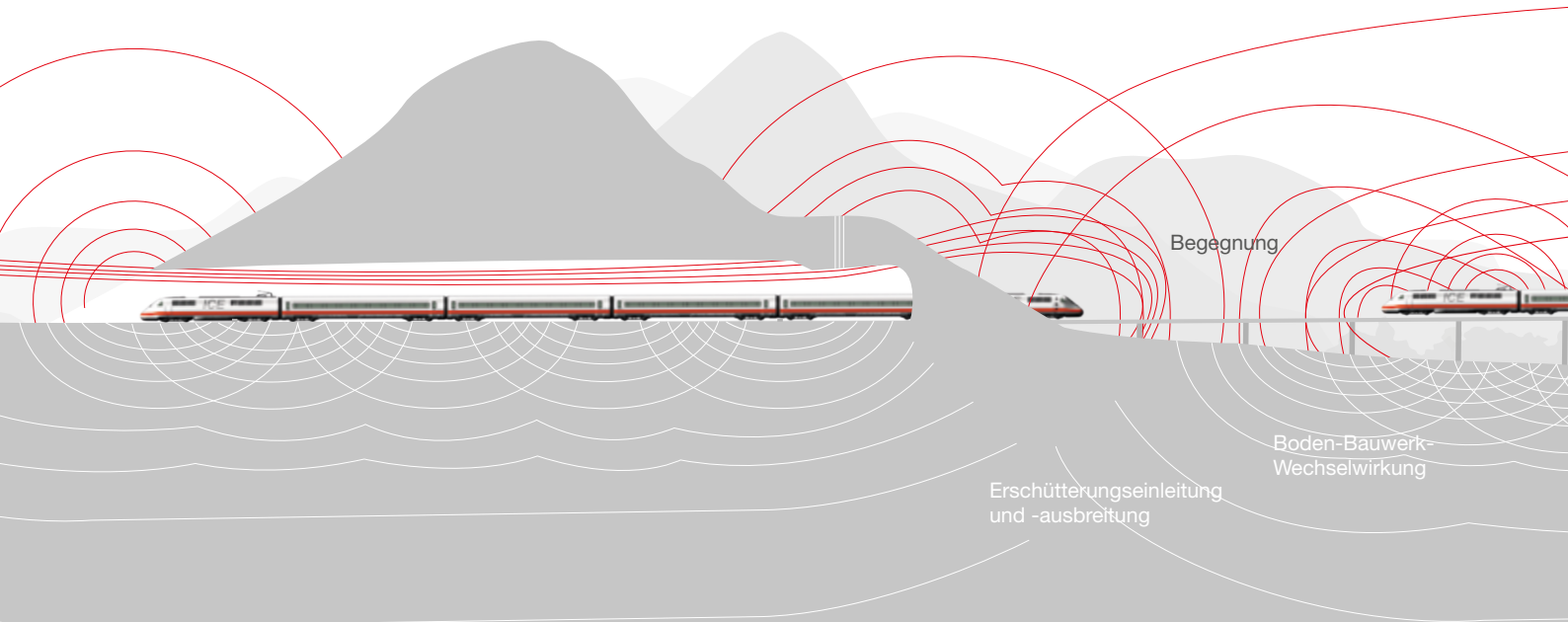
**W**as haben quietschende Fahrzeugbremsen und hellhörige Häuser gemeinsam? Sie können Schwingungen nicht schlucken und geräuschlos in Wärme umwandeln, sondern leiten sie mehr oder weniger stark gedämpft an unsere Ohren weiter. So ist es also nicht verwunderlich, dass am Lehrstuhl für Baumechanik der TUM neben Häusern, Brücken, U-Bahnrohren und Bahngleisen auch Bremsen untersucht werden. „Die Baudynamik beschreibt die Schwingungen von und in Bauten und in den übertragenden Strukturen. Wir betrachten Hochbauten und Verkehrswege, Tunnelstrukturen und den Baugrund“, sagt Professor Gerhard Müller, der den Lehrstuhl innehat. „Das beginnt bei Vibrationen mit Schwingwegen im Bereich von Atomdurchmessern, die ein Mensch nicht spüren kann, die aber unter Umständen die Funktionstüchtigkeit eines empfindlichen Mikroskops stören können, und reicht bis zu Erdbebenwellen.“

Müller und seine Mitarbeiter erwecken die Gebäude zum Leben – sie lassen sie virtuell im Computer schwingen, so wie sie es in Wirklichkeit tun würden, und das bereits lange bevor sie gebaut werden. So kann man schon im Vorfeld Rückschlüsse auf unerwünschte Schall- und Vibrationseffekte ziehen und Mängel abstellen.

