

# Ausgewählte Vorträge der GDNÄ-200-Jahrfeier in Leipzig 2022

## NOBEL-VORTRAG

### „Eine 40-jährige Reise zum Zentrum der Milchstraße“

**Prof. Dr. Reinhard Genzel ist Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und einer der weltweit führenden Forscher auf dem Gebiet der Infrarot- und Submillimeter-Astronomie. 2020 erhielt er den Nobelpreis für Physik, gemeinsam mit der US-amerikanischen Astronomin Andrea Ghez, für die Entdeckung eines supermassereichen kompakten Objekts im Zentrum unserer Galaxie, der Milchstraße – einem schwarzen Loch. In seinem Nobel-Vortrag in Leipzig nahm der Nobelpreisträger das Publikum mit auf seine faszinierende Reise zu diesem schwarzen Loch, die nicht weniger als 40 Jahre dauerte.**

Vor etwas mehr als 100 Jahren veröffentlichte Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie. Ein Jahr später löste Karl Schwarzschild die entsprechenden Gleichungen für eine nicht rotierende kompakte Masse. Ergebnis: Ist diese Masse hinreichend groß und kompakt, kann sogar Licht nicht mehr entkommen, wenn es einen bestimmten Abstand zur Gravitationsingularität im Zentrum überschritten hat – den so genannten Ereignishorizont. Das theoretische Konzept eines ‚Schwarzen Lochs‘ war somit geboren und wurde in späteren Dekaden von Wissenschaftlern wie Penrose, Wheeler, Kerr, Hawking und anderen weiterentwickelt. Der erste Hinweis auf die Existenz solcher Schwarzen Löcher in unserem Universum wurde durch die Beobachtungen von Röntgen-Doppelsternen und leuchtenden Quasaren geliefert.

Nobelpreisträger Prof. Dr. Reinhard Genzel (Abb. 1) beschrieb in seinem No-



**Abb. 1** Prof. Dr. Reinhard Genzel, Nobelpreisträger in Physik 2020. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

bel-Vortrag die 40-jährige Reise, die seine Kollegen und er unternommen haben, um mit lang andauernden und immer präziser werdenden Beobachtungen der Bewegungen von Gas und Sternen als Testobjekte für Raum und Zeit ein schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße nachzuweisen und dessen Kompaktheit zu bestimmen. Diese Studien belegen eindeutig die Existenz eines kompakten Objektes von vier Millionen Sonnenmassen, die ohne Zweifel einem einzigen massereichen schwarzen Loch zugeordnet werden kann. Doch der Weg dahin war nicht einfach und mit zahlreichen Rückschlägen versehen. Das machte Reinhard Genzel in seinem öffentlichen Abendvortrag über seine Reise zum Zentrum der Milchstraße mehrfach deutlich.

Eine Reise ins Zentrum der Milchstraße ist doch eigentlich Science Fiction. Nicht für Prof. Genzel, für ihn ist das echte tiefe Physik und eine großartige Grundlagenforschung, die die Neugier der Men-

schen befriedigt. „Wir sind jetzt seit einigen Jahren in der Lage, die Einsteinsche Theorie auf Herz und Nieren zu prüfen und zu beweisen. Schwarze Löcher mögen auf der einen Seite Stoff für Science Fiction sein, auf der anderen Seite werfen sie tiefgreifende Fragen der Physik auf.“

#### **Beeindruckende Reise ins Zentrum der Milchstraße**

Die große Herausforderung seiner Forschung ist es, Bewegungen und Veränderungen von kosmischen Phänomenen, Sternensystemen oder Objekten außerhalb unseres Universums überhaupt zu erkennen und messen zu können. Und hierzu braucht es Geduld, denn die Messungen wurden erst im Laufe von Jahrzehnten immer besser und genauer. „Die moderne Astronomie versucht, neben der Erforschung des Universums auch Zeitreisen in die Vergangenheit zu machen. Dank der Lichtgeschwindigkeit schauen wir in die Vergangenheit des Universums. Wenn ich weit wegschaue,

schaue ich die Vergangenheit. Ein Astronom ist also Naturwissenschaftler und Archäologe zugleich“, sagte Genzel und nahm die Zuschauer dann mit auf eine beeindruckende Reise bis in Entfernungen einiger Millionen Lichtjahre aus der Milchstraße heraus – mit  $10^{12}$ -facher Geschwindigkeit! „Wir sitzen mitten drin in unserer Milchstraße, einer Scheibengalaxie von denen es milliardenfach weitere Systeme gibt. Die Milchstraßen sind unsere Welteninseln, die sich vor zehn bis zwölf Milliarden Jahren gebildet haben“, so Genzel.

Speziell die Frage nach dem Zentrum unserer Milchstraße interessiert ihn bei seiner Forschung: „Die Gravitation ist eine unsichtbare Kraft, die nichts mit der Strahlung der Sonne in unserem System zu tun hat. Die Planeten würden auch weiter um die Sonne kreisen, auch wenn diese abgeschaltet würde. Die Schwerkraft ist durch die Masse der Sonne bestimmt, nicht durch ihre Strahlkraft. Einstein hat in seiner allgemeinen Relativitätstheorie die Lichtgeschwindigkeit als das Maß der Dinge definiert, und auch die Gravitation breitet sich nur mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Entwicklung eines Systems ist die Entwicklung einer Raum-Zeit. Die Sonne verzerrt also in ih-

rer Umgebung die Raum-Zeit, krümmt sie und sorgt dafür, dass sich ein Planet nicht linear bewegt, sondern geodätisch.“

An der Gravitation hat sich somit auch das Licht auszurichten, so eine weitere Tatsache der Einstein Theorie. „Auch das Licht, das Photon, zieht die Gravitation und wird gekrümmt. Das ist wichtig für die Beobachtung von Sternen und deren richtige Positionierung im Raum, denn die Krümmung muss mit einberechnet werden, um den tatsächlichen Standort zu bestimmen, mit einer Abweichung von 1,75 Bogensekunden“, erläuterte Prof. Genzel. (Abb. 2)

### Einschub: Bogensekunden und eine Sonnenfinsternis

Albert Einstein selbst erkannte schon recht früh, dass derart gekrümmte Bahnen nicht nur für Planeten oder große bewegte Himmelskörper gelten. Auch Lichtstrahlen sollten in einem Gravitationsfeld auf krummen Wegen laufen. Als er in den folgenden Jahren seine Arbeiten zur Allgemeinen Relativitätstheorie weiter vorangetrieben hatte, fand er den oben beschriebenen Zusammenhang zwischen Schwerkraft und Raumkrümmung. Dies sollte einen Effekt bewirken, den man zu der reinen Ablenkung durch die Schwerkraft addieren musste. Kurz: Die Verschiebung einer Sternposition am Sonnenrand verdoppelte sich auf 1,75 Bogensekunden. Einstein veröffentlichte diesen Wert im Rahmen seines Aufsatzes „Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie“, der im Mai 1916 in den *Annalen der Physik* erschien. [1]

Eine große Masse lenkt also das nah an ihr vorbeilaufende Licht eines fernen Sterns ab. Diese Verschiebung kann man messen, auch wenn sie winzig ist. Sie lässt sich z.B. während einer totalen Sonnenfinsternis messen. Die Gelegenheit bot sich am 29. Mai 1919. Als ideale Beobachtungsorte ermittelten Astronomen die Insel Principe vor der Küste Spanisch-Guineas sowie das Dorf Sobral im Norden Brasiliens. Am 8. März 1919 starteten von England zwei Expeditionen, eine führte auf die Insel Principe, die andere nach Sobral. Zwar waren nur wenige Aufnahmen der Astronomen brauchbar, aber es reichte aus, um die Verschiebung zu beweisen. Der Beweis der 1,75 Bogensekunden durch das Sonnenfinsternis-Experiment machte Einstein zum Rockstar der Physik und der Wissenschaft, wie Genzel es formulierte.

„Wenn die Schwerkraft so stark ist, dass selbst das Licht nicht mehr aus ei-

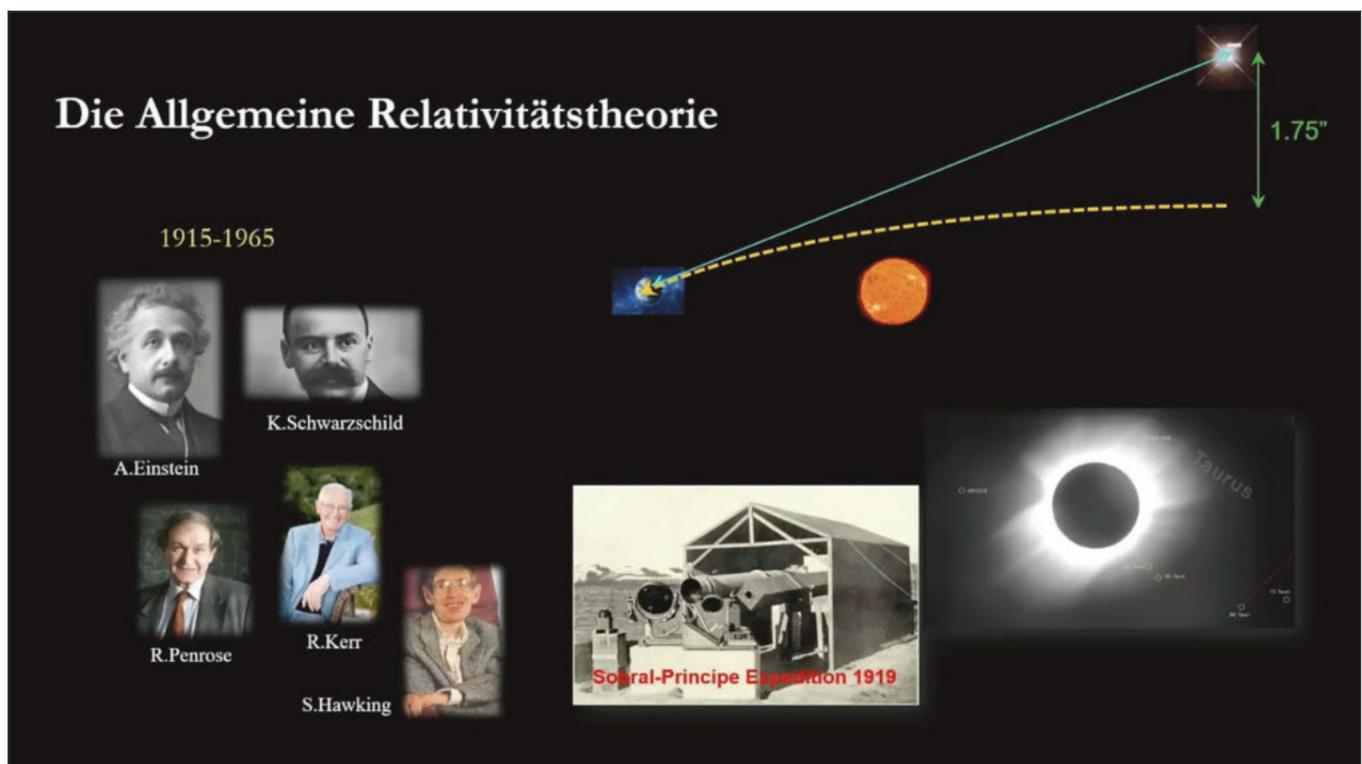


Abb. 2 Folie aus dem Vortrag von Prof. Dr. Genzel.

nem Objekt – einem schwarzen Loch – herauskommt und in die Sonne hineinfällt, dann wird uns dieses Licht nicht erreichen. Damit entkoppelt sich dieses System von dem unsrigen. Laut Relativitätstheorie haben schwarze Löcher nur zwei Eigenschaften: Masse und Spin. Bei schwarzen Löchern braucht man im Gegensatz etwa zur Erde keine Oberflächenbeschreibung mit Bergen und Tälern“, sagte Prof. Genzel und stellte eine geschickte Frage: „Wie können wir denn etwas sehen, das gar nicht strahlt? Von der Sonne müsste eine Rakete über 600 km/s schnell sein, um abzuheben. Auf der Erde sind es nur 11 km/s, alles ist abhängig von Masse und Größe des Objekts. Je kleiner das Objekt, aber je größer seine Masse, desto größer ist die Schwerkraft. Hätte unsere Sonne nur einen Durchmesser von drei Kilometern, müsste die Rakete mit 300.000 km/s abheben. Aber das geht nicht, denn das ist Lichtgeschwindigkeit.“

Jedes Objekt mit diesen Parametern hätte die Eigenschaft, dass auch kein Licht mehr von der Oberfläche entkommen kann – und das wäre dann ein schwarzes Loch. „Nehmen wir hypothetisch an, sie könnten als Astronaut mutig in den Ereignishorizont des Loches fliegen, also ins Innere, was könnten Sie dann an Informationen berichten, was könnten Sie sehen? Nichts. Sie sehen sich vielleicht, aber sonst nichts, und sie kommen auch nicht mehr aus dem Loch heraus. Alle Masse dort fokussiert sich auf einen mathematischen Punkt ungeheurer Masse. Teils mit Millionen bis Milliarden Sternenmassen. Ein mathematischer Punkt mit Null Durchmesser, mit einer mathematisch betrachteten unendlichen Dichte. Ist das plausibel?“, fragte Genzel und gab auch gleich die Antwort.

### **Wissen und Denken permanent anpassen**

„Kaum ein Physiker würde das heute glauben. Und das zeigt die Eigenschaft der Naturwissenschaft. Wir müssen auf der Hut sein und neugierig bleiben. Die allgemeine Relativitätstheorie ist größtenteils durch externe Experimente bestätigt, aber direkt im eigentlichen Zentrum eines schwarzen Loches können wir kein Experiment durchführen, wir würden keine Ergebnisse aus dem Loch ge-

funkt bekommen. Und deshalb könnte es durchaus Enttäuschungen und Überraschungen geben. Dass es sich nämlich nicht um einen sauberen Punkt handelt, sondern etwas verschmiert. Unser Denken und Wissen müssen wir permanent anpassen. Die alten Griechen hatten noch gedacht, Atome seien unteilbar, dann wurde geglaubt, die Elektronen um die Atome herum seien punktförmig, das sind sie aber nicht. Das gilt auch für die Atomkerne, die sind ebenfalls nicht wie anfangs geglaubt punktförmig. Damit will ich sagen, dass wir im Bereich kleinster Skalen wie beim schwarzen Loch neu nachdenken müssen.“

Nach diesen nachdenklich stimmenden Worten blickte Prof. Genzel wieder nach vorne und erläuterte dem Publikum die nächsten Schritte auf seiner Reise der Entdeckung eines schwarzen Loches. „Aber wie könnten wir denn nun ein nicht sichtbares Objekt sehen? Durch die Schwerkraft! Stellen wir uns vor, es gäbe ein Sonnensystem um ein schwarzes Loch. Dann müsste der Astronom nur die Bewegungen der Planeten neu messen und herausfinden, dass die Masse kontrolliert wird durch eine zentrale Masse, in diesem Fall einer Sonnenmasse. Aber kann er so auf ein schwarzes Loch schließen?“

Der lange Weg zur Entdeckung eines schwarzen Lochs war mit sehr vielen Fragen, viel Umdenken und Neudenken verbunden, das machte der Nobelpreisträger deutlich. Denn immer wieder müssen sich die Forscher fragen, ob es nicht andere Ursachen für bestimmte Beobachtungen und Messungen im Universum geben könnte. Ein wichtiger Meilenstein von der Theorie zur Praxis war für Genzel die Entdeckung von Quasaren in den 1960er Jahren als potentielle Objekte, die schwarze Löcher beherbergen könnten. Röntgenastronomen haben diese Objekte messend „sehen“ können (durch Röntgenstrahlung). Sie fanden Doppelsystemen mit relativ hoher Masse, von denen aber nur ein Stern zu sehen war, der andere war nicht sichtbar – möglicherweise ein schwarzes Loch? Mit heutigen Gravitationswellenmessungen lässt sich dieses damalige Postulat tatsächlich beweisen. „Es existiert! Dank Gravitationswellenastronomie“, so Genzel.

Einen ebenso wichtigen Beitrag leisteten auch die Radioastronomen. So stellte etwa der niederländische Astronom Maarten Schmidt 1963 durch Spektralanalyse fest, dass die Radioquelle 3C 273 kein naher Stern ist, sondern mit einer Rotverschiebung von 0,158 im Bereich ferner Galaxien liegt, also nur quasi sternartig ist [2]. Das expandierende Universum (je weiter weg ein Objekt, desto schneller scheint es sich wegzubewegen) zeigt somit rund 16 % Rotverschiebung. „Das damals von Schmidt beobachtete Objekt musste 2,4 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sein. Eine für damalige Zeiten unglaubliche Erkenntnis, denn bis dahin war man erst bis in die Millionen Lichtjahre vorgedrungen“, hob Genzel diesen astronomischen Meilenstein hervor (Abb. 3). „Heute finden sich Objekte in über 13 Milliarden Lichtjahre Entfernung. Der erste gefundene Quasar war übrigens gar nicht so schwach, wie die Strahlung zunächst vermuten ließ. Denn die Menge der lokal emittierten Energie ist tausendmal mehr als unsere Milchstraße mit ihren tausenden Milliarden Sternen. Auch lässt sich ein schwarzes Loch vermuten. Denn außerhalb des Ereignishorizonts lässt sich Strahlung messen“, so Reinhard Genzel.

