

Mischprozessen auf den Grund gehen

Von Achim Kittel, Marco Munzel und Jens Nawitzki

Wir berichten über einen neuartigen Sensor zur Messung von Temperaturvariationen in unterschiedlichen Fluiden, d.h. in Flüssigkeiten und Gasen. Der Sensor wird aktuell zur Untersuchung von Mischvorgängen eingesetzt. Exemplarisch stellen wir Messergebnisse vor, bei denen sehr schnelle Temperaturvariationen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung beobachtet werden.



Ein alltägliches Bild: Wirbel aus Milch in einer Tasse Kaffee.

We report on a new type of sensor which is dedicated to measure temperature fluctuations in various fluids, i.e. liquids and gases. Currently, the sensor is used to investigate the basics of mixing in fluids like water and air. We introduce some exemplary measurements of fast temperature fluctuations with high spatial and temporal resolutions.

Vielleicht haben Sie, geneigter Leser, auch einmal eines Morgens vor Ihrer Tasse Kaffee oder Tee gesessen und schlaftrunken beobachtet, wie sich die Milch beim Eingießen in eigenartigen Wolken verteilt. Auch wenn Sie einen Löffel benutzen, um die Milch gleichmäßig zu verteilen, entstehen die allgegenwärtigen und faszinierenden Schlieren und Wirbel. Wirbel, wie man sie etwa beim Start einer Rakete, bei der gewaltigen Eruption eines Vulkans oder auch bei der Tinte, die ein Tintenfisch zur Irreführung seiner Feinde verspritzt, beobachten kann. Schon Leonardo da Vinci bemerkte diese Wirbel und beschrieb sie, da ihm die mathematischen Methoden fehlten, mittels einer Handskizze (in manuscriptum f. „Schriften zur Optik und des Wassers“). Dass Wirbel energiegeladen sind, zu einer Mischung und damit Unordnung führen, ist alltägliche Erfahrung, die sich in der Redewendung „Wirbel machen“ ausdrückt.

In etlichen technischen Anwendungen spielen Mischprozesse durch Einspritzen eines Fluids in ein anderes eine wichtige Rolle. So werden die verschiedensten Brennstoffe durch Einspritzen mit der für die Verbrennung notwendigen Luft gemischt. Hier ist eine optimale Mischung aus Brennstoff und Luft entscheidend für eine möglichst

rückstandsfreie Verbrennung. So ist es nicht weiter verwunderlich, dass Wissenschaftler aus den verschiedensten Richtungen sich mit diesem Phänomen beschäftigen. In der Luft- und Raumfahrttechnik werden Raketentriebwerke, in der Automobilindustrie wird das Befüllen von Verbrennungsmotoren mit Kraftstoff-Luftgemischen und im Heizungsanlagenbau das Einblasen von Gas und Öl in den Brennraum optimiert. Auch die chemische und pharmazeutische Industrie ist darauf angewiesen, dass ihre Reaktoren mit einem möglichst optimalen Gemisch der Ausgangssubstanzen befüllt werden, damit eine maximale Ausbeute bei einer möglichst geringen Verunreinigung der Produkte mit den Ausgangsstoffen erreicht wird.

In der grundlagenorientierten Forschung der Physik sucht man nach elementaren Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten, so auch bei der Untersuchung der auftretenden Phänomene beim Mischen. Hier werden also nicht eine spezielle Geometrie oder bestimmte Fluide untersucht, sondern man versucht möglichst allgemeine Aussagen zu treffen, um mit Fausts Worten nach „des Pudels Kern“ - oder, anders ausgedrückt, das Wesen eines Phänomens zu suchen. Sind gewisse Aussagen nicht in aller Allgemeinheit zutreffend, werden sie auf bestimmte Klassen von Systemen

Abb. 1: Der Aufbau des Messkopfs. Der untere Bildteil zeigt ein Foto, darüber ist eine Konstruktionsstudie des Sensors mit Vorverstärkerelektronik zu sehen. Oben rechts ist eine Elektronenmikroskopaufnahme der temperaturempfindlichen Region dargestellt. Diese besteht aus einem 200 nm dicken Draht und steht nur 300 nm über die isolierende Glaspipette hinaus.

