

Frühjahr 2020



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Impressum

### Herausgeberin

Die Präsidentin  
der TU Darmstadt

### Redaktion Stabsstelle

Kommunikation und Medien  
der TU Darmstadt:

Jörg Feuck (Leitung, Vi.S.d.P.)

**Gestaltung** Ulrike Albrecht

**Bildredaktion** Patrick Bal

### Titel Nahaufnahme der

Versuchszelle im Experimental  
Container; Bild: Airbus Defence  
and Space

### Druck Druckerei Petzold GmbH,

Darmstadt  
gedruckt auf 100 g/m<sup>2</sup>  
PlanoScript, FSC-zertifiziert

Auflage 5.000

Nächste Ausgabe 15. Juni 2020

### Leserservice

[presse@tu-darmstadt.de](mailto:presse@tu-darmstadt.de)

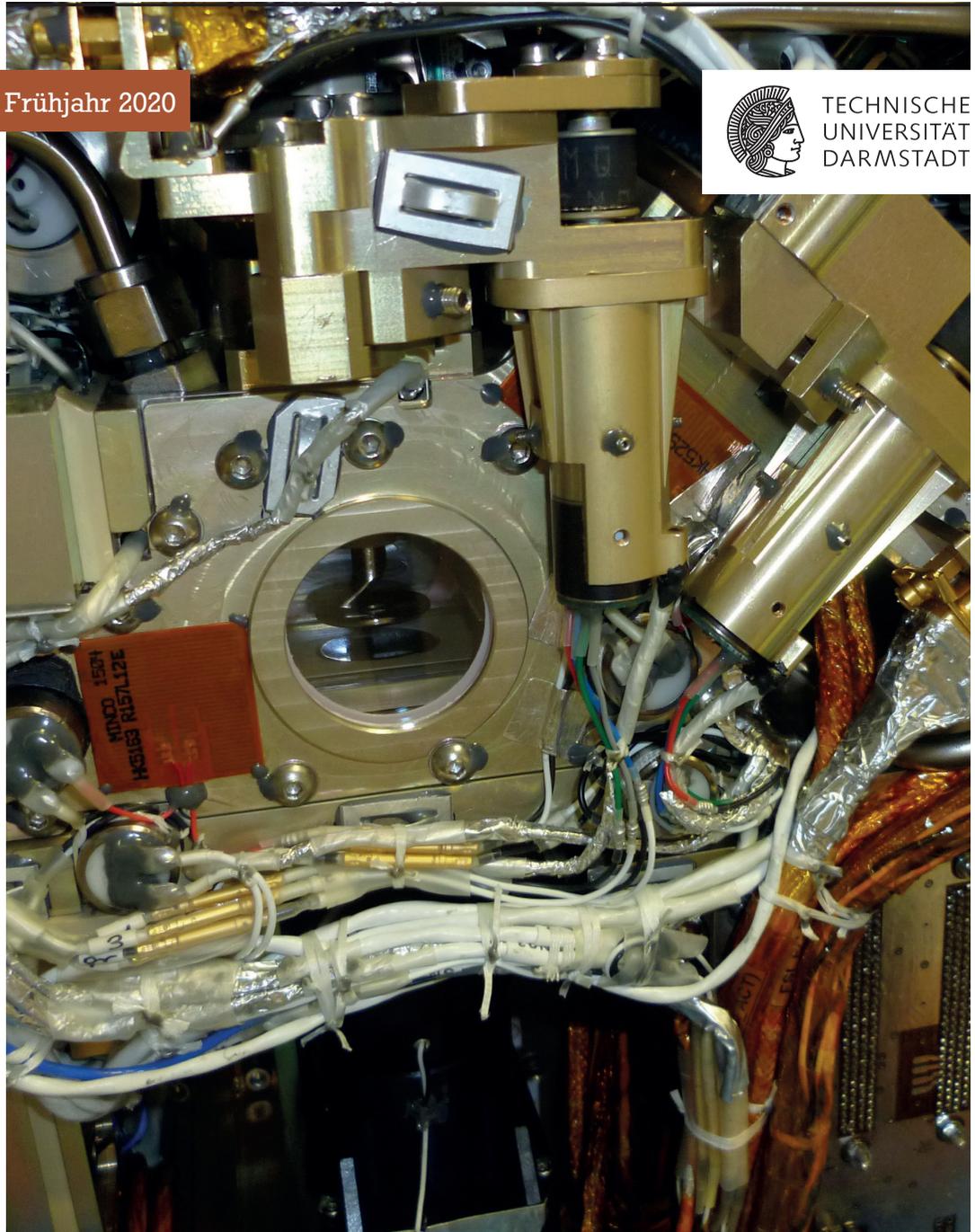
### Newsletter-Anmeldung

[www.tu-darmstadt.de/newsletter](http://www.tu-darmstadt.de/newsletter)

### ISSN

2196-1506

Möchten Sie die nächste Ausgabe der hoch<sup>3</sup>FORSCHEN gerne in digitaler Form erhalten? Dann senden Sie bitte eine E-Mail an [presse@tu-darmstadt.de](mailto:presse@tu-darmstadt.de)



- **1 Materialwissenschaften:** Speicherbausteine für die nächsten Computergenerationen
- **2 Informatik:** Schutz vor verdeckten Angriffen über Seitenkanäle
- **3 Technische Thermodynamik:** Datenströme aus dem Weltraum

# Pokerface für den Computer

*Spektakuläre Fälle wie die in Prozessoren entdeckten Sicherheitslücken fordern die Wissenschaft heraus: Informatik-Professor Heiko Mantel und sein Team forschen zur Problematik von schwer nachweisbaren Angriffen über sogenannte Seitenkanäle.*



Abbildung: Katrin Binner

Alexandra Weber, Dr. Damien Marion und Professor Heiko Mantel (v.l.n.r.) forschen zu Seitenkanälen.