Der Nobelpreisträger sieht als größten Feind des schwarzen Loches den Drehimpuls, gleichzeitig ist dies eine Chance für Astronomen, denn das Schwarze Loch zieht durch seine Gravitation Gase in sich hinein. Das interstellare Gas geht aber nicht linear in das Loch, sondern dreht sich um das Loch, zieht sich zu einer Scheibe zusammen, erzeugt dabei Reibung, dadurch wird ein Drehimpuls nach außen weggeführt, Materie hineingezogen. „An dieser Stelle kann sehr viel Energie nach außen abgeführt werden, die gemessen werden kann. Das war zunächst eine Theorie. Aber wie sollte man die beweisen?“, fragte Genzel. „Theorien sind wissenschaftlich interessant, aber spekulativ und ansonsten nicht sonderlich ernst zu nehmen, bis man sie beweisen kann. In diesem Fall kann man doch einfach die Bewegung des Gases messen. Das war damals technisch noch unmöglich, heute immerhin einigermaßen, auch wenn die Entfernungen eine große Hürde sind“, so Genzel.

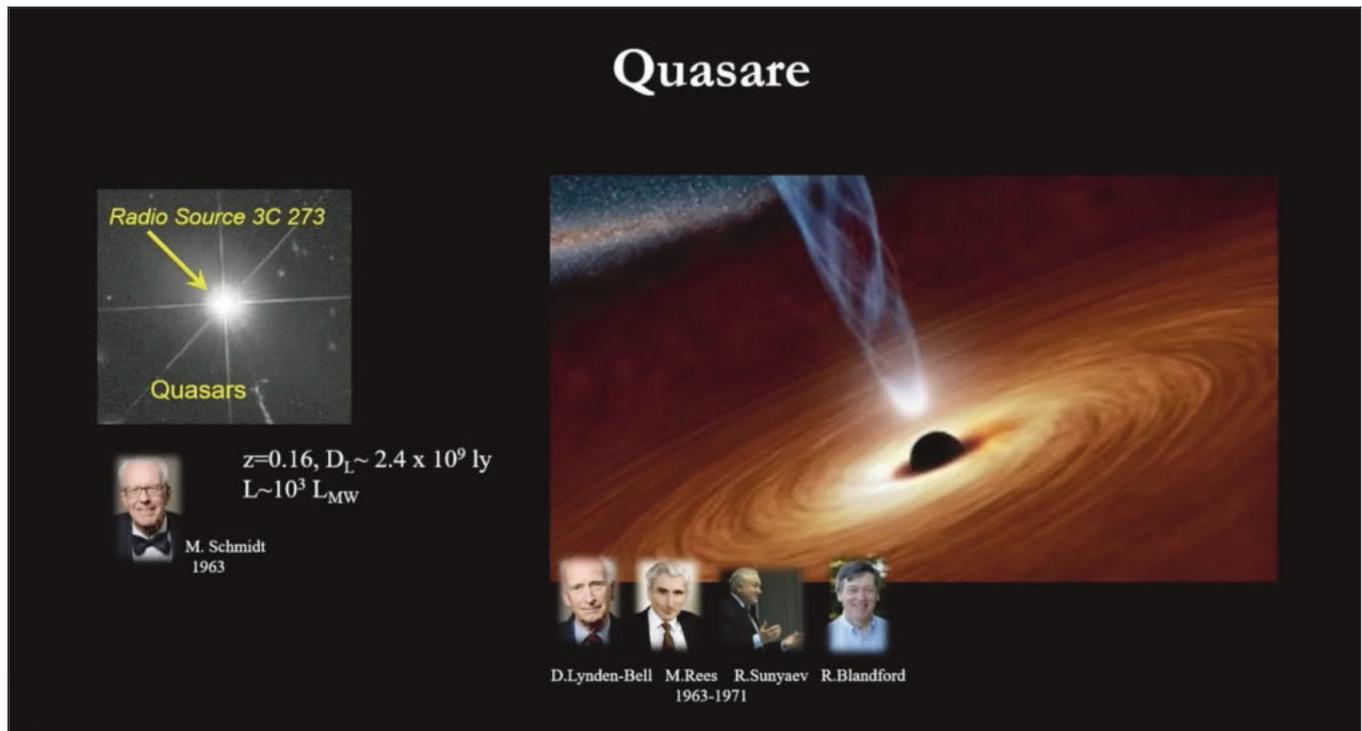


Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Dr. Genzel.

### Viele Theorien und Entwicklungen auf dem Weg zum endgültigen Beweis

1971 wurde die Theorie aufgestellt, dass der damals entdeckte Quasar enorme Masse ansammelt und daher so hell erscheint. Aber es könnte auch Galaxien mit schwarzen Löchern ohne diesen Effekt geben. Schließlich stellte der britische Astronom und Astrophysiker Donald Lynden-Bell die Theorie auf, dass jede Milchstraße im Zentrum ein schwarzes Loch enthält. „Er war der erste, der voraussagte, dass Galaxien supermassereiche schwarze Löcher in ihren Zentren enthalten und dass solche schwarzen Löcher Quasare antreiben. Demnach sollte auch unsere Milchstraße ein schwarzes Loch haben. Das war der Beginn der astronomischen Jagd nach diesem schwarzen Loch. Und zu den Jägern gehörte ich dann auch, seit den frühen 1980er Jahren“, beschrieb Genzel die Anfänge seiner Zeit als Jäger des verborgenen schwarzen Lochs.

Speziell die Entwicklung von Geräten zu Messung längerer Wellenbereiche interessierte ihn. Denn optische Geräte sind auch in der eigenen Milchstraße – aufgrund des Sternenstaubs – nicht einsetzbar und nutzbar. Der intergalaktische Staub (auf Galaxie-Bildern nur als schwarze Flecken erkennbar), schwächt

die Lichtstrahlung vom galaktischen Zentrum um den Faktor 10 bis 12 ab. „Wir brauchten also Techniken, die längere Wellenlängen im nicht sichtbaren Bereich messen können. Infrarot. Dank dieser Technik konnte man ab 1971 immer tiefer in das Zentrum der Galaxie vordringen und erkennen, dass sich im Zentrum ein hochdichter Sternhaufen von Millionen von Sternen befindet. Eine sehr kompakte Radioquelle musste demnach im Zentrum der Milchstraße stecken. Ich war als Postdoc bei diesen Untersuchungen dabei“, fuhr Prof. Reinhard Genzel spannend fort.

Aus den Spektralmessungen der interstellaren Gase rund um das Zentrum konnten er und seine Kollegen folgendes erkennen und Aussagen über die Masseverteilung im Zentralbereich machen: Von außen nach innen nimmt die Masse immer mehr ab, stabilisiert sich dann bei etwa zwei bis vier Millionen Sonnenmassen. „Daraufhin postulierten wir stolz, ein schwarzes Loch gefunden zu haben. Das war 1985. Dafür gab es aber keinen Nobelpreis, und keiner hat uns geglaubt. Denn wir waren bei unseren Messungen noch zu weit weg vom Ereignishorizont und somit fehlerbehaftet. Da war noch viel Luft, so dass andere Wissenschaftler sagten, es könnte sich wohl eher um Neu-

tronensterne handeln oder andere schwache Sterne, die sehr komprimiert sind. Also musste die Messung weiter verbessert und verfeinert werden, und statt der Gasmessungen rückten die Sterne in den Fokus. In meiner neuen Gruppe in München haben wir an der Optimierung der Messmethoden und Technologien gefeilt: Infrarot mit Kamera. Infrarotkameras war eine wichtige Innovation auf dem Weg zur Entdeckung des schwarzen Loches“, sagte der Physiker und nahm die Zuhörer auf die nächste Etappe der Entdeckungsreise mit. „Wir mussten weg von der Erde für die Messungen, da die Erdatmosphäre die Sternbilder verschmiert wiedergibt. Egal ob mit einem 20-Zentimeter-Teleskop oder eines mit zehn Metern Durchmesser – die Bilder sind immer verfälscht und schlecht zu bewerten.“

### Adaptive Optiken und Leitsterne

Hierfür muss man die adaptive Optik nutzen, eine Technik, die die Qualität optischer Systeme dadurch verbessert, dass sie vorhandene Wellenfrontstörungen, verursacht z. B. durch Luftunruhe (Turbulenzen), bestmöglich reduziert bzw. kompensiert – in der Regel durch Bewegung oder Verformung von Spiegeln. Die Technik der adaptiven Optik wurde in

den 1970er Jahren im militärischen Bereich entwickelt und knappe zwanzig Jahre später erstmals im zivilen Bereich eingesetzt. „Heute ist diese Technik die Grundlage aller erdgebundenen Astronomie und mit den großen Teleskopen auch gut nutzbar“ sagte Genzel.

Problem: Man braucht dafür einen hellen Stern, der aber nicht immer vorhanden ist. Also erzeugt man einen künstlichen Leitstern, einen Laserleitstern. Der künstliche Leitstern wird durch einen Laserstrahl als Lichtpunkt in der oberen Atmosphäre erzeugt und ermöglicht als „künstlicher Stern“ die Korrektur der Turbulenzen durch adaptive Optik, gerade dann, wenn kein natürlicher Leitstern zu sehen ist. „Um dahin zu kommen, benötigte die Astronomie rund 20 Jahre Forschung und Entwicklung“, so Genzel. „In den 1990er Jahren konnte man dann endlich Sternbewegungen nahe am Zentrum messen. Damit kamen wir bei Messungen schon bis Lichtwochen an den Ereignishorizont heran und konnten Objekte mit drei bis vier Millionen Sternmassen identifizieren. Die Astronomen waren von unseren Ergebnissen schon sehr beeindruckt, die Physiker aber haben weiter den Kopf geschüttelt und waren der Meinung: Noch nicht gut genug, das reicht nicht. Also mussten wir weiter trainieren und noch besser werden“, ließ sich Genzel auch von diesem kleinen Rückschlag seiner Forschung nicht aus der Ruhe bringen. Vielmehr nahm er die Herausforderung an, es noch besser zu messen.

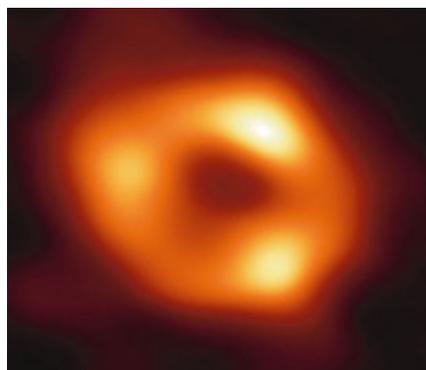
„Also noch größere Teleskope bauen? Aber das dauert. Oder könnte man auf die Natur hoffen?“, fragte er das Publikum. „Es geht tatsächlich. Und zwar in Form von Sternen als natürliche Radioquellen, die sehr nah ans Zentrum des schwarzen Loches kommen. Diese 2002 entdeckten Radioquellen gibt es in der Tat, etwa in Form des Sagittarius A\*. Der ist eine Radioquelle im Zentrum der Milchstraße, der in einer hochelliptischen Bahn in 17 Jahren um den Ereignishorizont kreist und eine dichteste Annäherung von 17 Lichtstunden an das Zentrum erreicht, also vergleichbar des Bahnradius und der Entfernung des Neptuns von unserer Sonne. Wir sind dann also bereits in Größenordnungen und Skalen des Sonnen-

systems und damit sind wir schon extrem nah am Ereignishorizont“, führte Genzel aus.

Die elliptische Bahn des Sterns ist ein präzises Instrument, um die Masse zu bestimmen. Gemeinsam mit der Keck-Gruppe wurden die Beobachtungen in den folgenden zehn Jahren in jahrelangen Messreihen noch weiter verfeinert. „Ab etwa 2018 konnten wir mit der Weiterentwicklung der Technik sehr präzise Messungen an dem 27.000 Lichtjahre entfernten Objekt durchführen – eines sich bewegenden kleinen Universums, wohl bemerkt. Eine Lösung war auch, mehrere große Teleskope durch interferometrische Konfiguration zusammenschalten. Wir benutzen die Interferenz von Teleskopen (4 mal 8 Meter Teleskope), um damit effektiv ein 130 Meter Teleskop zu generieren. Das war eine technische schwierige, aber machbare Operation. Wir hatten aber auch alle Freiheiten zur Durchführung dieses außergewöhnlichen Experiments. Das MPI hat nur gesagt: Mach mal! Das Risiko hast du, aber wir erlauben dir die Messung“, beschrieb Genzel die Schlussetappe seiner langen Expeditionsreise zum schwarzen Loch.

#### 2018 waren Genzel und sein Team endlich am Ziel

Die entscheidenden Messungen konnte das Team dann auch erfolgreich 2018 mit der größten Annäherung des Sterns an das Zentrum durchführen. „Wir können die Sternbewegungen dort sehr genau jeden Tag sehen. Wir können nun auch die allgemeine Relativitätstheorie selber testen. Ein erster Test war die



**Abb. 4** Das erste Bild des Schwarzen Loches Sgr A\* im Zentrum unserer Milchstraße. [Foto: A. Zensus, Max Planck Institut für Radioastronomie]

Gravitationsrotverschiebung. Wenn ein Stern so nah an einem schwarzen Loch vorbeikommt, dann sieht man die prognostizierte Rotverschiebung des Sterns. Dann kann man die Schwarzschild-Bahn präzise messen, die macht eine Rosettenfigur um das Zentrum. Wir konnten sogar Gasbewegungen ganz nah am schwarzen Loch verfolgen. Das sehr heiße Gas emittiert variable Infrarot-Emissionen“, kam der hochdekorierter Physiker aus dem Schwärmen nicht mehr heraus (Abb. 4).

Sein Fazit: „Nach 40 Jahren haben wir es mit viel Glück und Spucke geschafft, uns langsam und immer genauer ins Innere des Zentrums zu bewegen. Was wir erkennen können ist, dass das Schwarze Loch aus vier Millionen Sonnenmassen besteht, aber ziemlich isoliert ist. Es hat eine nahezu leere Umgebung. Einige Zweifler meinen zwar immer noch, dass es sich bei dem Objekt auch um dunkle Materie handeln könnte, die quasi wie ein schwarzes Loch wirkt. Aber alle unsere Messungen – auch von einer anderen Gruppe – belegen eindeutig, es ist ein schwarzes Loch. Die Messungen mit den geschalteten Teleskopen ergeben Messgenauigkeiten von Mikrobogensekunden. Damit können sie eine kleine Münze auf dem Mond von der Erde aus präzise erkennen. Deshalb gibt es keinen Zweifel. Wir wissen nur noch nicht, ob es einen Drehimpuls hat.“

Dann überraschte Prof. Genzel das atemlose Publikum seines Vortrags mit einer letzten Frage: „Aber wer hat die Löcher bestellt? Das Universum. Denn das Universum tut, was es will, das ist ja das Tolle daran“, freute sich Genzel. „Das ist gewissermaßen der Lauf der kosmischen Evolution. Es ist davon auszugehen, dass jede Galaxie im Laufe ihre Entwicklung 0,2–0,3 % ihrer Masse ins Zentrum eingebracht hat und ein schwarzes Loch bildet.“

Er beruhigte aber zum Ende das Publikum: „Aber keine Angst, das schwarze Loch tut uns nichts. Dafür sind wir viel zu weit weg. Herzlichen Dank fürs Zuhören, aber ich muss dann mal weg, ins schwarze Loch abreisen.“

[1] Max-Planck-Gesellschaft: Eine Sonnenfinsternis erhellt die Physik (<https://www.mpg.de/9236014/eddington-sonnenfinsternis-1919>). - [2] Schmidt, M.: Nature, **197**/1040 (1963)

**BILDGEBUNGSVERFAHREN**

## Magnetresonanztomografie in Echtzeit – ein Paradigmenwechsel – Wie geht die Reise nach 40 Jahren weiter?

**Nach dem Studium der Physik in Göttingen baute Jens Frahm Mitte der 1980er Jahre am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie eine Forschungsgruppe Biomedizinische NMR auf, die sich mit methodischen Entwicklungen und biomedizinischen Anwendungen der Magnetresonanztomographie (MRT) befasst. Ein besonderer Schwerpunkt sind Verfahren zur Beschleunigung der MRT ausgehend von der frühen Erfindung der schnellen Gradientenechotechnik (FLASH) bis hin zu aktuellen Arbeiten über die Echtzeit-MRT. In seinem GDNÄ-Vortrag berichtete Professor Jens Frahm über einen Paradigmenwechsel in der medizinischen Bildgebung: die Magnetresonanztomographie in Echtzeit, um das schlagende Herz, den Blutfluss, das Schlucken und Sprechen in voller Dynamik abzubilden.**

Gibt es bei einem Patienten Auffälligkeiten im Hirngewebe? Wurden bei einem Unfallopfer innere Organe verletzt? Wie schlägt das Herz? Um das zu klären, nutzen Radiologen die magnetische Kernspintomographie, kurz MRT. Mit ihr lassen sich in kurzer Zeit präzise Schnittbilder unseres Körpers erzeugen, die insbesondere Weichteile und Organe besonders gut darstellen. Unter Einsatz von Magnetfeldern wird das Körperinnere Schicht für Schicht sichtbar gemacht. Die MRT ist heute – 40 Jahre nach ihrer Entwicklung – ein weltweit eingesetztes Routineverfahren zur Untersuchung innerer Organe von Patienten. Der große Vorteil: Das Verfahren ist nicht-invasiv und verursacht im Gegensatz zu Röntgenaufnahmen keine zusätzliche Strahlenbelastung. Dank der von Frahm und seinem Team am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen erfundenen **FLASH-Technologie** (*Fast Low Angle Shot*) ist die MRT heute das bedeutendste bildgebende Verfahren in der klinischen



**Abb. 1** Prof. Dr. Jens Frahm. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

Diagnostik. Eine erst vor Kurzem von Frahm entwickelte Erweiterung ermöglicht inzwischen sogar Echtzeit-Filme aus dem Inneren des Körpers und wird gegenwärtig für die Nutzung in der Klinik erprobt.