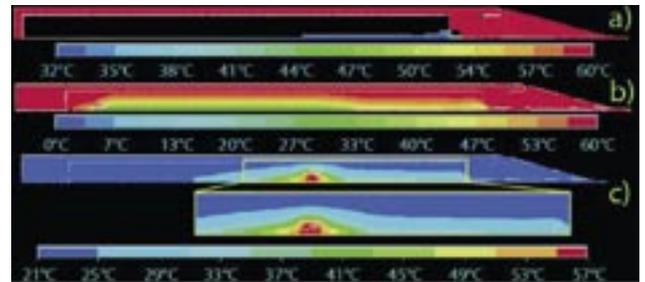


Abb. 2: Simulation der Temperaturverteilung im Messkopf mit Finite-Elemente-Methoden. Die verschiedenen Temperaturen erscheinen farblich kodiert. Teilbild a) zeigt die Verhältnisse ohne Berücksichtigung des Wärmetransports der Luft im Gehäuse mittels Konvektion, während in Teilbild b) dieser mitberücksichtigt ist. Die Erwärmung der elektronischen Bauteile, ebenfalls ein wichtiger Faktor, ist dargestellt in Teilbild c) durch den rötlichen Bereich in der Mitte des Gehäuses ohne anströmende Warmluft.

beschränkt. Für den Experimentator ergibt sich die Aufgabe, ein Modellexperiment, das dem Ideal einer möglichst allgemeinen Situation nahe kommt, zu konzipieren und umzusetzen, um daran Messungen durchführen zu können, die mit theoretischen Modellen verglichen werden können.

Der Ozeanriese in der Badewanne

Kommen wir auf die Kaffeetasche zurück, um den Begriff des Allgemeinen bzw. Universellen zu beleuchten. Wenn Sie, z.B. an einem Schnellimbiss, nur einen Einwegrührstäbchen zur Verfügung haben, werden Sie fast automatisch deutlich schneller den Kaffee umrühren als mit einem ordentlichen Löffel. D.h. will man einen ähnlichen Durchmischungseffekt erzielen, muss man bei einem kleinen Löffel schnell und bei einem großen Löffel langsam rühren. Mathematisch lässt sich dies durch das Produkt aus der charakteristischen Geschwindigkeit v und einer charakteristischen Länge L - der Breite des Löffels - beschreiben. Vertauschen wir den Kaffee mit zähflüssigem Honig, ist klar, dass wir wieder schneller als beim Kaffee rühren müssen, um einen ähnlichen Effekt zu erreichen. Die Größe, mit der man die Zähflüssigkeit eines Fluids erfasst, wird Viskosität genannt und mit dem griechischen Buchstaben ν (griechisch „nü“) abgekürzt. Um die Verhältnisse einer Strömung zu charakterisieren, wird in der Physik die so genannte Reynoldszahl $Re = v \cdot L / \nu$ benutzt. Mit ihrer Hilfe ist es nun möglich, unabhängig von Geschwindigkeit, charakteristischer Länge und der Viskosität des verwendeten Fluids eine Strömungssituation mit anderen

zu vergleichen. Auf diese Weise kann man z.B. die Strömungsverhältnisse, wie sie um einen Ozeanriesen herrschen, in einer Badewanne nachahmen, wenn man nur die Geschwindigkeit erhöht und/oder ein Fluid mit geringerer Viskosität verwendet. So sind die Vorgänge beim Mischen die gleichen - unabhängig von den beteiligten Fluiden - sofern man die Reynoldszahl betrachtet. Da es im Experiment relativ schwierig ist, Konzentrationen einer Substanz schnell und präzise zu erfassen, verwenden wir zur Messung der Mischungsverhältnisse die Temperatur des Fluids. Die Temperatur wird mit einem von uns entwickelten besonders kleinen und damit auch schnellen Thermometer elektronisch erfasst. Lassen Sie uns noch einige Dinge von Bedeutung bei der Messung einer Temperatur vergegenwärtigen. Das Thermometer sollte so klein wie möglich sein, da jeder Messprozess das zu messende Objekt beeinflusst. Dies wird bei der Temperaturmessung sofort offensichtlich, wenn man ein an einem kalten Ort gelagertes Fieberthermometer zur Temperaturmessung unter die Zunge nimmt. Wir empfinden das Thermometer als kalt, und es benötigt eine gewisse Zeit, bis es die Körpertemperatur angenommen hat. Bei diesem Vorgang entzieht das Thermometer dem Körper etwas Wärme, wodurch dieser ein wenig abkühlt. Natürlich ist diese Temperaturabnahme so gering, dass man sie bei der Bestimmung der Körpertemperatur vernachlässigen kann. Dies ist aber nicht mehr der Fall, wenn man mit diesem Thermometer die Temperatur des Wassers in einem Fingerhut genau messen