— Von Ann-Kathrin Braun

„Ein schlechtes Pokerface ist auch eine Art Seitenkanal“, sagt Professor Heiko Mantel, um sein Forschungsgebiet der „Seitenkanäle“ zu erläutern. Beim Kartenspiel können die Mimik oder andere Verhaltensweisen den Mitspielenden einiges über die Qualität der Karten verraten. In der Informatik nutzen sogenannte Seitenkanalangriffe bestimmte Kanäle aus, auf denen geheime Informationen übertragen werden, die aber nicht für diesen Zweck gedacht waren.

**Die Sicherheit von** vertraulichen Daten hängt nicht nur von Sicherheitsmechanismen wie Kryptographie oder Zugriffskontrolle ab, sondern auch von der Kontrolle über den Informationsfluss, das heißt wo und wie Informationen während einer Programmausführung fließen. Informationsflusskontrolle verbietet den Zugriff auf geheime Informationen nicht als Ganzes, sondern schränkt nur ein, wozu sie verwendet werden können. Informationsflusssicherheit begleitet Heiko Mantel schon seit seiner Dissertation und auf seinem Weg als Informatikprofessor, zum Beispiel war es der Themenschwerpunkt im von ihm geleiteten Schwerpunktprogramm „Reliably Secure Software Systems“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Seine Arbeiten im Sonderforschungsbereich CROSSING der TU Darmstadt bauen hierauf auf.

**Die Komplexität von** IT-Systemen hat durch die rasante Weiterentwicklung seit deren Erfindung stark zugenommen. „Eine große Errungenschaft der Informatik ist es, Systeme in Abstraktionsschichten

zu teilen und damit komplexe Systeme beherrschbar zu machen“, sagt Mantel. Dieses Vorgehen ist für die meisten Anwendungen essentiell – schließlich können beispielsweise Softwareentwicklerinnen und -entwickler beim Programmieren nicht alle Details der Hardware- und Betriebssysteme berücksichtigen. In der Sicherheitsforschung sei es aber „ein Einfallstor für Seitenkanäle“, nur eine Ebene zu betrachten, denn der Geheimnisverrat muss nicht innerhalb der Ebene des Softwareprogramms stattfinden. „Seitenkanäle halten sich nicht an Abstraktionen“, betont der Informatiker.

**Beim Poker wird** der Seitenkanal „Mimik“, also das schlechte Pokerface, ausgenutzt. Seitenkanäle in der Informatik können über verschiedene physikalische Eigenschaften wie zum Beispiel Wärmeentwicklung, Berechnungszeit, elektromagnetische Wellen, Töne oder den Stromverbrauch geheime Informationen quasi unfreiwillig preisgeben. Die Forschung von Mantels Gruppe konzentriert sich auf Seitenkanalangriffe, die keinen physikalischen Zugriff benötigen, das heißt software-basierte Seitenkanäle.

Um diese identifizieren zu können, gibt es mehrere Ansätze, die die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Sonderforschungsbereich CROSSING anwenden.

**Zum einen nutzen sie** formale Methoden: Das sind mathematisch fundierte Ansätze, um die Funktionsweise eines Programms durch ein Modell verständlich und analysierbar zu machen. „Normale“ Sprache wäre für die Entwicklung von Modellen nicht geeignet, sie ist mehrdeutig und kann von verschiedenen Personen auf verschiedene Weisen interpretiert werden.

**In diesem Bereich** der Forschung zu Seitenkanälen geht es darum, eine obere Schranke für das Ausmaß des Geheimnisverrats zu finden. Daran arbeitet Doktorandin Alexandra Weber in Mantels Gruppe. „Im