Die Magnetresonanztomographie zählt zu den wichtigsten bildgebenden Verfahren der medizinischen Diagnostik mit weltweit etwa 100 Millionen Untersuchungen im Jahr. Sie zeichnet sich durch eine nichtinvasive Darstellung der weichen Gewebe und eine hohe Empfindlichkeit gegenüber krankhaften Veränderungen aus. Die Patienten müssen jedoch bei der Untersuchung stillhalten, und dynamische Vorgänge sind bisher nicht direkt messbar. Doch das dürfte bald der Vergangenheit angehören, denn in seinem Vortrag stellte Frahm fundamentale Fortschritte vor, die mittels Echtzeit-MRT einen völlig neuen Zugang zu bewegten Organen und physiologischen Prozessen ermöglichen. Die Beschleunigung der MRT bzw. die Verkürzung der Messzeiten wird durch eine erhebliche Unterabtastung der Datenaufnahme in Kombination mit einer Bildrekonstruktion erreicht, die ein nichtlineares inverses Problem mit zeitlicher Regularisierung löst. „MRT-Filmaufnahmen mit bis zu 100 Bildern pro Sekunde eröffnen den direkten Blick auf das schlagende Herz ohne Synchronisation mit dem Elektrokardiogramm, der Blutfluss in den Gefäßen lässt sich unmittelbar verfolgen und Sprech- oder Schluckvorgänge werden erstmalig in

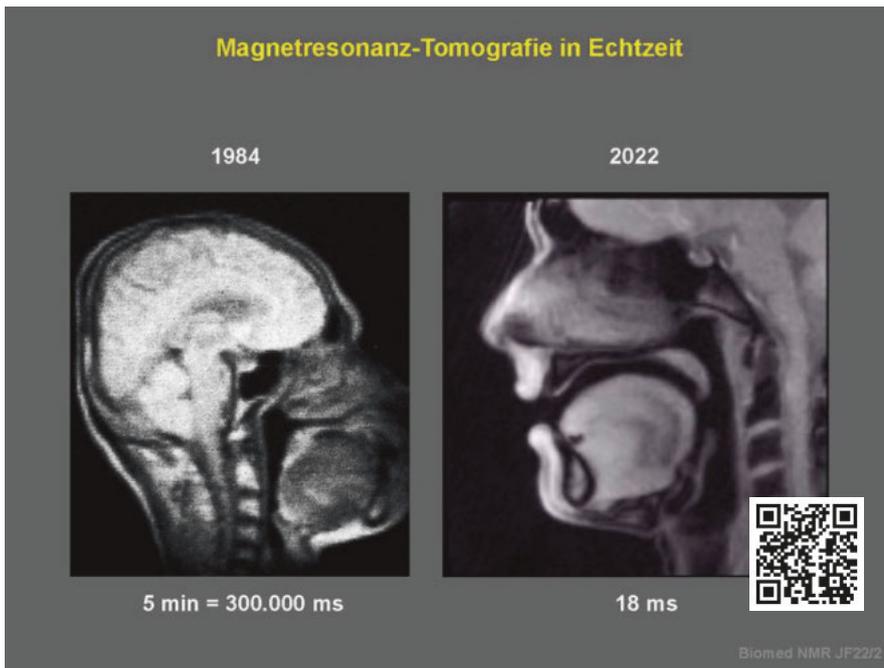
voller Dynamik darstellbar“, sagte Professor Frahm bei seinem Vortrag in Leipzig. (Abb. 1)

„Die MRT hat sich in den letzten 40 Jahren zu einem der wichtigsten Werkzeuge in der diagnostischen Bildgebung entwickelt, wegen der fehlenden Strahlenbelastung, wegen der sehr guten Weichteilkontraste, zum Großteil auch ohne Kontrastmittel, und wegen der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten“, hob Professor Frahm zu Beginn die allgemeine Bedeutung der MRT hervor. Doch diese Entwicklung ist aus seiner Sicht noch lange nicht zu Ende. Im Gegenteil, denn der Wunsch nach besserer Geschwindigkeit bei der Bildmessung wird immer größer. Die aktuellste und schnellste MRT-Bildgebung stellte Prof. Frahm in Leipzig dabei mit zahlreichen faszinierenden MRT-Filmen in Echtzeit vor, die beliebige Körperbewegungen oder Funktionen des menschlichen Körpers abbilden.

### Revolution für die Phonetik

„Wir sprechen von einem Paradigmenwechsel: Die Translation technischer Innovationen in die klinische Routine, in die radiologische Praxis, erfordert bei der Nutzung von Echtzeit-MRT einen radikalen Paradigmenwechsel, denn dadurch verändert sich auch der Workflow in der Radiologie. Alles was Sie heute sehen ist Neuland, das erst in wenigen Universitätskliniken aktuell erprobt wird, aber bei den kommerziellen Herstellern noch nicht bereitsteht. Die Translation durch klinische Forschung kann hier vielleicht zu einer schnellen Umsetzung und Nutzung beitragen“, erklärte der Physiker dem Publikum.

Als Beweis zeigte er eine Echtzeit-Aufnahme eines Hornisten, der in einer MRT-Röhre (der konventionellen Kopfspule) auf einem Jagdhorn blies und man die Bewegungen der Zunge, des Gaumens und des Kehlkopfes gut im MRT sehen konnte. Die technische Neuerung ist viermal schneller als zu Beginn der 1980er Jahre. „Auf frühen Bildern aus 1984 konnte man kaum erkennen, dass es sich um einen Kopf einer Person handelt, geschweige denn konnte man Feinheiten der Strukturen erkennen. Dafür brauchte es damals fünf Minuten, heute lassen sich in Echtzeit ganze Filme im MRT erstellen, auch mit Sprach-Ton-



**Abb. 2** Folie aus dem Vortrag von Prof. Frahm. (Mit dem QR-Code das MRI-Video aktivieren.)

Aufnahmen. Eine Revolution auch für die Phonetik“, betonte Frahm (Abb. 2).

Wie kann das funktionieren, und warum jetzt und nicht schon vor 20 Jahren? Die Bildgebung in 3D bzw. die räumliche Auflösung erfolgt durch zusätzliche Magnetfelder um den Körper herum. Es ergibt sich am Ende durch Frequenzüberlagerungen eine Signalprojektion des Objektes. Allerdings zunächst nur eine Eindimensionale. Es müssen somit viele Wiederholungen bzw. Bilder aufgenommen werden, damit es mehrdimensional wird. „Und das dauerte und machte die MRT langsam. Erst viele Einzelmessungen der MRT-Signale mit unterschiedlichen Ortskoordinaten ergaben ein MRT-Bild. Und zwischen jeder Einzelmessung erfolgte eine lange Wartezeit bis zur nächsten Messung. Bei 200 Einzelmessungen können dann schon an die sechs bis sieben Minuten für eine Schnittbild zusammenkommen“, beschrieb Frahm die Anfänge und Probleme der frühen MRT.

Dieses Problem aus den 1970er Jahren konnte 1985 aber gelöst werden mit einem physikalischen Trick. „Die Einzelmessungen verwendeten nur noch einen Teil des verfügbaren MRT-Signals, so dass praktisch keine Wartezeiten mehr auftreten. Diese Methode nennt sich FLASH (schnelle MRT) und ermöglicht eine hundertfache Beschleunigung der MRT. Unsere Methode hat die MRT revolutioniert

und erst die vielfältigen Anwendungen überhaupt ermöglicht.“ Statt früher zwölf Stunden für eine 3D-Aufnahme mit 40.000 Einzelbildern, waren nun nur noch vier bis fünf Minuten für eine solchen Aufnahmen notwendig, denn die hochaufgelösten Schnittbilder wurden von Minuten auf Sekunden reduziert.

Frahms FLASH-Technik nutzt für jede Einzelmessung nur einen Teil des verfügbaren MRT-Signals, um mit diesem physikalischen Trick die Pausen vollständig zu eliminieren und die Messzeit radikal zu verkürzen. Im Jahr 2010 gelang Frahm mit seinem Team ein weiterer Durchbruch, indem sie auch das Problem der hohen Zahl an erforderlichen Einzelmessungen lösten: Mit FLASH II stellten sie eine weitere Innovation vor, die ein neues mathematisches Verfahren für die Bildrekonstruktion nutzt und somit nur noch mit ganz wenigen Einzelmessungen pro Bild auskommt. Das Verfahren beschleunigte die MRT-Aufnahmen noch einmal deutlich. „Die Messzeit für ein Bild lässt sich so bis zu einer Hundertstelsekunde reduzieren. Dafür musste sich aber erst die Mathematik und Digitalisierung entwickeln, um die ganzen Bilddaten verarbeiten zu können. Daher hat es solange gedauert. Die numerische Mathematik hat hervorragende Fortschritte gemacht. Es werden Bilder geschätzt und dann berechnet“, sagte Professor Frahm in seinem

Vortrag. Es erfolgt eine Bildberechnung als nichtlineares inverses Problem mit zeitlicher Regularisierung. „Das ist so effizient, dass sie sogar aus zwei, drei oder vier Prozent der Originaldaten ein sauberes korrektes Bild berechnen können. Damit steht uns nun eine neue Welt offen. Und das Gute daran: Die Echtzeit-MRT ist für alte Geräte nachrüstbar, denn jetzt ist die Software der Treiber und nicht die Hardware“, so Jens Frahm.

Damit ist es nun erstmals möglich, Echtzeit-Filme aus dem Inneren des Körpers aufzunehmen und Gelenkbewegungen, Sprechbewegungen, Schluckvorgänge oder das schlagende Herz „live“ zu beobachten (Abb. 3). So lassen sich auch Patienten, die aus gesundheitlichen Gründen den Atem nicht lange anhalten können, im MRT untersuchen. Außerdem könnte die neue Technik in der Zukunft genutzt werden, um minimal-invasive Eingriffe und Behandlungen zu begleiten, die bisher unter Röntgenkontrolle durchgeführt werden.

#### Viele neue Anwendungen und Untersuchungen werden möglich

Es sind sogar Live-Aufnahmen auf zwei Bildebenen (orthogonale Bildebenen) möglich. So kann etwa die Zungenbewegung eines Posaunisten oder Trompeters aus unterschiedlichen Blickwinkeln beobachtet und untersucht werden; und vielleicht kann man aus den Bewegungsprofilen der Zunge herausfiltern, was einen Berufs-Eliteblechbläser von einem Laienblechbläser unterscheidet und auf welche Technik es ankommt, um die richtigen Töne perfekt zu treffen. Oder auch, um zu erkennen, ob es Dystonien gibt, also eine Störung im Tonus des Muskels (in diesem Fall des Zungenmuskels). Der Patient kann dann z.B. keine höheren Töne mehr spielen oder treffen, aufgrund muskulärer Probleme im Zungenapparat, nannte Frahm als Beispiele.

Während die MRT-Untersuchungen mit Profi-Blechbläsermusikern vielleicht noch eher spielerischer Natur sind, wird die neue Technik vor allem genutzt, um medizinischen Phänomenen oder Problemen auf die Spur zu kommen, die vorher ohne das MRT in Echtzeit noch nie untersucht und beobachtet werden konnten. „So kann der Schluckvorgang sehr gut be-

**FLASH II – Echtzeit-MRT**




**FLASH:**  
Keine Wartezeiten

**FLASH II:**  
Sehr wenige Einzel-Messungen

Bildberechnung als  
nichtlineares inverses Problem  
mit zeitlicher Regularisierung

Frahm et al, US Patent 8,384,383 B2, March 23, 2010 Biomed NMR JF22/7

**Abb. 3** Folie aus dem Vortrag von Prof. Frahm. (Mit dem QR-Code das MRI-Video aktivieren.)

obachtet werden, und es ergeben sich bei der Untersuchung von Schluckstörungen, also Dysphagien, völlig neue Einsichten und Erkenntnisse und daraus möglicherweise neue Behandlungsmethoden. Schluckbeschwerden können gerade bei neurologischen Patienten eine erhebliche Beeinträchtigung der Lebensqualität bedeuten“, beschrieb der Physiker ein konkretes Anwendungsbeispiel. Auch der „Reflux“, also das Zurückfließen von Magensaft in die Speiseröhre, wodurch es zu Sodbrennen und saurem Aufstoßen kommen kann, ist im MRT sehr gut zu erkennen, weil die anatomischen Begebenheiten sehr gut visualisiert werden können. So kann schnell entschieden werden, ob eine Operation notwendig ist.

„Da die neue Methode keine Artefakte erzeugt, können Sie sich auch das po-

chende Herz problemlos anschauen – ob im Vierkammerblick oder im Kurzachsenblick, Sie erhalten gestochen scharfe Aufnahmen der Kontraktionen. Man kann sehr gut die Wandstärke der Herzkammern sehen und das Fließen und die Strömungseigenschaften des Blutes erkennen“, beschrieb Professor Frahm die Aufnahmen eines schlagenden Herzens – Aufnahmen, die vor 40 Jahren noch vollkommene Utopie waren. Das Echtzeit-MRT kann dabei sehr variabel eingesetzt werden. Während bei einem erwachsenen Menschen in der Regel 30 Bilder pro Sekunde ausreichen, um ein schlagendes Herz gut filmen zu können, müssen bei Kindern mit schneller schlagendem Herzen 50 bis 80 Bilder pro Sekunde eingestellt werden. „Diese zeitliche Auflösung der Bilder entspricht den Vorgaben; tech-

nisch könnten wir sogar eine noch schnellere Bildfolge ermöglichen, aber dann gibt es möglicherweise periphere Nervenstimulationen und andere Dinge, die wir nicht haben wollen“, schränkte Frahm ein.

Mittels Echtzeit-MRT lassen sich dann sehr schnell und sicher Krankheitsbilder wie Hypertrophe Kardiomyopathie oder Wandbewegungsstörungen von Herzkammerwänden (etwa nach einem Hinterwandinfarkt) einwandfrei identifizieren. Interessant für die Pathologie ist aus seiner Sicht auch, dass das Vorhofflimmern im MRT realistisch abgebildet werden kann. Dies kann Fehldiagnosen minimieren.

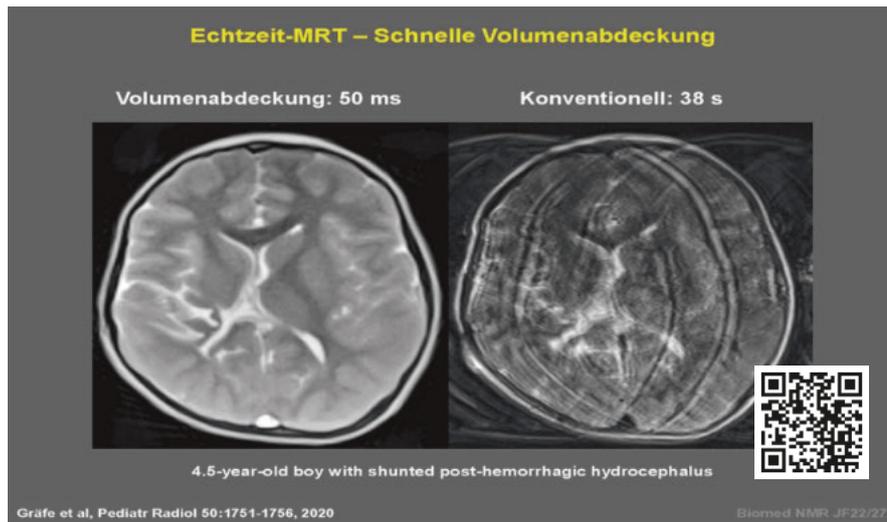
### Quantitative und frühkindliche Diagnostik

Als völlig neues Einsatzfeld nannte Frahm auch die quantitative Diagnostik, die KI-gestützte diagnostische Vorschläge erleichtern hilft. Die anatomisch gestützte Echtzeit-MRT kann man durch eine dynamische Geschwindigkeitsmessung ersetzen. Aus speziell erzeugten Phasenbildern lässt sich dann sofort die Geschwindigkeit des Blutflusses berechnen. „Bislang hatte man hierfür weniger genaue, konventionelle EKG-synchronisierte MRT-Bilder verwendet, um den Ausstrom des Blutes aus dem Herzen beurteilen zu können. Nun lassen sich regelrechte Geschwindigkeitskarten im Körper erstellen, ohne störendes und fehlerbehaftetes Rauschen in den Bildern. Wir können so direkt Stresstests durchführen und die Belastungen des Körpers etwa auf dem Ergometer oder medikamentöse Einflüsse unmittelbar messen“, zeigte sich der Wissenschaftler begeistert. Bekannte Stresstests wie das Valsalva-Manöver könnten dann bald als einfacher diagnos-

### 40 JAHRE MRT IM SCHNELLDURCHLAUF

Dass die MRT heute nicht mehr aus dem klinischen Alltag wegzudenken ist, ist ein Verdienst von Jens Frahm: Nach ihrer Erfindung 1973 war die MRT bis Mitte der 1980er-Jahre für den Einsatz in der Medizin zunächst viel zu langsam – eine einfache Schichtaufnahme dauerte mehrere Minuten. 1985 entwickelte Frahm mit seinen Mitarbeitern die FLASH-Technik. Mit ihr verkürzte sich die Aufnahmezeit um mindestens den Faktor 100 und verhalf so der MRT zum Durchbruch in der medizinischen Diagnostik. Heute finden weltweit etwa 100 Millionen Untersuchungen im Jahr statt. FLASH ist damit das erfolgreichste Patent der Max-Planck-Gesellschaft. Die MRT macht sich eine besondere Eigenschaft der im Körper allgegenwärtigen Wasserstoff-Atomkerne

zunutze: ihren Drehimpuls, auch Kernspin genannt. Dieser Kernspin macht die Atomkerne zu winzigen Magneten. Befinden sich diese in einem Magnetfeld, richten sie sich entlang der Magnetfeldlinien aus. Ein Magnetresonanztomograph erzeugt ein solches Magnetfeld und zusätzlich kurze Radiofrequenzpulse im UKW-Bereich, die die Kernmomente kurzzeitig aus ihrem Gleichgewicht auslenken. Wenn sie wieder in ihre ursprüngliche Ausrichtung zurückkehren, senden sie Radiowellen aus, die von hochempfindlichen Spulen aufgezeichnet werden. Vielfach wiederholt, lässt sich aus diesen Signalen am Computer ein Bild berechnen.