will. Grundsätzlich kann man sagen, dass das Thermometer - genauer gesagt seine Wärmekapazität - umso kleiner sein muss, je kleiner das Volumen des zu messenden Fluids ist und je genauer die Messung sein soll.

Ein filigranes Thermometer

Das von uns hergestellte Thermometer sitzt am Ende einer extrem spitzen Nadel, die ungefähr hundertmal dünner ist als ein menschliches Haar. Das eigentliche Thermometer wird durch die Kontaktfläche eines Platindrahts mit einer Goldschicht gebildet. Hergestellt wird dies aus einer Glaskapillare, in die zunächst ein Platin-Draht von vergleichbarer Dicke eines menschlichen Haars eingeschmolzen wird. Dann werden Draht und Glas mit einem Laser erhitzt und schnell auf den endgültigen Durchmesser dünn gezogen. Nun wird die Kapillare in einen kegelförmigen Deckel eines Gehäuses eingeklebt, welches die Verstärkerelektronik beherbergt. Um schließlich das Thermometer fertig zu stellen, wird zuletzt eine extrem dünne Goldschicht aufgedampft. Ein derart filigranes Thermometer besitzt ausreichend Stabilität, um in einer mehr als hundert Stundenkilometer schnellen Wasserströmung nicht beschädigt zu werden. Auch bei dem Design der Verstärkerelektronik sind einige Herausforderungen zu bewältigen. Da unser Thermometer nur sehr kleine Spannungen als Temperatursignal liefert, müssen diese enorm verstärkt werden. Dabei muss das jedem Verstärker innewohnende Rauschen so gering wie möglich gehalten werden, um

eine möglichst hohe Temperaturauflösung zu erreichen, die Präzisionsmessungen erst möglich macht.

In Abbildung 1 ist der eigentliche Messkopf mit dem in einer wasserdicht verschlossenen Hülse befindlichen Vorverstärker dargestellt. Der untere Bildteil zeigt eine Fotografie des Sensors mit Elektronik. Im mittleren Bildteil ist eine dreidimensionale Zeichnung zu sehen, wobei ein Viertel des Messkopfs herausgeschnitten ist. Im Inneren befindet sich die eingeklebte Glaskapillare, die einen wesentlichen Bestandteil des eigentlichen Sensors repräsentiert. Oben rechts in der Abbildung ist noch eine Elektronenmikroskopieaufnahme eingesetzt. Auf ihr ist deutlich ein Stück des eingeschmolzenen und dünn gezogenen Platindrahts zu erkennen, welches aus der Glaskapillare herausragt. Zu beachten ist, dass dieses Stück Draht nur einen Durchmesser von etwa 200 nm besitzt und damit ungefähr zweihundert Mal dünner als ein menschliches Haar ist. Dieses Drahtstück wird mit einer weiteren Goldschicht überdeckt und bestimmt somit die Größe der aktiven Sensoroberfläche.

Um sicherzustellen, dass das gesamte Messsystem einwandfrei arbeitet, und um zu erfahren, welche Genauigkeit, Ansprechgeschwindigkeit und Haltbarkeit mit ihm zu erreichen sind, wurden ausgiebige Tests sowie

numerische Simulationen durchgeführt. Als Beispiel ist in Abbildung 2 eine so genannte „Finite-Elemente-Analyse“ zu sehen, die den Einfluss z.B. der Wärmeleiteigenschaften der Luft im Inneren unseres Messkopfs oder die Erwärmung der elektronischen Bauteile im Inneren des Messkopfs untersucht. Die Herausforderung bei der Konzeption der Tests besteht darin, die Bedingungen bei der Messung deutlich besser einzustellen als die geforderte Messgenauigkeit des zu untersuchenden Sensors. Für jede Eigenschaft, die charakterisiert werden soll, ist ein eigener Messaufbau notwendig, der eine genaue Planung und Auslegung erfordert. So wurde z.B. die Ansprechgeschwindigkeit, die kürzer als eine Millionstel Sekunde ist, mit Hilfe einer Laseranregung vermessen, da es nur auf diese Weise möglich ist, einen sehr kurzen und möglichst definierten Heizpuls zu erzeugen.