*„Die Frage ist nicht, ob das System sicher ist, sondern wie sicher ist es?“*

## Informationen

### Computer Science

Prof. Dr.-Ing. Heiko Mantel

Telefon: 06151/16-25252

E-Mail: mantel@cs.tu-darmstadt.de

<http://www.mais.informatik.tu-darmstadt.de>

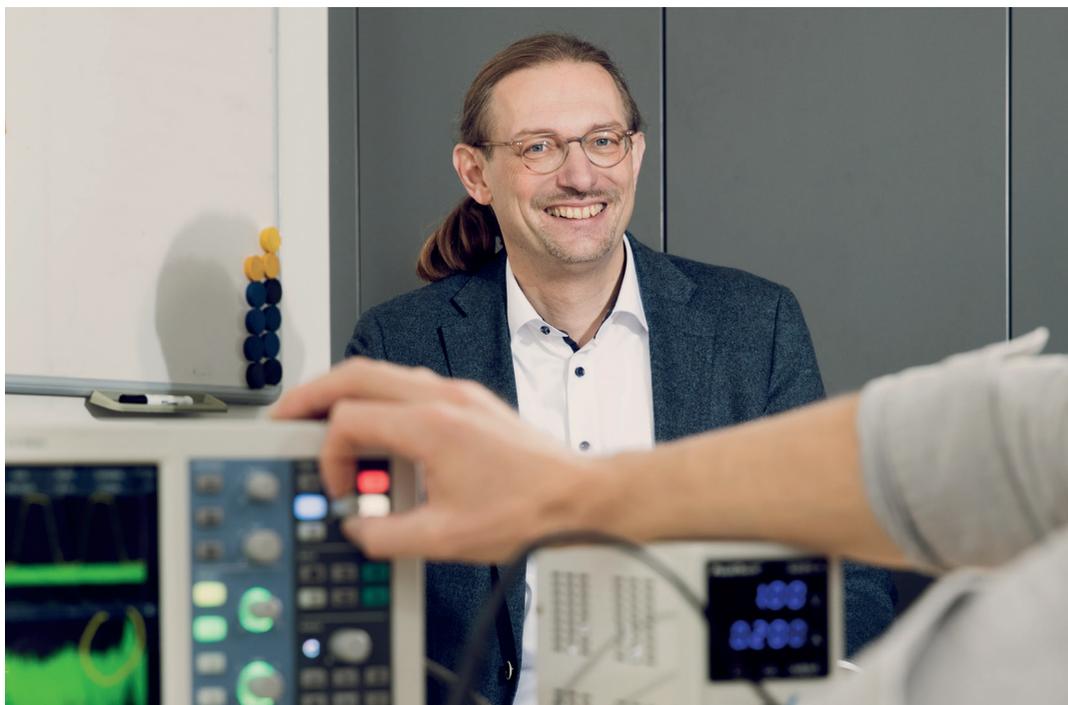


Abbildung: Katrin Binner

Mit dem Oszilloskop kann man den Stromverbrauch von Hardwarekomponenten messen und diese Information für Seitenkanalangriffe ausnutzen.

worst case fließt die Menge X an Informationen“, so die Nachwuchswissenschaftlerin. „Solche Garantien durch meine Forschung bestimmen zu können, finde ich sehr motivierend.“ Ist der kryptographische Schlüssel beispielsweise 256 Bit lang, kann mit formalen Methoden berechnet werden, wie viele Bit davon ein Angreifer höchstens über den Seitenkanal erbeuten kann. „Das mathematische Modell bildet dabei ab, wo Informationen fließen dürfen, was das Geheimnis ist und was der Angreifer „sehen“ kann“, so Weber. Ziel der Forschung in CROSSING sei es, Werkzeuge zum Automatisieren der Untersuchung auf Seitenkanäle zu finden.

**Zumindest bereits teilautomatisiert** wurden die Schwachstellen in einer sehr erfolgreichen interdisziplinären Kooperation zwischen der Forschungsgruppe von Professor Mantel und dem Team von „q-TESLA“ gefunden. q-TESLA ist ein im Sonderforschungsbereich CROSSING entwickeltes Post-Quantum-Signaturverfahren, das zum weltweit ersten Standardisierungsprozess in diesem Bereich eingereicht wurde. In der Implementierung der Vorgängerversion konnten die Teams einen Cache-Seitenkanal in der Funktion, die die Signatur berechnet, aufzufindig machen. Durch das Beheben dieser Schwachstelle wurde die Sicherheit des Signaturverfahrens verbessert, was auch die Chancen im Standardisierungsprozess erhöhen könnte.

**Im Sonderforschungsbereich** CROSSING gibt es noch einen zweiten Ansatz, um die Gefahren durch Seitenkanäle zu bewerten. Die Forscherinnen und Forscher identifizieren mit einem angriffsorientierten Vorgehen – quasi aus Sicht eines Angreifers – experimentell potenzielle Seitenkanäle. Dabei wollen sie herausfinden, welche Informationen über das

Geheimnis ein Angreifer mindestens erhält. Es kann also bestimmt werden, wie riskant die Möglichkeit des Geheimnisverrats auf jeden Fall ist. „Der angriffsorientierte Ansatz macht es möglich, eine sogenannte untere Schranke zu finden“, so Mantel. Liegen obere und untere Schranke nahe beisammen, bestätigte das die Genauigkeit der Berechnungen. Die Sicherheit eines Systems wird so nicht absolut – also null oder eins – bewertet, sondern erfolgt in Abstufungen. Das macht es möglich, auch für ein potenziell unsicheres System Sicherheitsgarantien geben zu können. „Die Frage ist also nicht, ob das System sicher ist, sondern wie sicher ist es?“, fasst Mantel zusammen.