**Abb. 4** Folie aus dem Vortrag von Prof. Frahm. (Mit dem QR-Code das MRI-Video aktivieren.)

tischer Stresstest im Echtzeit-MRT genutzt werden, unter Messung der Flussgeschwindigkeiten des Blutes. Auch die Kartographierung der T1-Relaxationszeit in Millisekunden kann so zum Erkennen pathologischer Vorgänge im Körper beitragen.

Eine überraschende Entdeckung bzw. Erweiterung der Echtzeit-MRT hielt Prof. Frahm für das Publikum noch am Ende bereit: „Klinische Kollegen haben uns immer gefragt: Ihr messt ja nur eine Schicht, wir haben aber ein ganzes Organ, das wir untersuchen müssen. Könnt ihr nicht ein größeres Volumen abbilden mit der MRT-Methode? Und wir können das tatsächlich, auch wenn wir zehn Jahre gebraucht haben, um das zu realisieren. Wir machen hierfür einen Echtzeit-MRT Film eines Gewebes, wobei wir bei jedem Einzelbild die Schichtposition ein kleines Stück weiterbewegen, so dass es eine Serie von eng überlappenden Schichten gibt, die in weniger als 50 Millisekunden durch das Gewebe wandert. Damit können Sie dann größere Volumina in weniger als zehn Sekunden abbilden.“ (Abb. 4)

Im Vergleich zu klassischen, konventionellen 3D-MRT Bildern sind die auf diese Weise erzeugten Filme und Ergebnisse bewegungsresistent. „Die funktionieren auch dann, sollte sich der Proband zwischendurch mal bewegen. Selbst wenn man sich dann bewegt, bleibt das Bild trotzdem scharf. Bewegung würde eine normale 3D-Aufnahme aber völlig ruinieren. Deshalb sind auch von der Lunge trotz Atmungsaktivitäten des Patienten

scharfe Bilder möglich. Auch bei Kindern, die oft unruhig sind und im MRT sicher nicht dauerhaft stillhalten können, bietet sich daher das neue Verfahren an“, erläuterte Frahm (Abb. 4).

Für die frühkindliche Diagnostik an Säuglingen und Kleinstkindern ist die Methode nahezu ideal: Denn innerhalb von einer Minute kann so der ganze Kopf des Babys einmal durchleuchtet werden – ohne Anästhesie! Ein sowohl ökonomisches und logistisch reduziertes Vorgehen ist so möglich. Es führt zu Kosteneinsparungen und das Kleinkind wird nur minimal belastet, im Gegensatz zur Anästhesie. Auch ganze Gefäßsysteme im Körper lassen sich auf diese Weise schonend darstellen.

Fazit: „Entscheidend für die Medizin und die klinische Nutzung ist die enorme Zeitverkürzung und mehr Durchsatz an Messungen. Es kommt dabei immer auf den Kompromiss zwischen Bildschärfe und Geschwindigkeit der erzeugten Bilder an“, sagte Prof. Jens Frahm. Aktuell vermarktet das MPI das patentierte Verfahren in Eigenregie für ausgewählte Universitätskliniken und klinische Studien/Forschungen. Wann das neue Verfahren sich bei den MRT-Hersteller flächendeckend durchsetzen wird, ist aber aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren wohl nur noch eine Frage der Zeit.

[FLASH: Schnelle Bildgebung in der Magnetresonanztomographie (MRT) – [www.max-planck-innovation.de](http://www.max-planck-innovation.de)]

## MAKROMOLEKÜLE

### Zeitaufgelöste Röntgenkristallographie – Visualisierung von biologischen Molekülen „in Aktion“

**Dr. Petra Fromme** erhielt 1985 ihr Diplom in Biochemie an der Freien Universität Berlin, promovierte 1988 in Chemie und habilitierte sich in Physikalischer Chemie an der Technischen Universität Berlin. Sie war Assistenz- und außerordentliche Professorin am Max-Volmer-Institut, bevor sie als ordentliche Professorin an die School of Molecular Sciences der Arizona State University kam. Dr. Fromme ist assoziiertes Mitglied der Fakultät für Physik, Mitglied der Graduiertenfakultät in den Graduiertenprogrammen Pflanzenbiologie und Biologisches Design. 2014 wurde sie zur Direktorin des Zentrums für angewandte Strukturforschung ernannt. Dr. Fromme hat über 200 Artikel veröffentlicht und ist eine international anerkannte Expertin in der Photosynthese, der makromolekularen Kristallographie von Proteinen unter Verwendung von Synchrotrons und der Protein-Nanokristallographie unter Verwendung von XFELs. Die „Zeitaufgelöste Röntgenkristallographie“ stand daher auch im Mittelpunkt ihres Leipziger Vortrags (Abb. 1). Fromme vermittelte einen teils humorvollen Einblick in die Welt der freien Elektronenlaser und verpasste ihrem Vortrag den Untertitel „Star Wars in Kristallographie“. Aufmerksamen Zuschauern entging dabei nicht, dass sich auch ein gewisser Darth Vader mit einem gezückten Laserschwert auf einer ihrer Folien versteckte.

Sie verdeutlichte anschaulich: Das Rastertunnelmikroskop liefert faszinierende Bilder aus der Nanowelt. Durch einen Trick gelingt es, dieses Mikroskop empfindlich auf magnetische Signale zu machen und auf diese Weise neue Phänomene des Magnetismus auf atomarer Skala zu entdecken. Mithilfe hochintensiver und ultrakurzer Röntgenblitze können Wissenschaftler mit diesen Methoden sehr kleine Strukturen, wie etwa die

von einzelnen Molekülen, mit hoher Zeitauflösung untersuchen. Für solche Zwecke setzen Forschende weltweit seit wenigen Jahren sogenannte Freie-Elektronen-Laser (engl. *free-electron laser*, kurz FEL) ein. Diese Strahlungsquelle erzeugt eine Synchrotronstrahlung mit sehr hoher Brillanz. Da freie Elektronen keine festen Energieniveaus besitzen, ist die emittierte Strahlung kontinuierlich durchstimmbar.

Die Forscherinnen und Forscher im Team von Petra Fromme am Center für angewandte strukturelle Entdeckungen (*Applied Structural Discovery*) am Biodesign-Institut der Arizona State University entwickeln für dieses Forschungsgebiet neue, revolutionäre Techniken, um die Struktur und Dynamik von Biomolekülen aufzuklären: Die Ziele sind visionäre Entdeckungen in der Medizin und die bio-inspirierte Entwicklung von neuer Technik zur Energiegewinnung. „Wir wollen neue Biomoleküle entdecken und gewissermaßen einen Film drehen, wie Biomoleküle tatsächlich arbeiten“. Professor Fromme spricht dabei von *Molecular Movies*.

### **Künstliche Photosynthese ist nicht trivial**

Kann man Algen nutzen, um die Erderwärmung zu verringern? Welche Rolle spielt dabei die Photosynthese für Biomoleküle? Mit dieser Frage startete die Chemikerin ihren Vortrag. Ihr Forschungsinstitut deckt mit rund 100 Mitarbeitenden alle angewandten Forschungsbereiche ab, von Photosynthese über Krebsbiologie, Virologie bis hin zur Quantenphysik. „Wir haben sogar einen Beschleunigungsphysiker in unserem Team“, sagte sie.

Speziell die Photosynthese hob sie als zentrales Forschungsgebiet hervor. „Würden Außerirdische unseren Planeten besuchen, so wäre die Photosynthese der einzige Prozess, den die Aliens vom Welt- raum aus direkt sehen könnten. Und dieser Prozess hat unsere ganze Erde verändert. Die Photosynthese hat unseren Planeten vor 2,5 Milliarden Jahren durch die Produktion von Sauerstoff verwandelt. Die Lichtenergie der Sonne wird eingefangen, in Energie umgewandelt, die dann benutzt wird, um CO<sub>2</sub> in Biomoleküle umzuwandeln“, beschrieb sie die große Bedeutung der natürlichen Photosynthese für uns und die Erde.

Dadurch wurden der Atmosphäre im Laufe der Jahrtausende enorme Mengen Kohlendioxid entzogen und dauerhaft fixiert, bis der Mensch dazu überging, das Kohlendioxid durch Verbrennen fossiler Rohstoffe wieder in die Atmosphäre zu bringen – mit den entsprechenden klimatischen Veränderungsprozessen als Folge. „Der menschengemachte Klimawandel ist dann letztlich nur die Konsequenz unseres Tuns. Wir erzeugen CO<sub>2</sub> viel schneller, als durch die natürliche Photosynthese wieder eingefangen werden kann. Daher die globale Erwärmung, daher der Klimawandel“, benannte Fromme unser grundlegendes Problem. Daher arbeitet ihr Team intensiv an der künstlichen Photosynthese, um effiziente und stabile Prozesse und Systeme zur Reduzierung des anthropogen erzeugten Kohlendioxids zu entwickeln. Doch das ist keineswegs trivial, denn die Natur hat einige Zeit benötigt, um die natürliche Photosynthese zu optimieren. „Die Photosynthese findet in Pflanzen tief in den Blättern statt und wird durch komplexe Biomoleküle, Proteine, katalysiert. Das sind riesige biomolekulare Komplexe oder Biomachines, die das Sonnenlicht einfangen und in chemische Energie umwandeln“, erklärte Fromme dem Publikum. Und genau um die Erforschung dieser faszinierenden Biomachines geht es bei ihren Forschungsarbeiten. Das Ziel ist ein genaues Verständnis des Funktionsmechanismus dieser Moleküle. Und dazu muss man in deren tiefstes Inneres schauen.

### **Photosystem I + II: Hochkomplexe Biomachines**

Als Beispiel hob sie das Photosystem I hervor, eine hochkomplexe und hocheffiziente Biomachine bestehend aus 36 Proteinen und 381 Pigmenten wie Chlorophyll, aber auch Carotin, die Lichtenergie in elektrische Energie umwandeln – im Prinzip also eine natürliche Photovoltaik-Anlage, die quasi jedes Photon, was auf den Komplex trifft, nutzen kann. Und zwar sehr effizient mit einer Quantenausbeute von 99,99 %. „Es dauerte 13 Jahre, um die erste Struktur von Photosystem I mit klassischer Röntgenkristallografie zu entschlüsseln. Das Ziel ist es, neue Techniken zu entwickeln, um die atomare Struktur und Dynamik von großen Bio-



**Abb. 1** Prof. Dr. Petra Fromme. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

molekülen schneller und besser aufzuklären“, beschrieb Fromme den immensen zeitlichen Aufwand auf der Forschungsseite mit konventionellen Untersuchungsmethoden.

Für die Strukturaufklärung mussten dafür die Strukturen zunächst eingefroren werden in Form großer Kristalle, die zuvor aus Nanokristallen erzeugt wurden. „Das war notwendig, um die Strahlungsschäden minimieren zu können, denn die katalytischen Systeme im Photosystem I reagieren hochempfindlich auf Röntgenstrahlung“, sagte Petra Fromme. Auf diese Weise erhielt man allerdings immer nur statische Systeme, also Momentaufnahmen des Systems. „Von einem bewegten Ablauf der Photosynthese waren wir da noch weit weg. Also erschien es uns sinnvoll, die Nanokristalle direkt zu analysieren und zu beobachten, etwa wie der Elektronenfluss durch die Membranen der Biomoleküle während der Photosynthese erfolgt“, beschrieb Fromme die Motivation für ihre Forschung.

Für den evolutionären Sprung bei der Untersuchung der Photosysteme war der Einsatz von Freien Elektronenlasern, etwa XFEL bei der DESY in Hamburg, entscheidend. Mit ihrem Team in Arizona hatte Fromme mit ihrem Team schon seit 2003 an Methoden gearbeitet, um mit freien Elektronenlasern chemische Reaktionen in Biomolekülen beobachten zu können: „Man braucht dazu keine tiefen Temperaturen mehr und muss keine großen Kristalle mehr züchten, es reichen ein paar wenige Nanokristalle zur Beobachtung.“

Doch eine große Hürde musste zunächst überwunden werden: Die Röntgenpulse bei diesen Lasern haben so eine hohe Energie, dass nicht nur die Biomolekülstrukturen zerstört werden, sondern ganze Atome wie Kohlenstoff innerhalb von Femtosekunden explodieren und pulverisiert werden. Alle Atome im Molekül stoßen sich durch den Beschuss ab und es kommt zu einer Explosion. „Gegen diesen feinen Superelektronenlaserstrahl, der jedes Material zerstört, ist das Lichtschwert von Darth Vader Peanuts“ sagte sie schmunzelnd genau an der Stelle, als der ikonische Bösewicht aus dem „Krieg der Sterne“-Imperium auf einer Folie auftauchte (Abb. 2).

„Ziel ist aber eine zerstörungsfreie Beobachtung der Strukturen mit XFEL. Der Trick ist nun, schneller zu sein, als die Explosion, um ein Bild des Moleküls vor seiner Zerstörung zu erhalten. Logischerweise kann man jedes Molekül nur einmal verwenden“, erklärte die Chemikerin. An der Lösung dieses Problems haben Fromme und ihr Team seit 2003 intensiv geforscht.

Eindrucksvoll sind dabei die Dimensionen, in denen bei dieser Forschung gearbeitet wird: „Eine Femtosekunde sind  $10^{-15}$  Sekunden - eine extrem kurze Zeit für eine sinnvolle Beobachtung. Der Unterschied zwischen einer Femtosekunde und einer Sekunde ist so wie der Unter-

schied zwischen einer Sekunde und 32 Millionen Jahre. Man hat zwar mit XFEL  $10^{12}$  mal mehr Photonen zur Verfügung als bei den stärksten bisherigen Synchrotrons, aber auch  $10^{15}$  mal weniger Zeit im Vergleich zu bisherigen Röntgenstrahlquellen“, beschrieb Professor Fromme.

Das war das große Problem, das es zu lösen galt. Man bekommt aber dennoch nur einen Schnappschuss von jedem Molekül, bevor es pulverisiert wird. All diese Gegenargumente machten eine Finanzierung der der Forschung schwierig, betonte Fromme in ihrem Vortrag. „Sie sehen doch nichts, Sie haben nur ein Bild zur Strukturbestimmung, wie soll das gehen“, schlug ihr in den Förderanträgen immer als Gegenargument entgegen. „Die Fördergeld-Entscheider hielten uns bisweilen für verrückt. 2009 haben wir es dann dennoch mit dem ersten Experiment an XFEL gewagt. Wir kamen mit dem Komplex Photosystem I ins Labor, um es im freien Elektronenlaser zu diffraktieren. Es wurde bis dahin zunächst für unmöglich gehalten, ein so großes Molekül direkt einzusetzen.“ Doch es gelang.

Dieser Moment gilt als Geburt der Femtosekunden-Kristallographie, denn es konnten vom Photosystem I-Komplex rund drei Millionen Diffraktionsbilder bzw. Beugungsbilder aufgenommen werden, bevor die Zerstörung durch die Röntgenstrahlen einsetzen konnten (Abb.