Fliegende Wirbel im Experiment

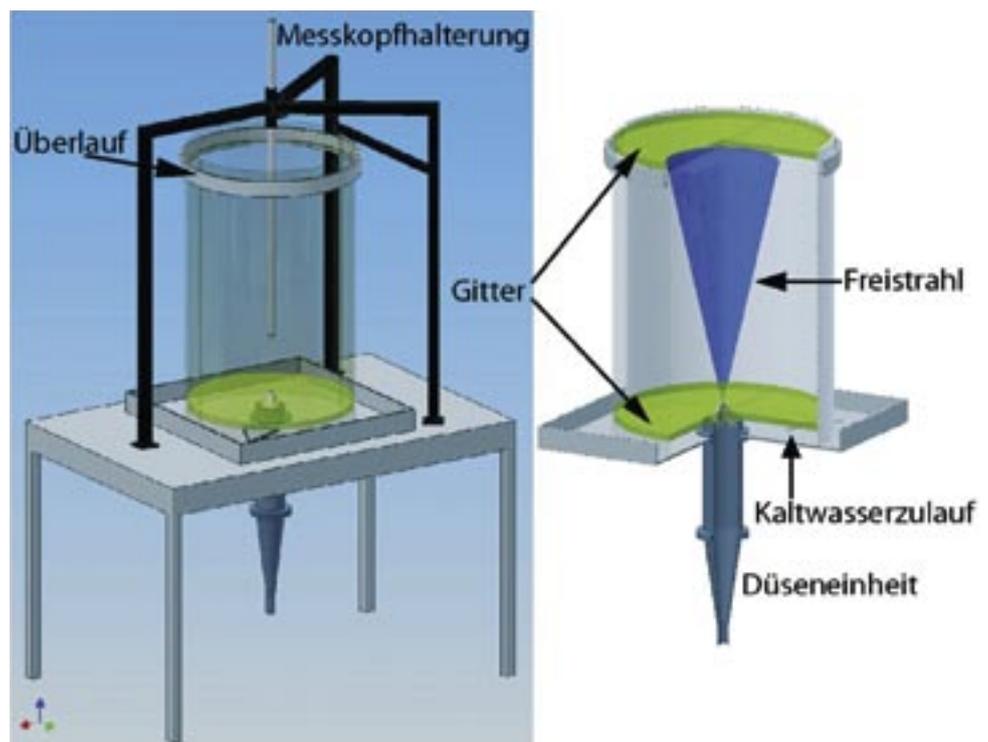
Wir wollen an dieser Stelle ein Experiment etwas genauer vorstellen. Es handelt sich um ein so genanntes Freistrahlexperiment, bei dem Verhältnisse herrschen, die der Situation bei einem Raketentriebwerk, einem Vulkanausbruch oder einem unterseeischen Geysir, einer heißen Quelle am Meeresgrund, nicht unähnlich sind.

Bei dem im Labor durchgeführten Experiment wird durch eine Düse mit einer 2 mm großen Öffnung warmes Wasser in einen zylindrischen Behälter mit kaltem Wasser gepresst. Die verwendete Düse ist so geformt, dass die Wasserströmung bis zu hohen Fließgeschwindigkeiten laminar, d.h. ohne Wirbel, aus der Düse austritt. Die sich ausbildenden Wirbel entstehen nur durch Scherkräfte zwischen dem mit hoher Geschwindigkeit eingespritzten warmen Wasser und dem stillstehenden kalten Wasser im Tank. Die verwirbelte Wasserzone nimmt annähernd die Form eines mit der Spitze nach unten stehenden Kegels an. Das Wasser strömt zur Oberfläche des Tanks und von dort über die gesamte Oberkante des Tanks ab. Um die Gefahr einer Rückströmung des warmen Wassers von der Oberfläche nach unten zur Düse hin zu reduzieren, wird neben dem warmen Wasser durch die Düse über den Boden gleichmäßig kaltes Wasser langsam zugeführt, das durch einen Schaumstoff laminarisiert wird (Abb. 3). Unser Sensor wird mittels eines Gestells am Ende einer Stange exakt über der Düse positioniert.