**Heiko Mantel sieht Seitenkanäle** als wissenschaftlich interessantes Forschungsgebiet, das in der Praxis immer mehr an Bedeutung gewinnt: „Mit Spectre und Meltdown gab es in letzter Zeit gleich zwei medial prominente Angriffe, die Seitenkanäle ausnutzen.“ Seitenkanalangriffe sind forensisch sehr schwer nachzuweisen, auch deswegen brauche es weitere Forschung auf dem Gebiet, meint der Informatikprofessor. Denn während man beim Pokerspielen nach ausreichendem Geldverlust merkt, dass etwas nicht gut läuft und man etwas ändern oder aufhören sollte, so Mantel, „erhält man bei Seitenkanalattacken diese hilfreiche Rückmeldung leider nicht. Die Geheimnisse werden preisgegeben, man bemerkt das aber nicht. Erst wenn auffällt, dass jemand die Geheimnisse kennt, hat man kaum Chancen für Rückschlüsse, wann, wo und wie die Weitergabe erfolgt sein könnte.“ Deswegen wird in Darmstadt weiter daran gearbeitet, dass der Computer ein gutes Pokerface hat.

*Die Autorin ist Online-Journalistin und Mitarbeiterin im Profilbereich CYSEC.*

#### CROSSING

Im Sonderforschungsbereich CROSSING an der TU Darmstadt arbeiten mehr als 65 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus Kryptographie, Quantenphysik, Systemsicherheit und Softwaretechnik zusammen und betreiben sowohl Grundlagen- als auch anwendungsorientierte Forschung. Ziel ist es, Sicherheitslösungen zu entwickeln, die auch in der Zukunft sichere und vertrauenswürdige IT-Systeme ermöglichen. CROSSING wird seit 2014 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. [www.crossing.tu-darmstadt.de](http://www.crossing.tu-darmstadt.de)

# Schwerelos forschen

*Im Weltall läuft vieles in Zeitlupe. Das machen sich Forschende der TU Darmstadt zunutze. Ihr Ziel: Sie wollen dem physikalischen Prozess des Siedens genauer auf den Grund gehen.*

— Von Jutta Witte

Cape Canaveral, 25. Juli 2019: Um 18:01 Uhr Ortszeit startet eine Falcon-9-Rakete mit einer Dragon-Raumsonde in Richtung Internationale Raumstation (ISS). An Bord hat sie neben einigen NASA-Versuchen auch das Siedeeperiment Rubi (Reference mUltiscale Boiling Investigation). Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des Instituts für Technische Thermodynamik (TTD) an der TU Darmstadt haben es unter dem Dach der Europäischen Weltraumagentur ESA und gemeinsam mit internationalen Partnern entwickelt und für seinen Einsatz im All auf die Größe eines Schuhkartons verkleinert. Seit sechs Monaten sendet Rubi erfolgreich seine Messdaten auf die Erde. Sie sollen Aufschluss darüber geben, welche physikalischen Prozesse das Sieden, genauer gesagt den Phasenübergang, in dem eine Flüssigkeit zu Dampf wird, auf welche Weise beeinflussen.

**Fast alle Menschen** dürften das Phänomen aus der Küche kennen: Wenn der Wasserkocher das Teewasser erhitzt, beginnt es zunächst zu sieden: Am Boden bilden sich einzelne und dann immer mehr mit Dampf gefüllte Blasen, die aufsteigen, bis das Wasser bei 100 Grad Celsius überall kocht und, wenn man den Wasserkocher nicht abschaltet, vollständig verdampft. Der Siedeprozess bietet den Vorteil, dass er sowohl die flüssige als auch die gasförmige Phase eines Fluides nutzt und dass bei diesem Phasenübergang sehr viel Energie übertragen wird. „Für die Übertragung von Energie in Form von Wärme

ist das Sieden eines der effizientesten Verfahren überhaupt“, erklärt Axel Sielaff, Wissenschaftler am TTD. Eingesetzt wird es zum Beispiel, um Hochleistungselektronik zu kühlen. Auf Basis der Rubi-Messungen wollen Sielaff und sein Team nun präzisere Modelle für den Prozess der Wärmeübertragung entwickeln.

**Sie forschen an** der Schnittstelle zwischen Maschinenbau und Physik und sind spezialisiert auf alles, was mit Sieden und Verdampfen zu tun hat. Im Moment richtet sich ihr Fokus vor allem auf die Dampfblasen. „Wir wollen lernen, die physikalischen Phänomene rund um die Bildung der Dampfblasen genauer zu verstehen als das bislang mög-

lich ist“, sagt der Experte. Sielaff fährt den PC in seinem Büro auf dem Campus Lichtwiese hoch und sucht aus vielen kryptischen Dateien einen bestimmten Versuch heraus. Auf dem Bildschirm startet ein Film in schwarz-weiß. Gestochen scharf ist zu sehen, wie auf einer erhitzten Oberfläche eine „Bubble“ kontrolliert „gezündet“ wird, langsam wächst und stehen bleibt.