3). Die Beugungsbilder entstehen durch Röntgendiffraktion, also durch die Beugung von Röntgenstrahlen an den geordneten Kristallstrukturen. „Die Bilder kamen rein wie ein Feuerwerk, so ein Gefühl hatte ich beim Betrachten der Bilder. Die Molekül-Bilder erinnern dabei an Galaxie-gleiche Strukturen“, sagte Fromme.

Und es zeigte sich, dass die kleinen Kristalle viel besser strukturiert sind, als jene Riesenkristalle, die früher für die Analyse aus den kleinen Kristallen aufwendig gezüchtet wurden. „Man hätte also schon früh viel Zeit einsparen können“, analysierte die Wissenschaftlerin. Auch am größten XFEL, dem europäischen XFEL in Hamburg, der seit 2017 in Betrieb ist, hat ihr Team bereits Untersuchungen am Photosystem I durchgeführt und die erste Raumtemperaturstruktur bei 2,9 Å ermittelt. Alle anderen Strukturen bis dahin waren immer eingefroren!

Dabei machte das Forscherteam eine erstaunliche Beobachtung: „Bei Raumtemperaturen zeigt sich im Photokomplex eine fluktuierende Struktur und keineswegs symmetrische Struktur, wie die eingefrorenen Bilder bislang immer vermittelten. Die Standardstrukturanalyse ist also fehlerbehaftet und zeigt nicht die ganze Strukturwahrheit. Da ist eine enorme *Action* im System“, vermittelte Fromme dem Publikum.

Aktuell plant sie die Erstellung eines „*Molecule Movie*“ mit 250 Bildern, um den katalytischen Vorgang bei der Photosynthese im Photosystem I veranschaulichen zu können, wobei für jedes Bild (mit Molekülstruktur) 30.000 Diffraktionsbilder notwendig sind. „Daraus ergibt sich dann eine Ewald-Sphäre oder Ewald-Kugel der Reflektionen, und diese Sphäre der Reflektionen gleicht einer Galaxie. Um die Struktur des Moleküls bestimmen zu können, muss jeder Reflex und dessen Intensität analysiert werden“, beschrieb Petra Fromme.

### Dem Geheimnis der Wasserspaltung auf der Spur

In einem zweiten Photosystem will sie mit ihrem Team das Geheimnis der Wasserspaltung entschlüsseln. Das Photosystem II erzeugt bei der Wasserspaltung Sauerstoff als Abfallprodukt, entscheidend für die Pflanze sind die bei Spaltung

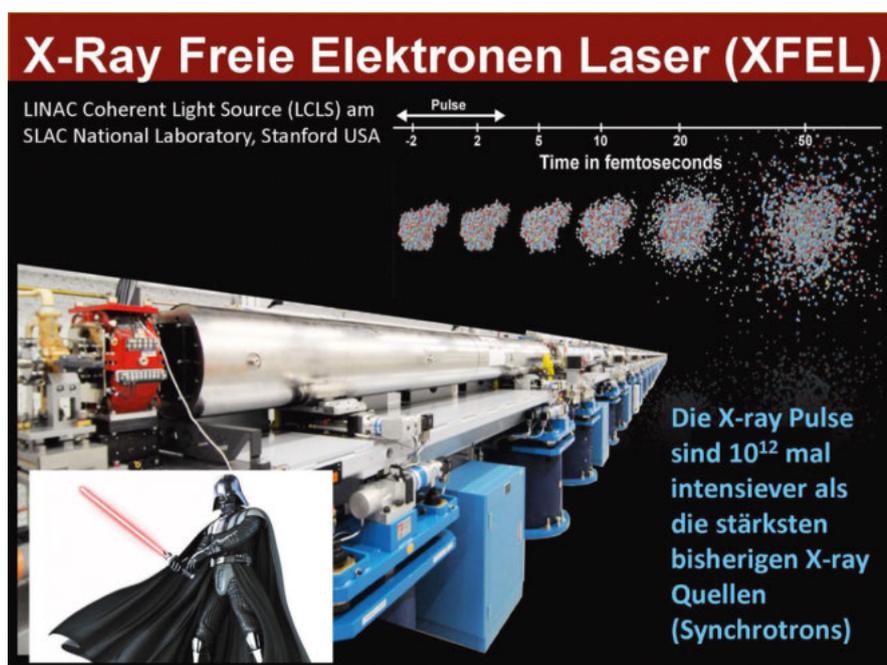


Abb. 2 Folie aus dem Vortrag von Prof. Fromme.

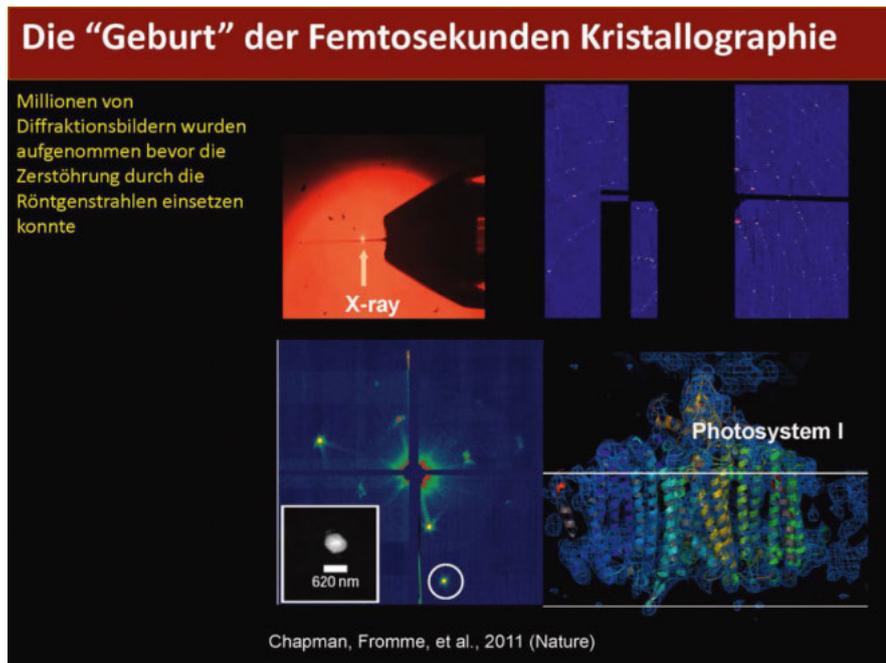


Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Fromme.

erzeugten Elektronen. Genau diese Elektronentransferkette im Photosystem II wurde inzwischen untersucht (Abb. 4).

Das magische Katalysezentrum bzw. das Herz für die Wasserspaltung ist ein Mangan-Calcium-Komplex ( $Mn_4CaO_5$ ). „Wir wollen den Moment der Wasserspaltung im Komplex festhalten und einen Snapshot mit Hilfe des freien Elektronenlaser drehen“, sagte Fromme. Die wichtigen Experimente hierzu fanden im Mai 2022 am EuXFEL in Hamburg statt. Dafür erzeugten die Wissenschaftler aus Algen-Pflanzenzellen als Grundlage millionenfach Nanokristalle des Photosystems II. „Diese Kristalle zeigen das gleiche Verhalten wie die natürlichen Pflanzenzellen, erzeugen bei Beschuss mit Photonen also sofort Sauerstoff, was bei den Aufnahmen auch erkennbar ist. In der Natur überlebt dieses Photosystem II im Tageslicht allerdings keine halbe Stunde. Es muss immer wieder von der Pflanze ersetzt werden und dafür geht mindestens die Hälfte der Energie drauf, die die Pflanze zum Leben benötigt. Die Natur hat es in 2,5 Milliarden Jahren noch nicht geschafft, ein stabileres System zu erzeugen, weil das System eine extreme Reaktion katalysiert“, betonte Professor Fromme die besondere Herausforderung bei diesen Untersuchungen. Aber sie verfolgt damit ein großes Ziel: „Sollten wir die Geheimnisse der Wasserspaltung in diesem

lebenswichtigen Komplex entschlüsseln, gelingt es uns vielleicht, ein solches System stabiler zu bauen. Wir müssen also das Photosystem II optimieren, wenn wir in Zukunft mit Algen das  $CO_2$ -Problem bewältigen wollen.“ Und dann kann man möglicherweise wirklich Algen nutzen, um die Erderwärmung zu verringern.

Ein weiteres Themenfeld ihrer Forschung ist die Untersuchung von Antibiotika-Resistenzen, einer nicht-lichtgetriebenen Reaktion (im Gegensatz zu den

Photosystemen). „Mit Hilfe der zeitaufgelösten Röntgenkristallographie können Übergangszustände bei katalytischen Reaktionen gezeigt werden. Und wir können Bindungsverläufe zwischen den beteiligten Molekülen und Verbindungen sehen, von denen man sich bisher keine Vorstellungen machen konnte oder auch nur erraten konnte, wie das funktioniert“, sagte Fromme. Sie hofft, dass man dadurch vielleicht bald bessere und stabilere Antibiotika finden kann, die nicht mehr an die katalytischen Aminosäuren binden und dadurch nicht so schnell ihre Wirksamkeit verlieren, weil sie nicht mehr vom Enzym gespalten werden können.

Ebenfalls im medizinischen Forschungsbereich laufen Untersuchungen zum Coronavirus. Das sogenannte NendoU (*Endonuclease NP15*) versteckt das Coronavirus vor dem Immunsystem. „Man ist schon infiziert und trägt das Virus mit sich herum, ohne es zu wissen. Diesen Verschleierungsmechanismus zu analysieren, soll ebenfalls umgesetzt werden, um diese Verschleierung auf Dauer zu verhindern“, beschrieb Petra Fromme. Dazu wurde im freien Elektronenlaser bei Raumtemperatur die Struktur von NendoU bestimmt, um neuralgische Angriffspunkte entdecken und die katalytischen Zonen (aktive Zonen) bestimmen zu können.

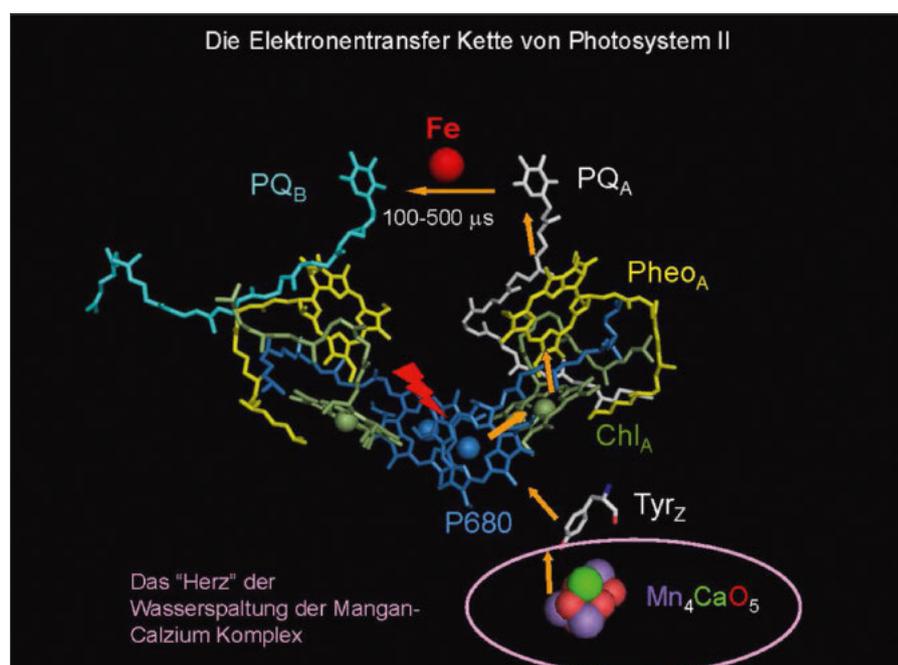


Abb. 4 Folie aus dem Vortrag von Prof. Fromme.

### Geschrumpfte XFEL-Anlagen sparen Zeit und Geld

Das große Problem bei allen Forschungsbereichen ist aber: lange Wartezeiten und nur kurze Messzeiten. „Derzeit gibt es weltweit nur fünf große Freie-Elektronen-Röntgenlaser, so dass jeweils nur fünf Experimente durchgeführt werden können. Und man kann immer nur wenig Messzeiten bekommen. Das muss jahrelang vorher angemeldet werden.“

Die Lösung für mehr Mess- und Experimentierzeiten sind daher kompakte, kostengünstige XFEL-Anlagen, die statt 1,5 Kilometer nur noch 10 Meter lang sind und auf die messtechnischen Anforderungen genau angepasst sind. Schöner Nebeneffekt: Eine kompakte Anlage spart neben Zeit auch Geld, denn statt ein paar Milliarden Dollar, wie ein großer XFEL, kostet der kleine Ableger dann vielleicht nur 20 Millionen Dollar.

Daher haben sich Prof. Fromme und ihr Team in den vergangenen Jahren intensiv mit dem Schrumpfen einer XFEL-Anlage beschäftigt und in Eigenregie einfach selber eine kompakte Anlage für ihre Bedürfnisse gebaut. Der erste kompakte CXFEL in den USA basiert auf der Kollision von den Elektronen mit einem ultrastarken infraroten Laserblitz, ist also im Gegensatz zu den Magnet-basierenden XFELs ein Laser-basierender XFEL. Der kompakte Beschleuniger soll noch einmal 100-mal schneller sein (Attosekunden-auflösend): „Das ist ein Aufbruch in eine neue Dimension, schneller als alle elektronischen Prozesse. Der Unterschied zwischen einer Attosekunde und einer Sekunde ist wie eine Sekunde zu 32 Milliarden Jahre. Da geht es dann wirklich in Grenzbereiche, die noch kein Mensch je gesehen hat“, betonte Fromme begeistert.

Der neue Beschleuniger ist gewissermaßen Marke Eigenbau. Unter starker Mitarbeit der Studenten der Arizona State University (ASU) wurde der Mini-XFEL konzipiert und entwickelt. Der erste Elektronenstrahl wurde Ende 2021 erzeugt, der erste freie X-Ray folgte Ende 2022. Somit könnte die Erforschung von Biomolekülen zeitlich bald komplett unabhängig von den Giganten-XFELs auf der Welt sein. Der XFEL bei der ASU soll aber nicht nur für biologische Prozesse, Molekular-

biologie oder Medizin genutzt werden, sondern auch bei der Materialforschung und Entwicklung helfen (Materialwissenschaften), er soll für Astrophysik, erneuerbare Energien und Quantencomputing genutzt werden. [1]

Der kompakte Freie-Elektronen-Röntgenlaser (CXFEL), der derzeit an der Arizona State University entwickelt wird, wird der weltweit erste seiner Art sein. Es wird Röntgenpulse liefern, die so kurz sind, dass sie alle Röntgenschadensprozesse überholen. Infolgedessen können Wissenschaftler neuartige Wissenschaft betreiben, um die Struktur und Dynamik von Natur und Materialien wie nie zuvor zu erforschen. Der CXFEL bringt ultrakurze Röntgentechnologie von großen, teuren Multimilliarden-Dollar-XFEL-Anlagen in nationalen Labors an die Universität – den Ort, an dem Forscher mit ihren Studenten zu einem Bruchteil der Kosten an neuartigen Entdeckungen arbeiten.

Der ASU CXFEL hat das Potenzial, ein Kraftmultiplikator für die Entdeckung zu sein. „Die CXFEL-Technologie könnte eines Tages zur Installation an anderen Standorten zur Verfügung gestellt werden, um Wissenschaftlern und medizinischen Forschern in Hochschulen, Industrie und Medizin Zugang zu brillanten Röntgenstrahlen in ihren eigenen Labors zu verschaffen und so die wissenschaftliche Entdeckung wie nie zuvor zu beschleunigen und zu erweitern“, zeigte sich Petra Fromme in ihren Vortrag überzeugt.

Das Projekt ist aus ihrer Sicht ein Paradebeispiel für kompromisslosen Forschergeist, und CXFEL kann vieles ermöglichen, etwa Filme von Biomolekülen in Aktion. Die Visualisierung der Bindung von Medikamenten an Rezeptoren auf der Oberfläche einer Krebszelle könnte die Entwicklung neuer Medikamente mit spezifischerer Bindung und weniger Nebenwirkungen vorantreiben. Und in der Material- und Quantenwissenschaft könnte die Methode zur Entschlüsselung des Mechanismus der Supraleitung von Quantenmaterial und zu einer verlustfreien Übertragung von Energie über große Entfernungen führen.