Mit dem Sensor messen wir, in welchem Maß die Temperatur in verschiedenen Entfernungen vom Düsenaustritt schwankt. Streicht nun ein Wirbel aus warmem und kaltem Wasser

Abb. 3: Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung eines angewärmten Wasserfreistrahls. In einen zylindrischen Wassertank wird von unten warmes Wasser durch eine speziell geformte Düse eingepresst. Es bildet sich ein so genannter Freistrahls von warmem Wasser aus, der sich in einem Tank mit kaltem Wasser ausbreitet. Damit sich bei einem längeren Betrieb des Experiments die Temperatur des nahezu ruhenden Wassers im Außenbereich nicht erhöht, wird zusätzlich am Boden kaltes Wasser flächig und laminar eingepresst.

Das Wasser verlässt den Tank über einen umlaufenden Überlauf an der Oberkante. Im Inneren des Freistrahls findet man eine nahezu ideale Form der Turbulenz vor.



Anzeige

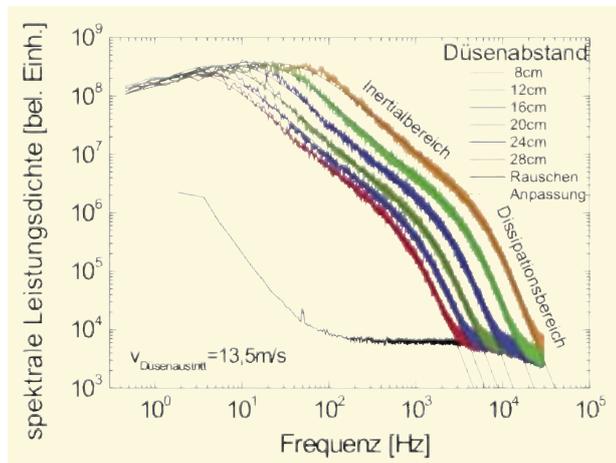


Abb. 4: Leistungsspektren: Hier wurde die spektrale Leistungsdichte für unterschiedliche Abstände zur Düsenaustrittsöffnung gemessen. Um sicherzustellen, dass der Sensor einwandfrei arbeitet, wurde eine Messung ohne angewärmten Strahl durchgeführt (im Bild mit Rauschen bezeichnet). Jede Kurve lässt sich durch einen stückweise linearen Zusammenhang in der obigen Darstellung mathematisch beschreiben (schwarze durchgezogene Linien).

über den Sensor, ändert sich die gemessene Temperatur. Nach der so genannten Taylor-Hypothese ist davon auszugehen, dass alle Wirbel durch die Strömung im Strahl an unserem Temperatursensor mit derselben Geschwindigkeit vorbeigetrieben werden. Aus der Sicht des Sensors fliegen die Wirbel an ihm vorbei, ähnlich der Situation, wenn man auf einer Klippe steht und der Wind die Nebelschwaden an einem vorbeitreibt. Aus der Geschwindigkeit der gemessenen Temperaturänderungen kann man auf die Wirbelgröße schließen. Als probates Mittel, sich einen Überblick über die unterschiedlichen Änderungsgeschwindigkeiten zu verschaffen, wird die spektrale Leistungsdichte verwendet. Bei der Darstellung dieser Größe werden langsame Änderungen (niedrige Frequenzen, z.B. tiefe Töne) links und schnelle Änderungen (hohe Frequenzen, z.B. hohe Töne) rechts aufgetragen. Wir finden in dieser Darstellung unsere großen Wirbel somit links und die kleinen Wirbel rechts wieder. Ist die Änderung stark, in unserem Fall: sind die Temperaturänderungen groß, so ergibt sich ein hoher Wert. Ein hoher Wert links bedeutet also einen großen, energiegeladenen Wirbel mit starken Temperaturänderungen.