**Was für den Laien** nur eine faszinierende Aufnahme ist, bietet den Expertinnen und Experten

für Thermodynamik wertvolle Detailinformationen. Aus den physikalischen Messdaten der Siederversuche können sie unter anderem analysieren, wieviel Wärme an einem bestimmten Punkt der Heizoberfläche übertragen werden kann, wieviel Energie aufgewandt werden muss, um eine Blase überhaupt erst entstehen zu lassen, wie sich die Temperatur

*„Unsere Grundlagenforschung zielt auf die Entwicklung von Produkten, die nicht nur kompakter und sicherer werden, sondern vor allem auch effizienter.“*

## Informationen

Institut für Technische  
Thermodynamik  
Dr. Axel Sielaff  
Telefon: 06151/16-22272  
E-Mail:  
sielaff@ttd.tu-darmstadt.de  
www.ttd.tu-darmstadt.de

Robin Behle und Dr. Axel Sielaff führen im Labor des Instituts TTD an einer baugleichen Versuchszelle mittels Particle Image Velocimetry Untersuchungen zum Strömungsfeld durch. Dazu wird hier – im Gegensatz zu den Untersuchungen auf der ISS – die Flüssigkeit mit kleinen Partikeln versetzt und mit einem leistungsstarken Laser beleuchtet. Daraus können die Strömungen in der Versuchszelle zeitlich und örtlich hoch aufgelöst analysiert werden.

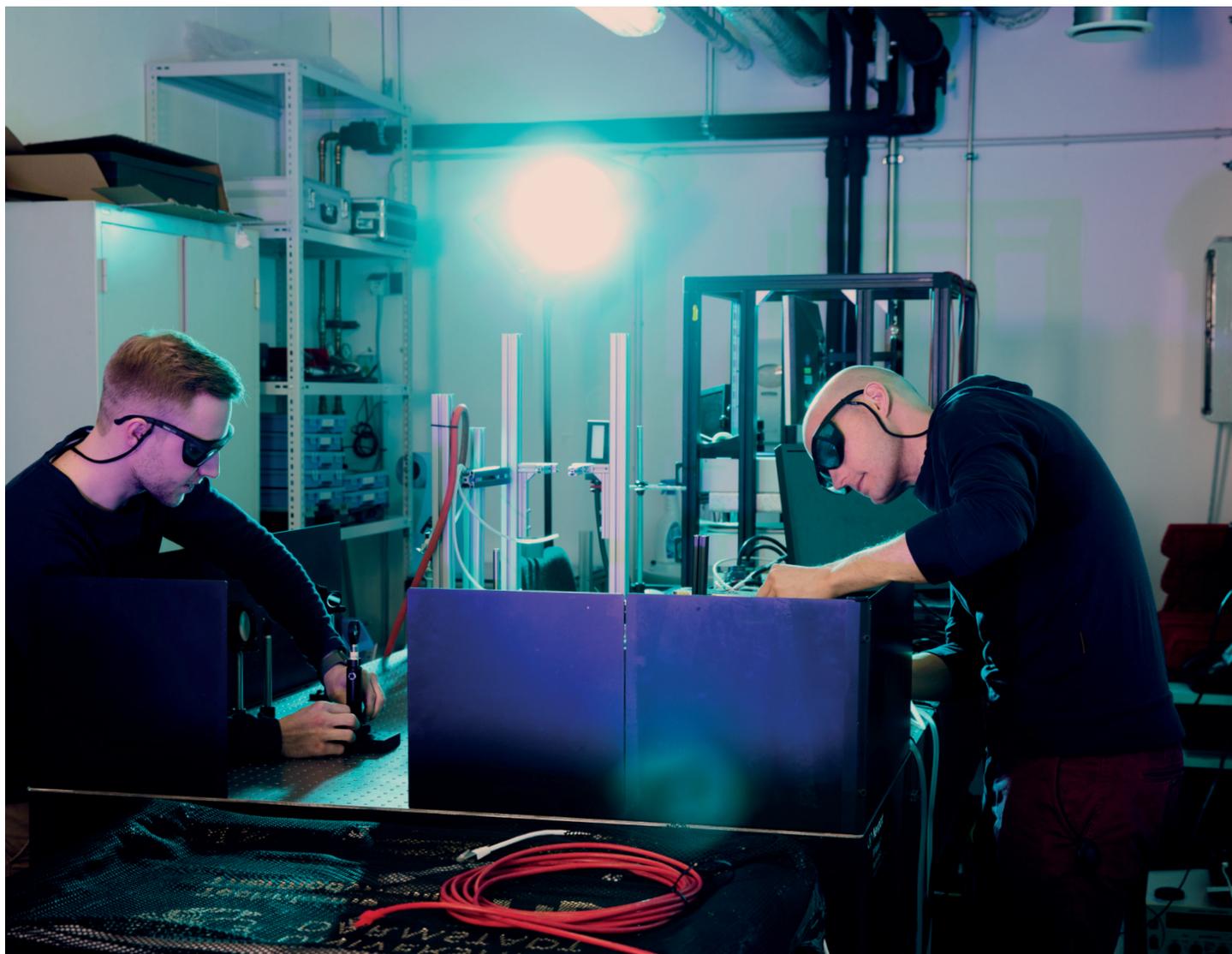


Abbildung: Katrin Binner

in der Flüssigkeit entwickelt und welchen Einfluss die unterschiedlichen Kombinationen der eingestellten Parameter auf die Geometrie der Blasen und die insgesamt übertragene Wärmemenge haben.