Da war zum Beispiel der Transrapid, ein Projekt, das die Region München jahrelang in Atem hielt. Die Betreiber wollten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens wissen, wie viel Lärm und welche Schwingungen zu erwarten sein würden, und beauftragten deshalb Gerhard Müller und sein Team, das zu erforschen. Seine Mitarbeiter Dr. Stefan Lutzenberger und Georg Frühe simulierten den Transrapid auf dem Computer und entdeckten dabei interessante Effekte: „Man würde ja denken, dass eine Magnetschwebbahn keine Erschütterungen verursacht, weil sie über den Schienen schwebt“, sagt Lutzenberger, „aber das ist nicht der Fall. Die Bahn überträgt trotzdem Wechselkräfte, in diesem Fall über die Magnete.“

#### Der Kamm-Effekt beim Transrapid

Diese haben eine feste Länge, dazwischen sind Lücken. Wenn die Bahn darüberfährt, entstehen kurze Schläge, wie wenn man mit dem Fingernagel die Zinken eines Kamms entlangstreicht. Mit ihren Computersimulationen, die diese Effekte nachbildeten, prüften die Wissenschaftler, was das für den Immissionsschutz bedeutet. „Wir untersuchten: Wann muss man Maßnahmen ergreifen und wie sehen diese aus?“, so der ▶



Bauingenieur. „Wir haben dabei die prinzipiellen Vorgänge unabhängig von der geplanten Strecke zum Münchner Flughafen erforscht.“

### Wenn Schwingungen spürbar werden

Neben dem „Kamm-Effekt“ kommt noch hinzu, dass der Fahrweg in regelmäßigen Abständen Stützen hat. „Zwischen diesen gibt der Fahrweg dem Druck des Fahrzeugs anders nach als direkt darüber. Außerdem können die Stützen unterschiedlich reagieren, je nachdem, ob sie zum Beispiel auf Fels oder auf Kies stehen. Daraus leitet sich auch das Schwingungsverhalten der Träger dazwischen ab.“ Diese Kräfte werden in den Boden übertragen und dürfen weder die Gebrauchstauglichkeit noch die Tragsicherheit gefährden – wie die Fachleute das nennen. In einfachen Worten bedeutet es, dass die Schwingungen bestimmte Grenzen nicht überschreiten dürfen. Ab einer Schwinggeschwindigkeit von etwa einem Zehntel Millimeter pro Sekunde sind sie für den Menschen spürbar und auch in den Häusern neben dem Fahrweg zu fühlen.