In Abbildung 4 sind die Leistungsspektren aufgetragen, die bei unterschiedlichen Entfernungen zur Düsenaustrittsöffnung zentral über der Düse gemessen wurden. Es ist auffällig, dass sich für jedes Leistungsspektrum verschiedene Bereiche ergeben. Die Anregung des Wassers durch das Einpressen hat große Wirbel zur Folge, also kleine Frequenzen. Diese zerfallen in einem Kaskadenprozess zu immer kleineren Wirbeln, bis sie bei ganz kleinen Wirbeln

durch die innere Reibung des Wassers in Wärme umgewandelt werden. Der leicht abfallende Bereich etwa in der Bildmitte wird Inertialbereich genannt, da hier die Energie ohne größere Verluste zu kleineren Wirbeln hin transportiert wird. Der Bereich im rechten Bildteil weist einen steileren Abfall auf und wird Dissipationsbereich genannt, da hier die Energie der Wirbel in Wärme umgewandelt wird. Die Steigung im Inertialbereich entspricht der einer Strömung, die starken Scherkräften unterworfen ist: eine Situation, wie sie bei diesem Experiment vorliegt.

Die spektrale Leistungsdichte jedes einzelnen Abstands lässt sich durch eine horizontale Verschiebung mit jeder der anderen zur Deckung bringen. Dies folgt daraus, dass alle Experimente bei der gleichen Reynoldszahl durchgeführt wurden, da sich die Reynoldszahl durch die Veränderung des Abstands im Idealfall nicht ändert. Das lässt sich so verstehen: In dem Maße, wie sich der Strahl öffnet und damit die charakteristische Länge L größer wird, wird auch die Geschwindigkeit v kleiner, d.h. das Produkt der beiden, das letztlich die Reynoldszahl bestimmt, bleibt konstant. Die unterschiedlichen Steigungen in verschiedenen Bereichen lassen Rückschlüsse auf unterschiedliche Vorgänge in der turbulenten Strömung, die Einordnung in eine Klasse und somit Vergleiche mit theoretischen Modellen zu. So können Eigenschaften des Energieflusses betrachtet werden, um die Mechanismen zu verstehen, wie der Zerfall großer Wirbel in kleinere vor sich geht. Derartig hoch aufgelöste Messungen stellen somit einen wichtigen Beitrag zum Verständnis von Mischprozessen und der Feinstruktur von turbulenten Strö-

mungen dar. In naher Zukunft sollen auch Messungen in einem Großexperiment einer Konvektionsströmung durchgeführt werden, welches von der Technischen Universität Ilmenau betrieben wird.

Der hier beschriebene Sensor wurde dieses Jahr im Rahmen der Hannover Messe der Öffentlichkeit vorgestellt. Wir bedanken uns herzlich bei Holger Koch, dem Ingenieur der Arbeitsgruppe Energie- und Halbleiterforschung, der Arbeitsgruppe Hydrodynamik von Prof. Dr. Joachim Peinke, der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. André Thess, TU Ilmenau als Partner im Rahmen des virtuellen Instituts der Helmholtzgesellschaft „Thermische Konvektion“, und der Arbeitsgruppe Molekül- und Biophysik, hier im Besonderen bei Dirk Otteken, für die Mitwirkung an diesem Projekt.

Die Autoren



Priv.-Doz. Dr. Achim Kittel (li.) studierte an der Universität Tübingen Physik mit dem Schwerpunkt Festkörperphysik und Angewandte Physik. 1993 promovierte er dort über Halbleiterinstabilitäten. Nach einer Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bayreuth kam er 1997 an das Institut für Physik der Universität Oldenburg, von wo er für ein Jahr an die University of California at Berkeley wechselte, um dort an der Entwicklung eines Magnetokardiogrammsystems zu arbeiten. Im Herbst 1998 kehrte er nach Oldenburg zurück und habilitierte sich hier im Jahr 2001. Seine Forschungsschwerpunkte sind Halbleiterinstabilitäten, Sensorik, Rastersondenmikroskopie, Zeitserienanalyse, nichtlineare Dynamik und Stabilisieren von komplexen Systemen.

Dipl.-Physiker Marco Munzel (Mitte) studierte in Oldenburg und Hannover Physik. Seit Abschluss seiner Diplomarbeit über CuInSe_2 -Dünnschichtsolarzellen in Kooperation mit der Siemens Solar GmbH promoviert er im Bereich Hydrodynamik über Temperatursensorik in turbulenten Strömungen.

Jens Nawitzki (re.) studiert seit 1999 an der Universität Oldenburg Physik, wo er im Rahmen seiner Studienarbeit Finite-Elemente-Rechnungen durchgeführt hat.