**Es sind Experimente**, die in dieser Präzision nur in der Schwerelosigkeit möglich sind. Denn was auf der Erde blitzschnell passiert, läuft in der Raumstation in Zeitlupe ab. So entstehen Dampfblasen im häuslichen Wasserkocher oder im Forschungslabor auf der Erde an einer einzelnen Siedestelle mit einer Frequenz von etwa 100 pro Sekunde. Im All, sagt Sielaff, gehe dieser Wert im Optimalfall gegen Null und es bleibe sehr viel Zeit, um jede einzelne Dampfblase in ihrer gesamten Entwicklung, aus allen möglichen Perspektiven und unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen zu beobachten. Hinzu kommt: Dampfblasen sind auf

der Erde winzig. Unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit können sie einen Durchmesser von bis zu zehn Millimetern erreichen.

**Ein Experiment** wie Rubi tauglich für den Einsatz auf der ISS zu machen und dort zuverlässig zu fahren, ist keine Selbstverständlichkeit. Während das Interview mit dem Wissenschaftler läuft, wird im Belgian User Support and Operations Centre (B-USOC), das Rubi von der Erde aus steuert und überwacht, gerade ein technisches Problem behoben. Doch Sielaff bleibt gelassen. Immerhin 550 von 850 geplanten Versuchen sind zu diesem Zeitpunkt schon erfolgreich gelaufen. Das ist für sich schon ein Triumph. Hat ein solches Experiment die Erde erst einmal verlassen, können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht mehr direkt in die Versuche eingreifen. Auch Rubi wurde

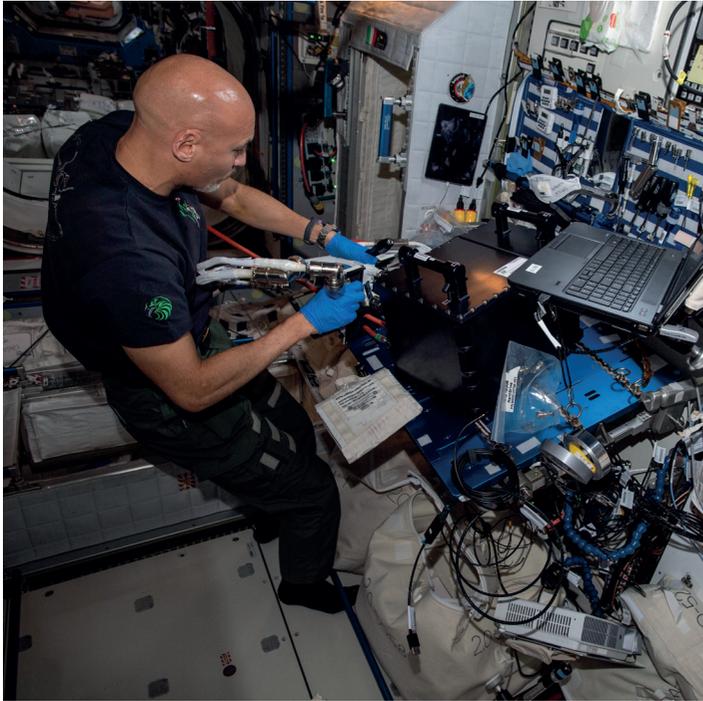


Abbildung: ESA / NASA

Luca Parmitano installiert das RUBI Experiment an Bord der Internationalen Raumstation.



Abbildung: Airbus Defence and Space

Das Team von Airbus, welches das Experiment gebaut hat, freut sich über die erfolgreiche Fertigstellung.

nach dem erfolgreichen Andocken der Raumsonde an die ISS von ESA-Astronaut Luca Parmitano im europäischen Forschungsmodul Columbus noch per Hand angeschlossen. Danach haben die Experten und Expertinnen der B-USOC die Fernsteuerung übernommen.

„Das schwierigste Problem bei Anwendungen im Weltall ist: Sie können den Entfall der Schwerkraft auf der Erde nicht testen.“ Deswegen optimieren Sielaff und sein Team ihr Experiment zusätzlich auf Parabelflügen. Um Schwerelosigkeit zu erreichen, ohne gleich ins All zu fliegen, wird auf einem solchen Flug mit einem speziell ausgestatteten Airbus abwechselnd die Schwerkraft verdoppelt und ganz ausgeschaltet – ein anstrengendes „Workout“, dem sich die Forschergruppe einmal pro Jahr von Bordeaux aus über dem Atlantik oder Mittelmeer aussetzt. Die Versuchsparameter sind hier zwar größeren Schwankungen als auf der ISS ausgesetzt. Aber die Forschenden können sie direkt vor Ort beeinflussen, unterschiedliche Fluide testen oder auch die untersuchten Parameter zeitnah wechseln.