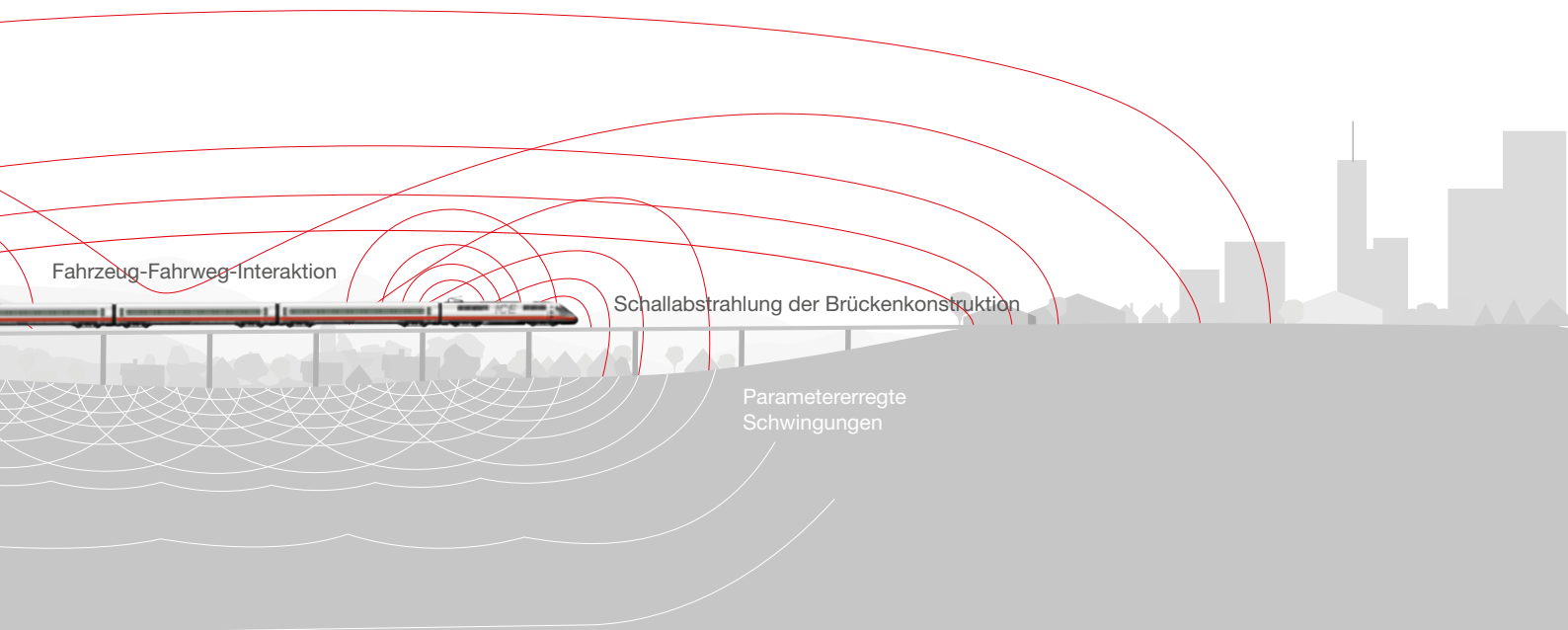
Damit die Tragsicherheit garantiert ist, müssen die Forscher außerdem noch ermitteln, wie man ein Aufschwingen des Fahrwegs infolge von Resonanzeffekten verhindert, und auch die Ermüdung des Materials mit berücksichtigen. Dass Gebäude schwingen, ist schon lange bekannt und kann etwa an Glockentürmen kata-

strophale Folgen haben. Dort übertragen sich die dynamischen Kräfte der Glocken auf den Turm und können ihn schlimmstenfalls zum Einsturz bringen. Aber sogar Bewegungen, die einfach nur durch Wind angeregt werden, können ein Bauwerk zerstören. Das zeigte die Tacoma-Brücke im US-Bundesstaat Washington. Sie stürzte am 7. November 1940 nach nur vier Monaten Betriebszeit spektakulär ein, nachdem sie von Windböen zur Resonanz gebracht worden und wie ein Trampolin hin- und hergeschlingert war. Schon vorher hatte diese Hängebrücke wegen ihrer starken Schwingungen den Spitznamen „Galloping Gertie“ erhalten und war zum Touristenmagneten geworden.

### Katastrophen durch Planung vermeiden

Um derartige Katastrophen zu vermeiden, berechnen Baudynamiker heute mithilfe ihrer Computer schon in der Planungsphase, was im ungünstigsten Fall passieren kann. Dementsprechend lassen sich dann konstruktive Maßnahmen ergreifen, das Bauwerk sicher und schwingungsarm zu gestalten.