[1] Arizona State University (ASU) . CXFEL | ASU Biodesign Institute|

### COMPUTER VISION

## Bildanalyse und Bildverstehen für das autonome Fahren

**Prof. Stefan Roth, Ph.D., ist seit 2007 am Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt tätig, zunächst als Juniorprofessor und seit 2013 als Professor. Er leitet das Fachgebiet Visuelle Inferenz, die Darmstadt Unit des European Laboratory for Learning and Intelligent Systems (ELLIS) und ist Sprecher des Forschungsfeldes Information+Intelligence (I+I) der TU Darmstadt. Er forscht im Bereich der Computer Vision mit maschinellen Lernverfahren u.a. an visuellem Szenenverstehen, Bewegungsschätzung, Bildrekonstruktion sowie tiefen neuronalen Netzwerken. In Leipzig fokussierte er sich in seinem Vortrag „Bildanalyse und Bildverstehen für das autonome Fahren“ auf die automatische, semantische Analyse von Verkehrsszenen anhand von Onboard-Kameras, das tiefe Lernen in neuronalen Netzen, und wie sinnvoll und effektiv Datengewinnung als Futter für die Künstliche Intelligenz (KI) betrieben werden kann. Er veranschaulichte dem Publikum, dass beim autonomen Fahren schon viele Hürden gemeistert werden konnten, die Methode als Alternative zum konventionellen Autofahren aber noch weit entfernt ist von einem flächendeckenden und sicheren Einsatz, da es noch viele Herausforderungen gibt.**



**Abb. 1** Prof. Stefan Roth, Ph.D. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

Autonomes Fahren ist aus Sicht von Prof. Roth auch ein Robotikproblem, denn letztlich bewegt sich beim autonomen Fahren ein Roboterauto durch die Gegend. Daher stieg er zunächst mit einem Vergleich zu den klassischen Industrierobotern ein. Diese sind im Vergleich zum autonom fahrenden Auto für Informatiker eher uninteressant, denn in diesem Anwendungsfeld geht es nur um eine einzelne, eingegrenzte Aufgabe in einem festen, definierten Umfeld. Es gibt kaum oder keine Flexibilität und Adaption, in der Regel müssen Menschen außerhalb der Gefahrenzone bleiben und es ist zur Erfüllung der programmierten Aufgaben kaum bis keine KI notwendig. „Bei Saugrobotern oder Mährobotern für zu Hause ist schon etwas mehr KI drin, es ist aber auch hier keine spezielle Programmierung notwendig, da es ähnlich wie beim Industrieroboter nur um eine einzelne, eingegrenzte Aufgabe in einem festen, definierten Umfeld geht, in dem immerhin gewisse Hindernisse vom Roboter erkannt werden müssen“, verglich Roth.

Während also ein Mähroboter auf einer fest strukturierten Umgebung – der abgesteckten zu mähenden Rasenfläche – unterwegs ist, sind das Straßenumfeld und der Verkehr auch regional und länderspezifisch sehr unterschiedlich und damit eine sehr große Herausforderung für den fahrenden Autoroboter: Nicht nur bzgl. der wechselnden Verkehrssituationen (dichter Verkehr, Straßenglätte, Regen), sondern auch hinsichtlich der verschiedenen Umgebungen (Stadt, Land, Autobahn, Gebirge) und Tag- oder Nachtumgebung. „Das autonome Fahren ist eine spezielle, einzelne, diverse Aufgabe in einem diversen, sich ständig verändernden Umfeld, die ein hohes Maß an Flexibilität und Adaption verlangt. Daher sind für diesen Bereich KI und Wahrnehmung und Erkennen der Umwelt essentiell“, erklärte Prof. Stefan Roth.

### Semantische Bildsequenzierung muss gelernt werden

„Mein Fokus liegt auf dem bildverarbeitenden Kamerasystem und die semantische Bildsequenzierung. Damit ein autonom fahrendes Auto sicher durch eine Umgebung steuern kann, wird die von der Onboard-Kamera aufgenommene



Abb. 2 Folie aus dem Vortrag von Prof. Stefan Roth, PhD.

Straßenszene oder Verkehrsszene sequenziert, z. B. in Straße, Auto, Gebäude, Bäume etc. Das Bild wird also in seine semantischen Bestandteile zerlegt. Das reicht aber nicht aus, denn unsere Welt ist dreidimensional und in Bewegung. Deshalb spielt auch die Bewegungs- und Geometrieschätzung eine wesentliche Rolle beim autonomen Fahren“, beschrieb Roth die Anwendungsgebiete, auf denen er mit seinem Forscherteam aktuell arbeitet. Er fragte das Publikum: „Wie kann ich beispielsweise aus mehreren aufgenommenen und überlagerten Kamerabildern die Tiefe, also die Entfernung zum nächsten Objekt oder Bildpunkt schätzen? Denn das ist essentiell, um zu erkennen, ob etwa Hindernisse auf meiner Straße liegen. Wir wollen und müssen natürlich vermeiden, dass unser Fahrzeug auf Kollisionskurs mit anderen Fahrzeugen oder Verkehrsteilnehmern ist. Wir müssen also verstehen und erkennen, was sich in der entsprechenden Verkehrsszene bewegt – und zwar vorausschauend bewegt. Das sind aber nur zwei von vielen visuellen Wahrnehmungsaufgaben, die wir berücksichtigen müssen, um autonomes Fahren zu realisieren. Auch die extrem spannende Fahrwegplanung ist eine sehr große Aufgabe, auf die ich heute aber nicht eingehen kann, das wäre ein Vortrag für sich“, veranschaulichte der Informatiker die Komplexität beim autonomen Fahren.

Aber wie funktioniert die Bilderkennerung und Bildanalyse beim autonom fahrenden Auto? Dazu erklärte Prof. Roth zunächst das wichtige Prinzip der neuronalen

Netze, die das Arbeitspferd der Künstlichen Intelligenz sind: „Ein neuronales Netzwerk in der Bildanalyse nimmt ein Bild z.B. eines Motorrollers auf und macht daraus eine zweidimensionale Matrix an Bildwerten. Über verschiedene Informationsprozesse und semantische Interpretationen der Bildwerte schätzt das System am Ende ab, was auf dem Bild zu sehen ist. Dazu sind natürlich Erfahrungswerte wichtig, um etwa einen Motorroller von einem Fahrrad oder E-Scooter unterscheiden zu können“, so Stefan Roth. Grob vereinfacht besteht ein neuronales Netz aus einer Eingabeschicht (das sind die einzelnen Bildpunkte eines Bildes), einer verdeckten Schicht (dort werden die einzelnen Bildpunkte gewichtet und neu verknüpft) und einer Ausgabeschicht (also das, was das System in der verdeckten Schicht linear interpretiert hat).

Bei einem tiefen neuronalen Netzwerk sind entsprechend viele dieser neuronalen Schichten übereinander gelagert (Abb. 2). Um die Bildpunkte richtig gewichten, schätzen und interpretieren zu können, muss das System lernen – und dazu muss es mit Daten gefüttert werden, führte Prof. Roth weiter aus. „Wir wollen dem System auch beibringen, was wir Menschen denken, was auf dem Bild zu sehen sein soll, wir sprechen vom überwachten Lernen. Das neuronale Netz wird hierfür millionenfach mit annotierten Bildern gefüttert.“

Das „Überwachte Lernen“ benötigt darüber hinaus noch Aspekte wie Fehlerregulierung/Fehlerfunktionen, Lernver-



Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Stefan Roth, PhD.

halten etc. „Man braucht sehr viel Detailwissen, um neuronale Netze erfolgreich trainieren zu können. Vor allem haben solche Netze einen riesigen Hunger auf Daten. Und je mehr Schichten ein solches Netz hat, desto mehr Parameter werden ausgewertet und entsprechend mehr Daten benötigt es“, erklärte Roth anschaulich.

**Teil 1: Semantische Segmentierung – Wie können wir den Hunger auf Daten stillen?**

„Wir haben 2016 mit Hilfe des CityScape-Datensatz Daten für über 30.000 Straßenszenen erhoben. Dazu wurden in 50 Städten verschiedene Straßenszenen aufgenommen und dokumentiert, die möglichst repräsentativ das Verkehrsgeschehen in deutschen Städten zeigen und charakterisieren. Aus den 30.000 Szenen wurden dann 5000 Bilder annotiert, also jedem Bildpunkt wurde die semantische Klasse zugeordnet“, sagte Roth (Abb. 3). Mit einer speziellen Zuordnungstechnik (polygone Annotation) hatte die Auswertung und Zuordnung dennoch immerhin 1,5 Stunden pro Bild gedauert, also in Summe über 300 Tage. Die Genauigkeit der Bilderkennung, also die Genauigkeit des Datensatzes, liegt bei mittlerweile rund 85 %.

„Das ist ordentlich, aber noch weit weg von 100 %. 5000 annotierte Bilder sind zwar viel, aber vielleicht noch nicht ausreichend genug“, sagte Stefan Roth selbstkritisch. „Ein weiteres Problem ist, dass unsere Daten nicht komplett repräsentativ sind. 50 deutsche Städte können nat-

türlich nicht für die ganze Welt stehen, also müssten wir eigentlich Bilder aus der ganzen Welt einspeisen, was akademisch im Zuge einer Forschungsarbeit aber nicht darstellbar ist“, schränkte er ein. „Können wir daher mehr Daten ohne signifikante Kosten bekommen? Ja, mit Hilfe von Computerspielen. Wir haben zusätzlich 25.000 Bilder bzw. Computergrafiken aus Computerspielen mit Straßenszenen extrahiert. Die Szenen sind teilweise so realistisch, dass sie echten Straßenszenen schon beachtlich nahekommen.“

Durch einen speziellen Zugriff auf die Hintergrunddaten der erzeugten Computergrafiken konnten die Forscher diese Bilder rund 800-mal schneller annotieren als bei den echten Bildern, und entsprechend viel mehr Daten sammeln. „Allerdings war der Zuwachs von vier Prozentpunkten bei der Genauigkeit nicht atemberaubend. Da die Computerbilder nicht

ganz realistisch sind, gibt es einen *Domain Gap*, eine Domain-Lücke, die es zu überwinden gilt. Was wir hierbei machen, ist eine unüberwachte Domänen-Adaptation (UDA). Wir wollen aus echten Bildern ohne Annotation semantische Karten schätzen. Dazu trainieren wir das Netz mit gelabelten synthetischen Daten. Wir trainieren das neuronale Netz auf synthetische Daten und wollen es dann auf echte Daten anpassen. Mit dieser Methode lassen sich Konturen in Bilder schärfen, die Umgebung der Szenerie wird präziser, die Genauigkeit dadurch nochmals erhöht, das Bild kann also noch besser klassifiziert werden.“

Trotz zahlreicher Fortschritte auf dem Gebiet der Bilderkennung und Bildanalyse gibt es aus Sicht von Prof. Roth aktuell drei große Herausforderungen:

- **1. Open-world-Problem:** Ein Koffer liegt auf der Straße. Was macht das Fahrzeug dann in dieser Situation? „Wenn wir neuronale Netze trainieren, nutzen wir zahlreiche Kategorien semantischer Art, also ein festes Vokabular. Aber es können natürlich immer neue Situationen dazukommen, die wir noch nicht auf dem Schirm haben. Ein Koffer auf der Straße gehört erstmal nicht dazu.“
- **2. Schwierige Sichtbedingungen:** Es gibt nicht nur schönes Wetter, sondern auch mal Regen, Schnee, Nebel, Dunkelheit etc. „Bei einer verschneiten Straßen-Szenerie kann es schwierig sein, zu erkennen, wo etwa der Bürgersteig anfängt. Da ist noch viel Forschungsarbeit notwendig, damit das



Abb. 4 Folie aus dem Vortrag von Prof. Stefan Roth, PhD.

autonom fahrende Auto solche Situationen problemlos erkennen, analysieren und die richtigen Entscheidungen treffen kann.“

- **3. Adversarial Attacks:** *Adversarial Attacks* sind Angriffe auf maschinelle Lernmodelle und Systeme, die darauf abzielen, deren Leistung zu beeinträchtigen oder zu täuschen. Sie sind eine große Herausforderung bei kritischen Anwendungen wie der Gesichtserkennung oder dem autonomen Fahren. „Wenn ich ein Bilderkennungsnetz auf diese Weise irreführen kann, dann kann das logischerweise gerade beim autonomen Fahren große Probleme mit sich bringen. Vor allem bei der Verkehrszeichenerkennung sind solche adversarial Attacks denkbar und möglich. Weltweit wird natürlich daran geforscht, die Netze vor solchen Angriffen noch besser zu schützen, aber es wird immer wieder jemand versuchen, das System zu unterwandern“, so Roth.

## Teil 2: Bewegungsabschätzung

Am Ende seines Vortrags ging Prof. Stefan Roth noch auf das Thema Bewegungsabschätzung ein. „Um gewährleisten zu können, dass sich ein autonomes Fahrzeug sicher durch den Straßenverkehr bewegt, muss das neuronale Netz Bewegungen von Objekten erkennen und sicher den optischen Fluss schätzen können, also die Bewegung an jedem Bildpunkt. Wir müssen also für jeden Bildpunkt einen Bewegungsvektor bestimmen. Hierzu wird mit einer Farbkodierung gearbeitet, von grün für stehend bis rot für schnelle Bewegung. Wir verwenden hierfür das Verfahren *Iterative Residual Refinement*, eine Art iterative Schätzung.“

Gearbeitet wird derzeit intensiv am 3D-Szenenfluss: Aus monokularen Eingabebildern (Abb. 4) und einer 3D-Visualisierung der geschätzten Tiefe im Bild, also der geschätzten Entfernung zur Kamera des Autos, entsteht eine 3D-Visualisierung des geschätzten Szenenflusses. Fahrzeuge die sich vom Auto wegbewegen oder auf das Auto zubewegen, werden dann an unterschiedlichen Farbcodes erkannt. „Das hilft uns auch bei der Lösung des *Open-World-Problems*. Wenn

das Netz die Entfernung und Bewegung sich unabhängig bewegender Objekte weiß, ist es dem System an sich egal, ob da ein Koffer oder etwas anderes auf der Straße liegt. Es wird als Objekt erkannt, über das ich besser nicht fahren sollte, und das Fahrzeug kann reagieren“, beschrieb Stefan Roth.

Sein Vortrag machte deutlich, dass die Netzwerk-Architektur für das autonome Fahren ein sehr anspruchsvolles Forschungsfeld ist. Denn es gibt kleine und große Objekte, schnelle und langsame Bewegungen, die allesamt berücksichtigt und vom Netz gelernt werden müssen. Eine Forschung, bei der noch viele Herausforderungen auf die Informatik-Community warten. Wann es soweit ist mit dem autonomen Fahren, darauf wollte sich Stefan Roth aus guten Gründen zeitlich nicht festlegen, da es noch viele Hürden zu überspringen gilt.

## BIOMOLEKÜLE

### Nanomaschinen bei der Arbeit: Simulation der Atombewegung biomolekularer Systeme

**Prof. Dr. Helmut Grubmüller ist Honorarprofessor für Physik an der Universität Göttingen (seit 2005), sowie Direktor und Wissenschaftliches Mitglied am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften – vormals Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie – in Göttingen (seit 2003). Neue Konzepte der statistischen Mechanik, quantenhybride Methoden und effiziente parallele Simulationsalgorithmen und -codes sind die methodischen Schwerpunkte seiner Forschung. Ihn beschäftigen dabei Fragen wie: Wie erfüllen bestimmte Proteine ihre Funktion? Welcher Mechanismus steckt hinter diesen „Nanomaschinen“? Wie können wir diese hochkomplexen und unregelmäßigen Biomoleküle theoretisch effizient und richtig als Vielteilchensysteme beschreiben? Fortschritte im Verständnis der Physik von Proteinen ermöglichen verbesserte und realistischere Simulationstechniken, die es er-**



**Abb. 1** Prof. Dr. Helmut Grubmüller am Podium in Leipzig. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

**lauben, eine wachsende Anzahl biochemischer Prozesse im Detail zu untersuchen. Durch die Analyse gut verstandener Mechanismen kann man lernen, relevante Aspekte in der Proteindynamik von irrelevanten zu trennen – was Voraussetzung für die Konstruktion effektiver Proteinmodelle ist. In seinem GDNÄ-Vortrag „Nanomaschinen bei der Arbeit: Simulation der Atombewegung Biomolekularer Systeme“ gab Grubmüller einen Überblick über die gegenwärtigen technischen Möglichkeiten, unseren heutigen Kenntnisstand und über das, was es für unsere Zukunft bedeuten könnte. Mit Beispielen wie dem kleinsten Motor der Welt, einer Nano-Wasserpore und dem Wirkmechanismus ribosomaler Antibiotika veranschaulichte er eindrucksvoll, wie diese Miniaturmaschinen funktionieren – und wie wir ihren Tricks auf die Schliche kommen.**

In der Vorankündigung im GDNÄ-Programmheft schrieb Prof. Grubmüller: „Wir alle stehen staunend vor der außerordentlichen Artenvielfalt und Komplexität, welche die Evolution vom Einzeller bis zu den höheren Tieren und zum Menschen innerhalb von etwa ein bis zwei Milliarden Jahren hervorgebracht hat. Wir sind fasziniert von den uns vertrauten und sehr komplexen und hochspezialisierten Organen – wie Auge, Muskeln, Gehirn – alles ‚Apparate‘, die ihre Funktion bemerkenswert optimal verrichten. Dennoch hatte die Evolution ihre ‚Hauptarbeit‘ bereits beim Einzeller geleistet: Oh-

ne mindestens ebenso hochspezialisierte ‚Nano-Maschinen‘ – den Proteinen – wären nicht einmal Mikroorganismen überlebensfähig. Computersimulationen der Bewegung und Dynamik der Atome, aus denen die Proteine bestehen, helfen uns zu verstehen, wie diese kleinen Wunderwerke funktionieren. Wir beginnen zu erkennen, dass die Evolution schon vor langer Zeit molekulare Elektromotoren, Chemiefabriken, Photozellen, Transformatoren, Akkumulatoren, ‚Castor‘-Transporter und Sensoren hervorgebracht hat.“

**Wenn ein UFO im Garten landet**

Gleich zu Beginn warnte Grubmüller in seinem Vortrag davor, dass es sich bei den gezeigten Bildern nicht um Bilder echter Objekte, sondern um Simulationen handelt, also um Bilder von Modellen. „Und es kommt noch schlimmer, denn die Simulationen wurden auch noch von einem Hochleistungsrechner erstellt. Und es scheint die Tendenz zu geben, entweder alles komplett abzulehnen, was aus dem Computer kommt, oder aber ihm blind zu vertrauen. Vielleicht können wir heute einen gesunden Mittelweg finden. Aber warum machen wir diese aufwendigen Berechnungen, die zudem auch noch sehr hohe Stromkosten erzeugen und Energie verbrauchen?“, fragte er selbstkritisch.