Die im Zuge der Parabelflüge entstandenen Messdaten sollen mit denen, die auf der der ISS entstehen, verglichen werden. 15 bis 16 Terrabyte Daten, darunter rund 15 Millionen Bilder, sind nach Sielaffs

Schätzungen seit Beginn der Messungen allein aus dem Rubi-Experiment von der Raumstation auf die Erde gesendet worden – über Satelliten zunächst an die für das Columbus-Modul zuständige Bodenstation in Oberpfaffenhofen und von dort aus an die für Rubi zuständige B-USOC, die das auf seinem Weg durch das All zerlegte Datenmaterial wieder zu einer Datei zusammen führt und schließlich zur Auswertung an die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des Rubi-Kernteam in Darmstadt, Pisa und Toulouse schickt.

Jetzt, nachdem die Messungen beendet sind, beginnt die Auswertungsphase. Die Ergebnisse könnten wegweisend sein, nicht nur für eine umweltschonendere Kühlung und Beheizung von Geräten und Anlagen auf der Erde, zum Beispiel Computern, Rechenzentren, Klimaanlage, Batterien oder Kraftwerken, sondern auch für die Optimierung der Wärmeregulierungssysteme von Satelliten oder Raumfahrzeugen, sagt Axel Sielaff. „Mit unserer Grundlagenforschung wollen wir die Basis legen für die Entwicklung von Produkten, die nicht nur kompakter und sicherer werden, sondern vor allem auch effizienter.“

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Historikerin.



Abbildung: Airbus Defence and Space

Bevor das Experiment auf die ISS darf, wird es in einer Nachbildung des Fluid Science Laboratory bei der B-USOC in Brüssel getestet. Ein baugleiches Experiment verbleibt dort für Vergleichsuntersuchungen.

### Das Experiment

Das Siedeexperiment Rubi (Reference mULTiscale Boiling Investigation) ist Teil des Fluid Science Laboratory (FSL) im europäischen ISS-Forschungsmodul Columbus. Ein in Darmstadt entwickelter und gebauter Heizer erhitzt ein Kältemittel. Ein Laser zündet einzelne Blasen an einem definierten Ort. Eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst die gesamte Entwicklung dieser Blasen, eine Infrarotkamera misst die Temperatur der erhitzten Region. Rubi beinhaltet außerdem eine Pumpe, die eine Scherströmung erzeugt, also das Fluid kontinuierlich von einer Seite über die beheizte Oberfläche fließen lässt. Mittels einer Elektrode kann im Versuchsraum auch eine Hochspannung erzeugt werden, um den Einfluss eines elektrischen Feldes auf die Blasenentwicklung zu untersuchen. Die Versuche werden auf der ISS gespeichert, können aber auch von der Erde aus live verfolgt werden.

### Das Konsortium

Unter Koordination von Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Leiter des Instituts für Technische Thermodynamik (TTD) an der TU Darmstadt, beteiligen sich 14 Universitäten und Forschungsinstitutionen aus Europa, Russland, Japan und den USA an Rubi, darunter das Department of Energy, Process and System Engineering der Universität PISA, das Institut de Mécanique des Fluides von Toulouse (IMFT) und die Multiphase Dynamics Group der Aristoteles Universität von Thessaloniki. Das Experiment wird finanziert von der European Space Agency (ESA), wurde gemeinsam mit Airbus Defence & Space entwickelt und wird gesteuert vom Belgian User Support and Operations Centre (B-USOC). Um die im Zuge von Rubi entwickelten Auswertemethoden zu bündeln und gemeinsam zu optimieren hat das TTD das Programm Code exchAnge for Rubi Analysis Tools (CARAT) initiiert, auf das alle Forschungspartner Zugriff haben. Rubi ist an der TU Darmstadt angesiedelt im Profildbereich Thermo-Fluids & Interfaces.

# Wegweiser für winzige Blitze

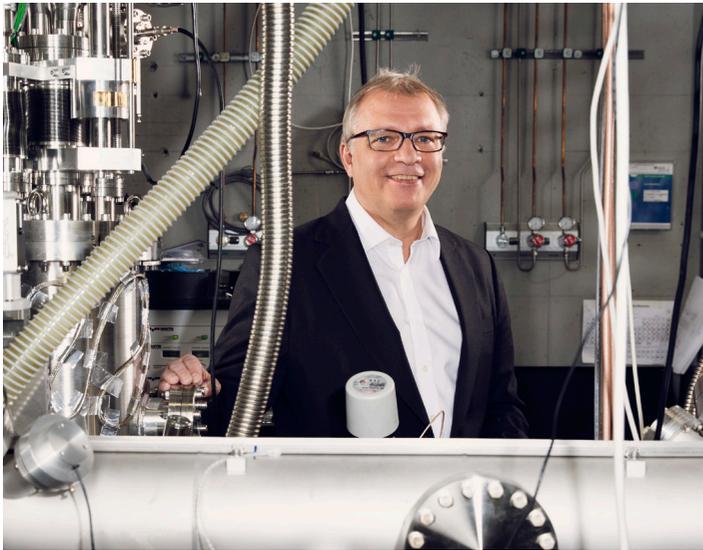


Abbildung: Katrin Birner

Der Materialwissenschaftler Professor Lambert Alff forscht und lehrt im Fachgebiet Dünne Schichten.