Auf die Idee, dass man Gebäude berechnen kann, kamen einst die alten Griechen. „Schon zwischen dem sechsten und dem zweiten bis dritten Jahrhundert v. Chr. wurden in der Antike Grundlagen für unsere heutige Mechanik gelegt“, erzählt Gerhard Müller. „Pythagoras erkannte, dass gesichertes Wissen nur mithilfe



mathematischer Methoden zu entwickeln sei. Und Aristoteles betonte, dass eine wissenschaftliche Disziplin über Ursachenkenntnis verfügen muss. Das bedeutet also: Man muss den Ursachen auf den Grund gehen und dabei die Mathematik verwenden.“ Und dieser Maxime folgen die Bauingenieure noch heute, auch wenn inzwischen die Mittel, die ihnen zur Verfügung stehen, um Lichtjahre feiner und ausgefeilter sind.

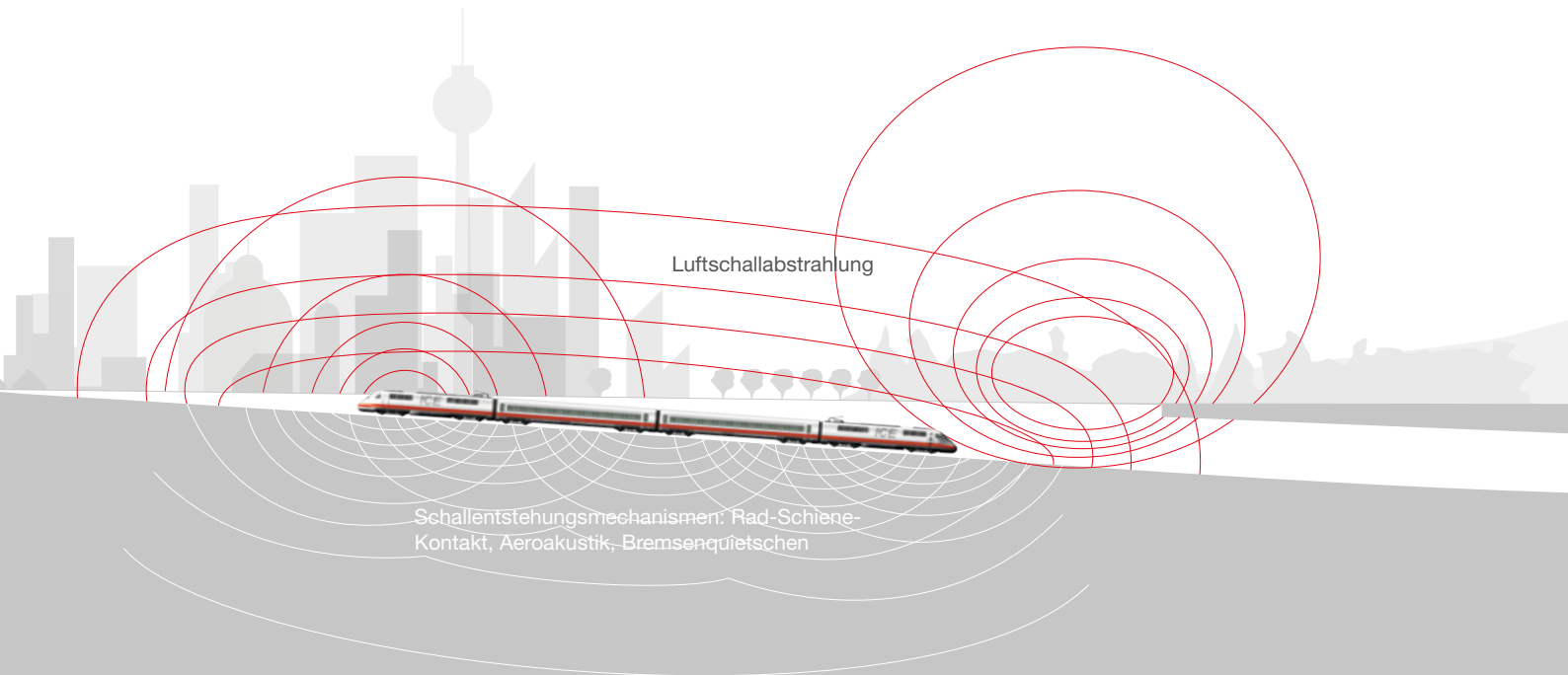
#### Vom Schall des Eisenbahnzuges getroffen