„Stellen Sie sich vor, ein UFO würde in Ihrem Garten landen. Was würden Sie tun? Sie würden sicher wissen wollen, wie dieses Ding funktioniert, welche Technik hinter der Fassade steckt. Sie wären sehr neugierig und würden alles versuchen, Antworten auf Ihre Fragen zu finden. Um vielleicht daraus zu lernen und die Technologien zu nutzen.“ Aus seiner Sicht ist schon ein Ahornsamen mit seinen Propeller-Flügeln ein solches Flugobjekt. „Ein Ahornsamen beherbergt in seinem Inneren eine faszinierende Ansammlung technischer Apparate, die Dinge können, die wir selber noch nicht beherrschen. Die winzig kleinen Apparate bilden ganze Produktionslinien in einer Zelle ab. Und viele dieser Proteine oder Proteinkomplexe lassen sich als Maschinen bezeichnen, weil sie ähnlich unseren makroskopischen Maschinen ihre Funktion sehr häufig durch Bewegung verrichten“, konkretisierte Helmut Grubmüller sein Beispiel. Besonders die Konformationsdynamik, also die Ver-

änderlichkeit der Konformationen von Proteinen, interessiert ihn dabei.

Aber gerade diese Bewegung experimentell zu verfolgen, sei sehr schwierig bis nahezu unmöglich, so der Physiker. „Und genau dieses Problem wollen wir mit unseren Computersimulationen überbrücken und helfen zu lösen. Proteine sind regelrechte Nanomaschinen, und deren Elementarprozesse sind Bewegungen. Und die schauen wir uns an.“ Als Beispiel nannte er die ATP-Synthase, ein Enzymkomplex in der inneren Mitochondrienmembran, der ATP (Adenosintriphosphat) aus ADP (Adenosindiphosphat) und anorganischem Phosphat synthetisiert.

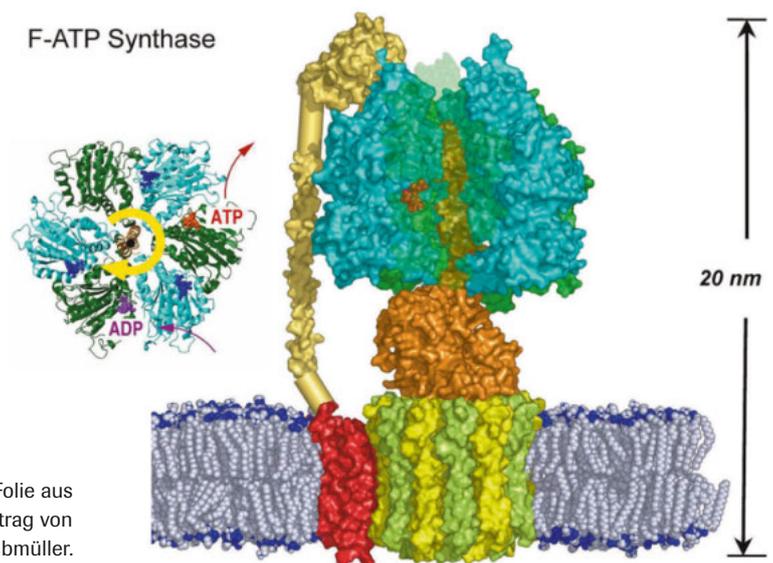
„Die ATP-Synthase ist eine der prototypischen Maschinen, die dadurch funktioniert, dass eine zentrale Achse sich tatsächlich richtig dreht, und es gibt in dieser molekularen Maschine Zahnräder wie bei einer echten Maschine. Sie wird angetrieben durch einen Protonenfluss wie bei einer Batterie und erzeugt durch verschiedene mechanische Konstruktionen an einer definierten Stelle ATP durch Zusammenführung von ADP und Phosphat. Daran scheitert die chemische Synthese im Großmaßstab immer wieder“, zeigte sich Grubmüller fasziniert von dieser Biomachine (Abb. 2). „Die Nanomaschine zeigt die beste natürliche Methode durch wundervolle Nanomechanik. Das würden wir auch gerne nachmachen können, daher schauen wir uns diese Prozesse genauer an. Diese Nanomaschine ist eine klare Analogie zu einem Dreizylinder-Ottomotor. Wir haben die Kurbelwelle in der Mitte, wir haben die

Zylinder, die sich bewegen, und wir haben anstelle des Treibstoffs hier ATP. Und das System arbeitet hocheffizient, sehr dynamisch und reversibel. Auch da können wir noch viel lernen, denn beim Schieben eines Autos mit Ottomotor habe ich bislang vergeblich versucht, dass hinten wieder Benzin rauskommt“, so Prof. Grubmüller schmunzelnd.

**Ribosomen und Aquaporine als hochdynamische Nanomaschinen**

Im weiteren Vortrag fokussierte sich der Wissenschaftler auf Untersuchungen am Ribosom, einer ebenfalls hochdynamischen Nanomaschine in unserem Körper. Die Ribosomen sind in allen Lebewesen vorkommende Zellorganellen, an denen im Rahmen der Proteinbiosynthese die Translation, also die Ablesung der mRNA hin zur Synthese von Proteinen, abläuft. Ribosomen bestehen aus ribosomaler RNA (rRNA) und Proteinen und finden sich im Cytoplasma und in Zellorganellen. Als „Eiweißproduzenten“ der Zellen verbinden sie einzelne Aminosäuren zu Aminosäureketten und damit letztlich zu Proteinen.

„Es gibt hunderttausende verschiedene Funktionen, die Proteine im Körper erledigen müssen. *Form follows function*, und entsprechend gibt es enorm viele verschiedene Proteine – und da bleibt noch viel zu tun, um deren Geheimnisse zu entschlüsseln“, sagte Prof. Grubmüller. Aus seiner Sicht besonders bemerkenswert ist, dass die Proteine in der Lage sind, sich spontan in genau die richtige funktionale Form falten zu können. „Unser Hauptziel



**Abb. 2** Folie aus dem Vortrag von Prof. Grubmüller.

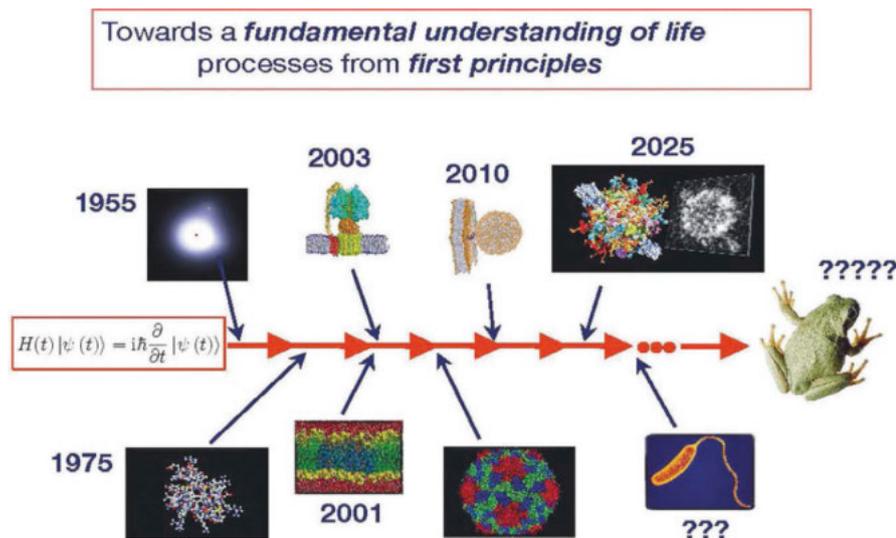


Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Grubmüller.

ist es nun, mit Hilfe von Computersimulationen auf der Grundlage fundamentaler physikalischer Gesetze die Bewegung jedes einzelnen Atoms in so einem Protein inklusive seiner Umgebung zeitaufgelöst zu simulieren und auf diese Weise ein *Molecule Movie* für die Proteinbewegung zu erstellen.“ Das Problem dabei sei, dass im Gegensatz etwa zu hochgeordneten und klar strukturierten Festkörpern Proteine hochkomplex, aber sehr ungeordnet sind und keine offensichtlichen Symmetrien haben – und das mache das Forscherleben entsprechend schwer, so Grubmüller.

Am Beispiel der Aquaporine – Proteine die im Zellkern als eine Art Nano-Wasserpore Wasserkanäle bilden und nur Wassermoleküle durchlassen –, veranschaulichte er die Vorgehensweise bei den Computersimulationen. Dort wurde ein molekulardynamisches Simulationsmodell einer Lipidmembran mit 100.000 Atomen vom Computer erstellt und unter Einhaltung aller physikalischer Gesetze sowie dem Einfluss aller Bindungskräfte und elektrostatischer Einflussfaktoren, die auf ein Atom wirken (wie van-der-Waals-Kräfte oder Pauli-Abstoßung), in Form eines Kraftfeldes berechnet. Am Ende entsteht eine annähernd realistische Simulation der Wasserbewegungen innerhalb der Aquaporine und dadurch ergeben sich weitere Einblicke, die mit Experimenten nicht möglich sind.

Auch den Vergleich von Zeitskalen machte Prof. Helmut Grubmüller deutlich: „Für uns ist eine Sekunde eine Zeit-

spanne, in der ein bisschen passiert, etwa eine Handbewegung. Das ist bezogen auf unsere menschliche Zeitskala. Für ein Protein wäre eine Sekunde auch eine Zeitspanne, in der nicht allzu viel passiert, da sprechen wir aber in der Atomzeitskala von 0,00000000002 Sekunden. Übersetzt in unserer Zeitverständnis (mal 50 Milliarden) bräuchte ein Protein 1600 Jahre, um sich vollständig zu falten. Das zeigt die ungeheure Komplexität der Proteine und der Proteinfaltung – übersetzt in unsere menschliche Zeitskala und unserem Zeitmaßstab. Deshalb fällt es uns auch so schwer zu verstehen, was da eigentlich im Protein passiert.“

Ein Hauptaugenmerk legte Prof. Grubmüller in seinem Vortrag auf die Ribosomen, die zu den wichtigsten Biomaschinen im Körper zählen, denn schließlich werden darin Proteine produziert, die dann wiederum fast alle Funktionen im Körper übernehmen und steuern. Die Proteinsynthese ist eine der wichtigsten Prozesse und seine Arbeitsgruppe hat in Simulationen untersucht, welche Kräfte dahinterstecken, wie das Ganze vorangetrieben wird. Zum Verständnis: Ein Ribosom ist ein großer biomolekularer Komplex aus rund vier Millionen Teilchen, der aus Ribonukleinsäuren und Proteinen besteht. Ribosomen übersetzen den genetischen Code (mRNA) in Proteine und sind daher in allen Lebensreichen essentiell. Die ribosomale Maschinerie arbeitet auf Zeit- und Längenskalen, die sich über mehrere Größenordnungen erstrecken.

„Ziel unseres Projektes ist es, die funktionellen Mechanismen des Ribosoms auf atomarer Ebene mit Hilfe von Molekulardynamik (MD)-Simulationen zu verstehen. Die Transfer-RNAs (tRNAs) tragen Aminosäuren und transportieren sie an das Ribosom. Spezifische tRNAs tragen spezifische Aminosäuren und übersetzen die Information durch Basenpaarung mit der vom Ribosom präsentierten mRNA. Tief im Inneren des Ribosoms wird die neue Aminosäure in das wachsende Peptid eingebaut, das das Ribosom durch einen Austrittstunnel verlässt. Wir entwickeln ein MD-basiertes Protokoll, um die Struktur und Dynamik des elongierenden Peptids im Austrittstunnel zu untersuchen“, beschrieb Grubmüller die aktuelle Forschung am Ribosom. Das Protein-Syntheseband im Ribosom verglich er mit gekochten Spaghetti. „Die ist genauso flexibel – aber wie können Sie gekochte Spaghetti durch eine Röhre bzw. durch eine Labyrinth nach vorne schieben? In der Praxis ist das bei uns nicht möglich, das Ribosom kann das aber perfekt. Wie also schafft es das System, eine Aminosäure nach der anderen anzuhängen, ohne dass es bricht? Das ist Gegenstand der aktuellen Forschung.“

### Blick in die Zukunft

Der Austrittstunnel ist auch interessant für die Antibiotika-Forschung, weil viele Antibiotika in dem Tunnel binden und die bakterielle Proteinproduktion dort unterbinden; der Tunnel des bakteriellen Ribosoms wird gewissermaßen blockiert, so die bisherige Vermutung. „Erste Simulationen meiner Arbeitsgruppe haben herausgefunden, dass das nicht ganz wie der prognostizierte Korkeneffekt in der Flasche abläuft, sondern der eigentliche Syntheseprozess wird gezielt gestört“, sagte Prof. Grubmüller.

Neben diesen aktuellen Untersuchungen sieht er für die Zukunft noch viel Potential bei den Computersimulationen. „Was halte ich für besonders spannend für die nahe Zukunft? Eine Sache sind Ionenkanäle, was genau passiert da drin? Das können wir mittlerweile eins zu eins simulieren. Ein näheres Verständnis dieser Mechanismen kann beispielsweise helfen, gezielt Krebsmedikamente zu entwickeln. Auch die Ligandenbindung ist

ein sehr spannendes Themenfeld. Wir können in den Simulationen sehr flexibel sehen, wie und warum bestimmte Liganden an Proteine binden können. Auf diese Weise können wir die Pharmaindustrie bei der Entwicklung neuer Medikamente gezielt unterstützen. Wenn man bedenkt, dass 1975 das erste Proteinmolekül simuliert werden konnte, wir vor zehn Jahren zumindest die Hülle eines Virus simulieren konnten und heute ganze Ribosomen untersuchen, dann weiß ich tatsächlich nicht genau, wohin die Reise geht. Aber es sind spannende Zeiten für unser Forschungsgebiet der Simulation und Molekulardynamik, und wir schauen in eine noch spannendere Zukunft!“ (Abb. 3)

Trotz aller technischen Fortschritte dauere es aber dennoch immer noch eine Doktorarbeit, so Grubmüller, um eine Millisekunde einer Simulation wie dem des Ribosoms zu erzeugen. Je kleiner das jeweilige System, desto schneller geht es natürlich. Als limitierenden Faktor seiner Forschung sieht er vor allem die Hardware, auch wenn die Rechner immer schneller werden. Aber auch der menschliche Faktor ist aus seiner Sicht bremsend. „Ein Hinderungsgrund ist mangelnde Intelligenz, wir würden gerne noch clevere Algorithmen entwickeln, aber den ganz großen Durchbruch haben wir da leider noch nicht geschafft. Es entwickelt sich aber schrittweise und unsere Simulationen werden durch gewisse mathematische Tricks immer schneller und schlagen das Mooresche Gesetz inzwischen deutlich“, erläuterte der Physiker in der anschließenden Diskussion.

[1] Forschung | Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften (mpg.de) - [2] Ribosomale Translation | Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften (mpg.de)

## BILDERWELTEN

### Von den Tiefen des Meeres bis zur Erforschung des Weltraums

**Der zweite Teil der Festsitzung spannte einen Bogen von Alexander von Humboldts Reisen über die MOSAiC-Expedition in die Tiefen des Ozeans bis hin zur Erforschung des Weltraums. Bilder und**



**Abb. 1** v.l.n.r.: Prof. Dr. Oliver Lubrich, Prof. Dr. Antje Boetius, Prof. Dr. Günther Hasinger. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin www.mika-fotografie.berlin]

**Reisen war das Thema des Podiums. GDNÄ-Präsident Martin Lohse führte in das Tagungsthema ein: „Alle Wissenschaften streben danach, genaue Bilder zu erzeugen. Sie nutzen dafür künstliche ebenso wie natürliche Intelligenz, den großen Instrumentenkasten der Informatik, ausgeklügelte Methoden der Physik und eigens konzipierte Bausteine der Chemie. Um etwa die Moleküle des Lebens immer exakter abzubilden werden optimierte Farbstoffe und Markierungsstrategien, komplexe Licht- und Elektronenmikroskope, effiziente Algorithmen und einleuchtende Visualisierungen gebraucht.“**

Impulse für die Podiumsdiskussion gaben Professor Oliver Lubrich, Universität Bern, zu „Alexander von Humboldts Bilder der Wissenschaft“, Professorin Antje Boetius mit einem Bericht über die MOSAiC-Expedition, die zusätzlich durch Bilder in der Ausstellung dokumentiert wurde, sowie Professor Günther Hasinger (der seit dem Vortrag seine Rolle als Technischer Direktor der European Space Agency gegen die Leitung des neuen Deutschen Zentrums für Astrophysik in Görlitz eingetauscht hat), mit seinem Blick auf Schwarze Löcher und das Schicksal des Universums (Abb. 1). „Drei Experten, die sich intensiv mit der Generierung und der Interpretation von Bildern beschäftigen – und uns in drei Expeditionen zu unterschiedlichen Enden der Welt mitnehmen“, sagte Präsident Lohse.