## Darmstädter Forscher entwickeln Speicherbausteine für eine neue Art von Chips.

— Von Christian J. Meier

Lambert Alff bündigt Blitze, wenn auch nur mikroskopisch kleine. Mithilfe der Entladungen will der Professor Speicherbausteine für Computer herstellen, die gleichzeitig rechnen können. „Das ist die nächste Revolution in der Computertechnik“, sagt Alff. Mit seinem Team aus dem Fachbereich Material- und Geowissenschaften der TU Darmstadt hat er jüngst einen wichtigen Beitrag dazu geleistet und publiziert, zusammen mit der Gruppe um Dr. Leopoldo Molina-Luna, der wenige Türen weiter forscht.

**Welche Umwälzung** meint der Materialwissenschaftler? Das „Internet der Dinge“ wird konkreter. Immer mehr Alltagsgegenstände enthalten kleine Computer. Heute senden die smarten Sachen die Daten oft in die Cloud, wo sie verarbeitet werden. Der Transfer kostet Energie. Die Prozessoren müssen zudem ständig mit Energie versorgt werden, weil sie sonst die Daten verlieren. „In

zwanzig Jahren wird allein die IT so viel Energie brauchen wie heute die ganze Welt, wenn wir nichts Neues entwickeln“, warnt Alff.

**Von diesem Neuen** hat Alff eine klare Vision: Nicht-flüchtige Speicherbausteine, die gleichzeitig

rechnen können. Nach dem Ausschalten würde der Chip den aktuellen Stand speichern, wie ein gestoppter Film, und weiterarbeiten, sobald die Spannung wieder da ist. „Damit könnte eine Smartwatch die Daten vom Jogging aufzeichnen und auch selbst verarbeiten“, sagt Alff. Von vorne herein haben die Darmstädter Forscher die spätere Anwendbarkeit im Blick. Daher entwickeln sie ihre Bauteile auf Basis von Hafniumoxid, einem Material, das schon heute bei der Chipherstellung eingesetzt wird. Das Team verwendet winzige Kristalle davon, kleiner als ein Virus. Diese leiten keinen Strom. Legt man aber eine zunehmende Spannung an sie, kommt es irgendwann zu einem Durchschlag: Im Kristall öffnet sich ein Kanal, durch den nun elektrische Ladung fließen kann. Die Röhre lässt sich wieder schließen. Das Element verhält sich also wie ein Schalter, der seinen Zustand ohne Stromversorgung speichert. Genau, was man will.

**Bislang aber schalteten** die einzelnen Bauteile bei verschiedenen Spannungen, eignen sich also nicht für die Elektronik-Praxis. „Wir zeigen nun auf, wie man weniger Variabilität von Bauteil zu Bauteil erreichen kann“, sagt Alff. Den Erfolg verdanke er der Kooperation mit Molina-Luna, sagt Alff. „Ich bin glücklich, dass wir hier in Darmstadt zwei Teams haben, die sich in dieser Forschung so gut ergänzen.“ Die Gruppe um Molina-Luna untersuchte die Bauteile von Alffs Team mit einem Elektronenmikroskop. Damit erkannten die Forscher die wichtige Rolle so genannter Korngrenzen. Das Bauteil setzt sich aus mehreren winzigen Kristallkörnern zusammen, wie ein 3-D-Mosaik. Die Entladungen laufen entlang der Grenzflächen zwischen den Körnchen. Normalerweise zeigt das „Mosaik“ wenig Ordnung. Die Forscher schieden Hafniumoxid-Schichten auf einer Elektrode ab, deren Kristallgitter eine gewisse Ausrichtung aufwies. Die Korngrenzen im Hafniumoxid übernahmen diese und verliefen viel geordneter, insbesondere auf kürzestem Weg zwischen den Schaltkontakten. So ist den Blitzen ein klarer Weg vorgegeben. Die Schaltspannung schwankt viel weniger.

**Im nächsten Schritt** wollen die Gruppen exakt die Stelle bestimmen, an der eine Korngrenze wächst, um die Variabilität weiter zu senken. „Dazu wollen wir die Grundplatte, auf der der Kristall wächst, mit einer Struktur versehen“, sagt Alff. Das könnte ein winziger Grat sein, entlang dem sich die Körnchen ausrichten. Wenn sich Alff und Molina-Luna die Bälle wieder so gut zuspielen, wird es sicher gelingen.

*Der Autor ist Wissenschaftsjournalist und promovierter Physiker.*

### Informationen

#### Teilfachbereich

#### Materialwissenschaft

Prof. Dr. Lambert Alff

Telefon: 06151/16-20700

E-Mail:

[lambert.alf@tu-darmstadt.de](mailto:lambert.alf@tu-darmstadt.de)

[www.mawi.tu-darmstadt.de/ds](http://www.mawi.tu-darmstadt.de/ds)

### Publikation:

Stefan Petzold, et al: *Forming-Free Grain Boundary Engineered Hafnium Oxide Resistive Random Access Memory Devices*, Adv. Electron. Mater. 2019, 5, 1900484.

<https://doi.org/10.1002/aelm.201900484>

Auf Youtube stellt Lambert Alff seine Arbeit vor:

<https://www.youtube.com/watch?v=us8pjhG8ve0>