Die Forscher teilen mithilfe des Computers Räume und Körper in sogenannte finite Elemente ein, das sind gedachte Zellen, deren Schwingungsverhalten man mit komplizierten Gleichungen – der Fachmann spricht von Differenzialgleichungen – berechnen kann. Dieses virtuelle System regt man dann mathematisch mit Schall – etwa eines vorbeifahrenden Eisenbahnzuges – an. Jede Zelle, die vom Schall „getroffen“ wird, leitet nun ihre Schwingungsenergie an ihre Nachbarzellen weiter und wird ihrerseits von diesen angeregt oder gedämpft; so verknüpft man mithilfe des Computers die Elemente in einer numerischen Simulation miteinander. Die Tücke des Objekts erfordert dabei aber immer wieder besondere Tricks, etwa den Einsatz von Wavelets bei der Analyse der Schwingungen. Dieses mathematische Verfahren, das einst für die Chaostheorie entwickelt wurde, erlaubt es, mithilfe spezieller Funktionen aus vielen überlagerten

Daten die „Essenz“ herauszufiltern, aus der später die Gesamtinformation wieder rekonstruiert werden kann.

#### Der Werkzeugkasten der Baudynamiker

Für hochfrequente Schwingungen stoßen die Finite-Elemente-Methoden an ihre Grenzen, deshalb haben die Experten einen ganzen Werkzeugkasten mit anderen Verfahren: So mittelt man in der Statistischen Energieanalyse über große Bereiche, um verlässliche Prognosen zu erstellen. Die Integraltransformations- und die Randelementemethode hingegen verwendet man bei der Untersuchung von sehr großen Gebieten, wie zum Beispiel von Baugrund. Hier schließt man aus den Schwingungen der Ränder auf das Gesamtsystem. Ein weiteres Beispiel, das die Baumechaniker beschäftigt, erläutert Martin Buchschmid: „Angenommen, wir wollen berechnen, wie sich Schall in einem Gebäude verteilt, unter dem eine U-Bahn hindurchfährt, oder welches Schallfeld sich in einem Auto während der Fahrt ausbildet. Dort wird sowohl die Struktur selbst als auch die Luft im Inneren zu Schwingungen angeregt. Diese haben unterschiedliche Wellenlängen und werden durch die Beschaffenheit der Oberflächen beeinflusst, je nachdem, ob diese den Schall schlucken oder reflektieren.“ Buchschmid entwickelt deshalb zusammen mit Kollegen Verfahren, mit denen man das Schwingungsverhalten der Wände beschreiben kann. Gleichzei- ▶



tig untersucht er mit der Finite-Elemente-Methode, welche sogenannten Eigenschwingungen die Räume als Ganzes zeigen würden, wenn sie starr wären. Denn wie in einem Musikinstrument, etwa einer Geige, schwingt auch die Luft in großen Räumen, und zwar in ganz charakteristischen Tonhöhen, je nach Größe und Form. Die so erhaltene Schallverteilung kombinieren die Wissenschaftler dann mathematisch mit den schwingenden Wänden und erhalten damit ein Schallfeld, das ihnen Hinweise auf die Energieverteilung im Gebäude oder im Auto gibt.

Da jede Zelle in der Simulation mehrere Dimensionen hat, erfordert das schnell sehr viel Rechenzeit. Je kleiner die Zellen sind, desto genauer ist meist das Ergebnis. Wenn aber der Computer an seine Grenzen stößt, muss man sich neue Wege ausdenken, und das tun die Spezialisten am Lehrstuhl für Baumechanik. Sie versuchen, die Fülle der Daten zu reduzieren, indem sie irrelevante Dinge weglassen und nur die entscheidenden Faktoren berücksichtigen. An den Stellen, wo sich wenige Änderungen abspielen, kann man Mittelwerte annehmen, an anderen Stellen muss man unter Umständen ganz genau hinsehen.

### Modellierung der Wirklichkeit

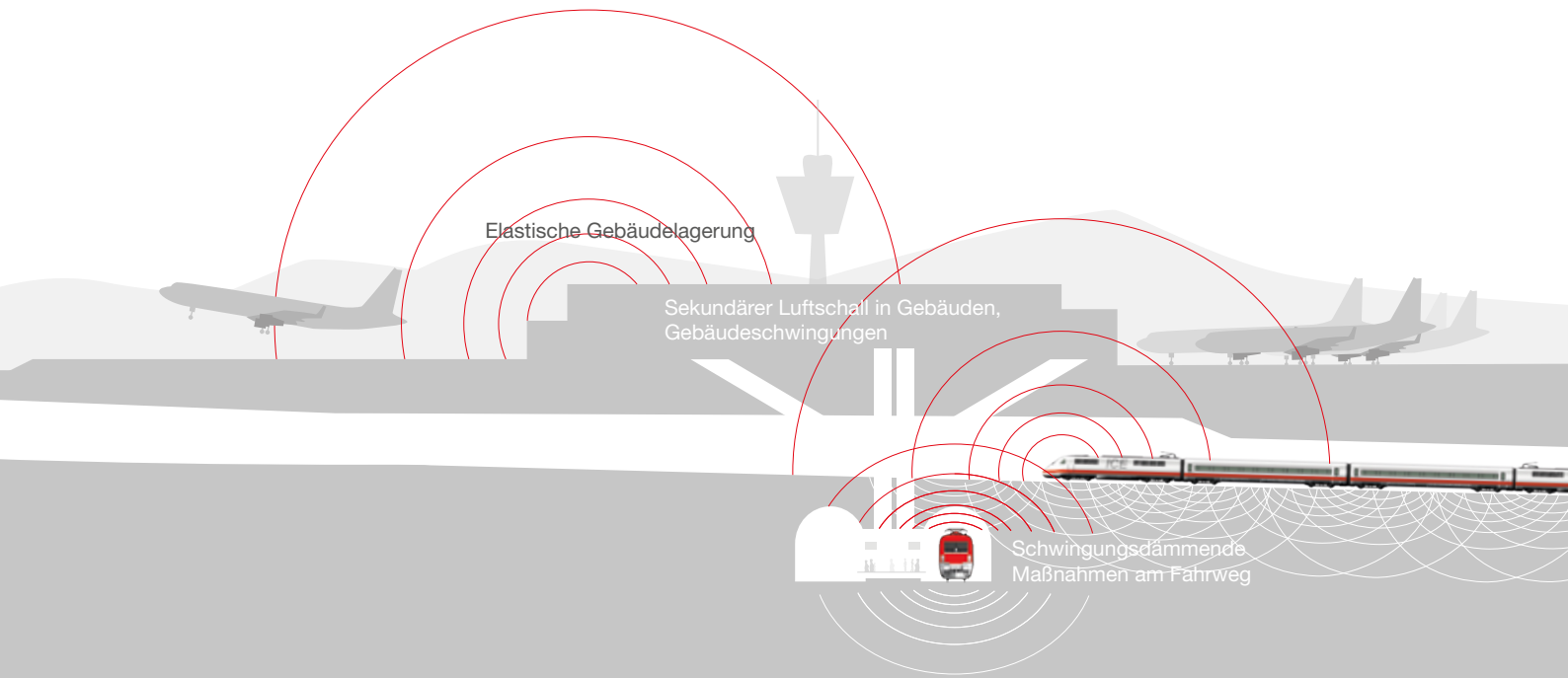
So kann man am Ende schon bei der Bauplanung vorhersagen, wo beispielsweise Dämpfungselemente not-

wendig sind. „Bauingenieure werden darauf geschult, sich gut in die Modellierung der Wirklichkeit hineinzuversetzen“, sagt Gerhard Müller, und diese Fähigkeit benötigen sie auch bei den Rechenmodellen. Bei einem Gebäude, das in der Hauptsache aus rechtwinkligen Elementen besteht, mag das noch relativ einfach sein, kompliziert wird es bei beliebig geformten Räumen, etwa im Innenraum eines Autos. Aber auch hier kommen die Forscher voran und entwickeln Algorithmen, die man anwenden kann, ohne dass der Rechner wochenlang blockiert ist.

So war das auch bei den Bremsen. Alexander Buck und Baldur Allert haben für BMW die quietschende Bremse über ein Finite-Elemente-Modell abgebildet und die Schwingformen des Systems im Rahmen einer Stabilitätsanalyse untersucht. Dabei entdeckten sie, dass bestimmte Bewegungen in der Ebene der Bremsscheibe selbst besonders leicht zum Quietschen führen. Sie variierten im Computer Details der Konstruktion, aber auch das Material der Bremsscheibe, um Hinweise für Abhilfemaßnahmen zu geben.

### Simulation und Realität werden eng verzahnt

Damit die numerischen Simulationen die Wirklichkeit zuverlässig beschreiben, müssen die Rechnungen eng mit der Realität verzahnt sein. Modelle geben die Wirklichkeit immer nur mit Unschärfen wieder, sodass



es besonders effizient ist, wenn man schon während der Bauphase Messungen durchführt und damit die Modelle immer wieder nachschärft. „Beim Bau eines Wohnhauses über einer U-Bahnrohre ging es beispielsweise darum, die Erschütterungen durch die U-Bahn zu ermitteln“, erzählt Gerhard Müller. „Da hat man den Bauplan so offen gestaltet, dass es zu bestimmten Zeitpunkten noch möglich gewesen wäre, besondere Schallschutzmaßnahmen einzubauen. Wir haben den Bau mit Messungen und Simulationen begleitet und unsere Prognosegenauigkeit auf diese Weise ständig erhöht. Schließlich stellte sich rechtzeitig heraus, dass zusätzliche Maßnahmen nicht nötig waren.“

### Bauwerke mit Sensoren überwachen

So weit also die Untersuchung der regulären Fälle, wie sie im Alltag zu erwarten sind. Was aber passiert, wenn außerordentliche Bedingungen auftreten – Materialermüdung oder gar Erdbeben? Auch dazu haben die Wissenschaftler Werkzeuge entwickelt, die sowohl Voraussagen von Schäden als auch Vorbeugung dagegen erlauben. Zum Beispiel die Schallemissionsanalyse: „Wenn Beton bricht, stößt er Schallwellen aus“, sagt Gerhard Müller. „Wenn man in Bauwerken entsprechende Sensoren einbaut und die Ereignisse aufzeichnet, kann man schon kleine Schäden feststellen und Schlimmerem vorbeugen.“ Der Einsturz der Dachkon-

struktion der Berliner Kongresshalle im Mai 1980 wäre womöglich zu verhindern gewesen, wenn dieses Verfahren damals schon zur Verfügung gestanden hätte. Gerade in jüngster Zeit häuften sich Erdbeben, und die Schäden waren dort besonders hoch, wo die Gebäude nicht angepasst gebaut waren. Johannes Guggenberger und Yuh Luen Lin haben mit Computermodellen untersucht, wie man Häuser mit „Sollbruchstellen“ ausstatten kann, damit sie die Energie kontrolliert absorbieren und nicht einstürzen. Nun ist aber jedes Erdbeben anders, und man muss die Vorhersagen deshalb an vielen unterschiedlichen Beben überprüfen. Das wäre aber viel zu aufwendig. Die Bauingenieure haben deshalb die Rechenmodelle intelligent abgespeckt und einen hybriden Ansatz entwickelt: Auf der einen Seite berechnen sie globale Schwingungen, auf der anderen Seite schauen sie an den Stellen, wo ein Versagen eintreten könnte, noch einmal wie mit der Lupe darauf.“ Am Ende bleibt eines bei allen Projekten des Lehrstuhls für Baumechanik gleich: Es geht darum, Objekte zum Leben zu erwecken und ihnen so die Geheimnisse ihrer Schwingungen zu entlocken. Die Kunst besteht darin, möglichst fein und zuverlässig zu rechnen, ohne den Computer zu überfordern. So treffen sich die Methoden der Baumechanik mit denen der Mathematik und Informatik – eine interdisziplinäre Herausforderung, die nicht nur Bremsen leiser macht.

*Brigitte Röthlein*