#### Alexander von Humboldts Bilder der Wissenschaft

Dr. Oliver Lubrich ist Professor für Komparatistik an der Universität Bern. Er gab unter anderem zahlreiche Werke von Alexander von Humboldt heraus, zuletzt

dessen *Sämtliche Schriften* in zehn Bänden. Alexander von Humboldt war nicht nur Naturforscher und Anthropologe, sondern auch Zeichner und Graphiker. Seine Publikationen enthalten mehr als 1500 Abbildungen, sein Nachlass Hunderte von Feldzeichnungen. Humboldts Bilder dokumentieren Landschaften, Pflanzen, Tiere und archäologische Zeugnisse. „Sie sind aber auch Werkzeuge des Denkens, prägnante Diagramme und innovative Datenvisualisierungen. Humboldt dachte und forschte in und mit Bildern“, sagte Prof. Lubrich, der aus Humboldts Graphischem Gesamtwerk und seinem Zeichnerischen Werk in seinem Vortrag ausgewählte Motive präsentierte.

Alexander von Humboldt war nicht nur Gelehrter und Schriftsteller, er hatte eine zeichnerische Ausbildung genossen. Er sah die Zeichnungen als wesentlichen Bestandteil zur visuellen Darstellung seiner Arbeiten und Forschung an. Auch in seinem schriftstellerischen Werk verwendete er oft eine sehr bildhafte Sprache. „Er forschte und schrieb in Bildern. Er hatte in seinen Schriften und Reiseaufzeichnungen immer wieder kleine ikonische Darstellungen eingefügt. Humboldt war sein eigener Reisezeichner“, so Lubrich. Die Bilder seiner Reisen etwa in Südamerika zum Chimborazo sind überwiegend autobiografisch, sie stellen seine Beobachtungen der Natur dar, sie dokumentieren seine Forschungsreisen. „Er wird zu seinem eigenen Augenzeugen. Seine Bilder sollen belegen: Ich war da. Ich garantiere, dass die Palmen, die auf dem Bild zu sehen sind, auch wirklich dort standen und präzise dargestellt sind. Und seine Grafiken der indigenen Bevölkerung und Kultur machen seine Darstellungen zu einer Art visuellen Anthropolo-

gie“, beschrieb Prof. Oliver Lubrich. Zur Geschichte der Landschaftsdarstellungen äußerte sich Humboldt einst in einem Kosmos-Artikel wie folgt: Seine These ist die, dass es eine Dialektik gibt zwischen Kunst und Wissenschaft. „Die Kunst, und sei es noch so naive Landschaftsmalerei, enthält immer Keime eines Naturwissens und sie regt an zur Naturforschung. Umgekehrt kann der Naturwissenschaftler sich der Bildkunst bedienen, um seine Erkenntnisse, sein Wissen als Bilderwissen zu vermitteln“, zitierte Lubrich aus dem Artikel.

Humboldt betätigte sich als Botaniker und hielt zahllose exotische Pflanzen zeichnerisch exakt fest, ebenso ging er bei der Darstellung verschiedener Tierarten, etwa Affen, vor (Abb. 2). Auch Landschaftsbilder hielt er wissenschaftlich exakt fest, und diese dienen heute noch als Datenspeicher aus der Vergangenheit. „Dabei hat er nicht nur konventionell und quantitativ eine Pflanze nach der anderen und neue Arten gezeichnet, sondern darstellerisch und qualitativ auch Zusammenhänge erkannt und beschrieben. Er zeichnete beispielsweise die geografische Anordnung verschiedener Pflanzen und Tierarten am Chimborazo in den Anden 1803 und schuf damit eine berühmte visuelle Darstellung eines kompletten Ökosystems des Vulkans, inklusive Höhenprofil und Umweltdaten, wie Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, chemische Zusammensetzung der Luft, Temperatur. Das Ganze höchst ästhetisch, denn Wissenschaft und Kunst sind bei Humboldt nicht zu trennen“, erläuterte Lubrich an Humboldts mittlerweile ikonischer Darstellung des Chimborazo im Bild „*Geographie des Plantes*“ von 1807. Es ist in der

Grafik zu lesen, in welcher Höhe welche Umweltbedingungen herrschen und welche Arten dort vorkommen.

Humboldt trägt als Migrationswissenschaftler zur Verzeitlichung der Naturwissenschaften bei. „Er visualisierte Daten und Messreihen, wie bei seinen isothermen Linien. Schrift und Bild gehen bei Humboldt ineinander, sie bilden eine Einheit und ergänzen sich“, sagte Lubrich abschließend.

### Augenzeugen Anthropozän: Expeditionen zum Ende der Welt

Prof. Dr. Antje Boetius ist Polar- und Tiefseeforscherin und Direktorin des Alfred-Wegener-Instituts/Helmholtz-Zentrums für Polar- und Meeresforschung. Als Professorin für Geomikrobiologie und Leiterin der Brückengruppe für Tiefseeökologie und -Technologie am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie ist sie am Exzellenzcluster MARUM der Universität Bremen beteiligt. Boetius hat an fast 50 Expeditionen auf internationalen Forschungsschiffen teilgenommen. Im Mittelpunkt ihrer Forschung stehen die Auswirkungen des Klimawandels auf den Arktischen Ozeans sowie die Lebensvielfalt der Tiefsee. Die emotionale Bebilderung ihrer und anderer Expeditionen in die Tiefsee und Polarregionen trägt zur Diskussion und zur Wahrnehmung des schnellen Wandels der Erde bis in die fernsten Regionen bei, ganz gemäß des Humboldtschen Gedanken: „Alles ist mit allem vernetzt; Mensch und Landschaft stehen in einem Bande.“

Antje Boetius sieht Alexander von Humboldt als großes Vorbild, wenn es darum geht, Muster als Skala der Landschaft zu erkennen: „Er hat Großartiges geleis-

tet, und das führt mich zu der Frage: Was sehen wir Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler heute als Augenzeugen des Anthropozäns, einer geologischen Ära, die Humboldt schon vorausgeahnt hat? Denn er hat schon früh auf die Probleme und Auswirkungen des Bergbaus und der Waldabholzung auf die Umwelt hingewiesen und darüber gewettert.“ Sie führte das Publikum in ihrem Vortrag in die Bildwelten der Ozeane ein – „unserem *Life-Support-System*“, wie sie sagte. Denn 70 % der Erde sind mit Wasser bedeckt, Ozeane nehmen 93 % der Wärme auf und verteilen sie um, nehmen 25 % des CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre auf (deswegen haben die Weltmeere eine stabilisierende Wirkung auf das Klima), liefern 25 % des Proteins und stellen 90 % des belebten Raums der Erde dar. Dank der Algen tragen die Ozeane zu 50 % zur Photosynthese bei. Aber was tut sich eigentlich an den beiden Enden der Welt, den Polarregionen?

„Auch wenn dort gefühlt kaum Leben herrscht, wie in der Antarktis, sind die beiden Polarregionen überlebenswichtig für das Leben auf unserer Erde, denn als weiße Schutzschilde reflektieren sie das Sonnenlicht und vermeiden auf diese Weise eine Überhitzung unserer Erde“, sagte Prof. Boetius über die Bedeutung der gefrorenen Regionen für unser Dasein. Doch der weiße Schutzschild schwindet erkennbar durch den Eingriff des Menschen als größte geologische Kraft. Das Anthropozän hat zu einer enormen Steigerung der globalen Mitteltemperatur geführt – mit dramatischen Folgen für die Polarregionen (Abb. 3)

„Als Augenzeugin kann ich vor Ort miterleben, wie das Eis schmilzt. Es geht nicht nur um Daten sammeln, sondern es sind im Kopf die Bilder in dieser verrückten weißen Landschaft, und diese schmelzen zu sehen, das ist sehr nachdrücklich. Das Eis schmilzt nicht nur von oben, sondern auch von unten, da das Meer immer wärmer wird. Dieser Beschleunigungseffekt ist eindeutig zu sehen, alles verändert sich, weil wir an der Klimaschraube drehen. Der Meeresspiegel steigt viel schneller als gedacht, das Eis auf dem Festland wie auf Grönland schwindet ebenfalls immer schneller, der Permafrost schwindet, Eisberge brechen und kollabieren. Das als Augenzeugin zu sehen und zu kapiern,



»Cacajao« (1800) – *Simia melanocephala* (*Recueil d'observations de zoologie*, Tafel 29).

**Abb. 2** Alexander von Humboldts Zeichnung eines Schwarzkopf-Uakari (*Cacajao melanocephala*). [Folie aus dem Vortrag von Prof. Lubrich]

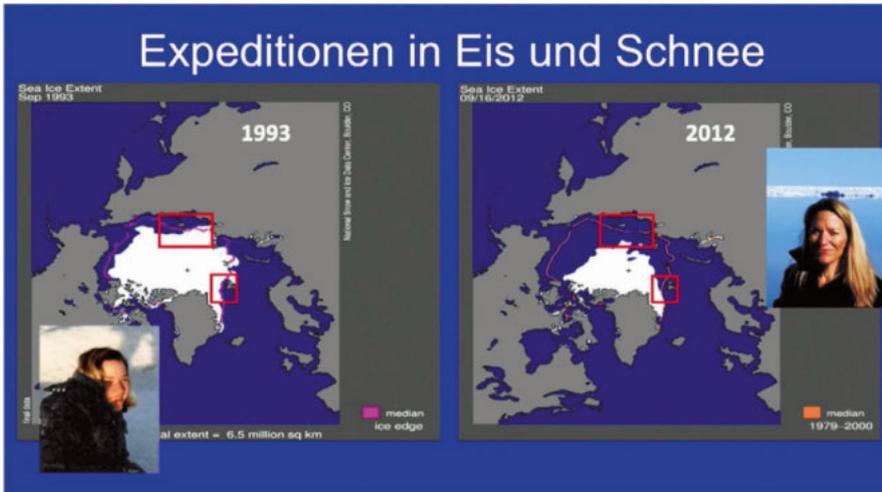


Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Boetius.

dass wir ein Teil dieser Entwicklung sind, ist bedrückend, und ich hoffe, dass ich Ihnen mit den Bildern ein wenig Angst gemacht habe“, stimmte die Tiefseeforscherin das Leipziger Publikum nachdenklich.

Und wir alle können genau mitverfolgen, wie sich das Bild der Polarregionen ändert. Jeder hat Zugriff auf Messdaten, die den Verlauf der Eisfronten darstellen. Der Rückgang des Meereises wird durch die Daten eindeutig dokumentiert [1]. „Wir können also genau verfolgen, wie sich alles verändert, aber reicht das aus, um endlich ins Handeln zu kommen?“, fragte Boetius. „Die Daten allein, also auch die grafische Darstellung der Messwerte in Diagrammen, reichen nicht. Da haben Bilder eine stärkere Wirkung, das wusste schon Humboldt. Wir müssen die Landschaft sehen, fühlen und spüren. Es geht um viel mehr, als nur die naturwissenschaftliche Betrachtung, es geht um Emotionen. Es ist schon hart zu sehen: Als ich 1993 bei einer Polarstern-Expedition am Nordpol war, wurde ich noch durchgeschüttelt, als der Eisbrecher das dicke Eis brechen musste. Heute fährt das Schiff durch das Eis wie durch Butter, da schüttelt nichts mehr. So bin ich selber Augenzeugin dieser Veränderungen. Die Bilder, die wir bei unseren Expeditionen mit professioneller Unterstützung gemacht haben, zeigen das Leben unter Wasser im Winter, zeigen die Wissenschaftler bei der Arbeit, zeigen das Ausmaß des Klimawandels besser, als wenn ich Ihnen drei Daten an die Wand werfe. Die Bilder berühren die Menschen mehr, denn es lässt sie teilhaben an der Expedition.“

Schon immer haben Tiefseeexpeditionen die Menschen fasziniert, weil sie mit Dingen und Spezies konfrontiert wurden, die sie nie zuvor gesehen hatten. Sind es heute Fotos und Videos, war es um 1880 bis 1900 noch gemalte Bilder (etwa von Ernst Haeckel), die oft auch fantasievoll das Ökosystem der Meere nahebrachten (Abb. 4). Bücher früherer Expeditionen, wie der deutschen Valdivia-Expedition (1898/99), wurden zu Sachbuch-Bestsellern. Daher hält es die Meeresbiologin Antje Boetius für absolut notwendig, noch mehr in die Tiefe der Meere abzutauchen, denn tatsächlich wissen wir noch so gut wie gar nicht, was in den unerforschten Meeresregionen noch alles an Überraschungen wartet. Gerade mal 0,00001 % der Wassersäule sind erforscht sowie 0,01 % des Meeresbodens, wie sie anschaulich zeigte.

„Die Situation des Abtauchens, also der umgekehrte Flug nicht ins Weltall für den großen umfassenden Blick auf die Erde, sondern in einer kleinen Kapsel sitzend abzutauchen für den kleinen be-

scheidenen Blick ins Innere der Erde, das ist phantastisch – und deshalb kämpfe ich Seite an Seite mit der ESA und der NASA, wenn es um bemannte Raumfahrt geht. Wir sollten als Menschen nie denken, dass wir bei diesen Expeditionen durch Roboter ersetzt werden können, denn mit unserem Gehirn, unserem Verständnis haben wir einen ganz anderen Blick, wir treten in Interaktion mit dieser Welt. Die Größenordnungen zu verstehen, ist nicht zu ersetzen durch ein durch Glasfaser übertragendes Bild einer Robotersonde“, plädierte Boetius für noch mehr Forschung an den Enden unserer Welt.

„Es ist faszinierend, wie viel funkelndes und leuchtendes Leben in der Tiefsee etwa zwischen 1000 bis 3000 Meter Tiefe herrscht. Auch das wuselnde Leben auf dem Tiefseeboden überrascht. Was wir heute tun, ist im Sinne von Humboldt unbekannte Landschaften zu entdecken und diese in Bildern festzuhalten. Die Leistungen, die wir heute vollbringen müssen, sind Humboldtsche Leistungen des Entdeckens und Erstbeschreibens neuer Landschaften. Und ich bin stolz darauf, mit meinem Team und der internationalen Forschergemeinschaft zeigen und beweisen zu können, dass die Landschaften der Tiefsee nicht tote Landschaften sind, sondern divers und voller Leben sind. Ein Teelöffel Ozeansediment enthält eine Milliarde Zellen und ca. 2000 neue Arten von Kleinstlebewesen. Es gibt sogar Mikroben, die Öl fressen können und den Boden davon säubern, so dass neue Korallen darauf wachsen können. Leider gibt es noch keine Mikroben, die Plastikmüll abbauen. Und es macht mich wütend, wenn ich in der Tiefsee, in der kein Mensch leben wird, dennoch den Plastikmüll als Spuren

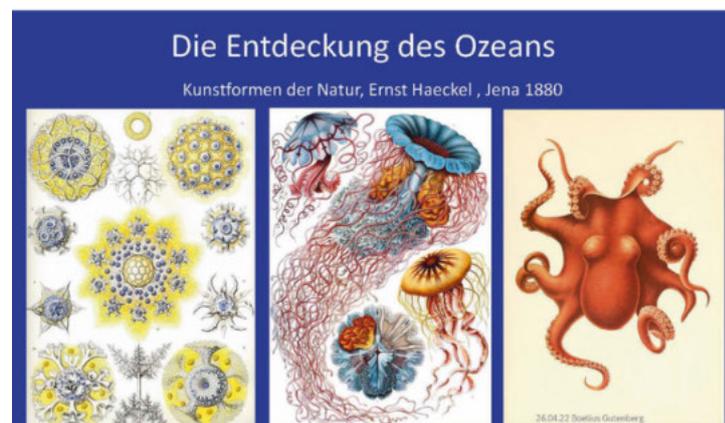


Abb. 4 Folie aus dem Vortrag von Prof. Boetius.

unserer Zivilisation sehe. Auch diese Bilder des Mülls am Meeresboden sind Augenzeuge und Beleg des Anthropozäns. Wir müssen etwas dagegen tun, denn es ist wie bei jeder Expedition ins Unbekannte: Wir sitzen alle in einem Boot und es ist besser zu wissen, wo wir hinwollen“, sagte Prof. Boetius eindrücklich in ihrem Schlussplädoyer.

### Schwarze Löcher und das Schicksal des Universums

Astrophysiker Prof. Dr. Günther Hasinger ist einer der weltweit führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet der Röntgen-Astronomie. Er erforscht die kosmische Entwicklung entfernter aktiver Galaxien und die Rolle von Schwarzen Löchern bei deren Entstehung. Die Dunkle Materie besteht möglicherweise aus primordialen Schwarzen Löchern. In seinem Vortrag „Schwarze Löcher und das Schicksal des Universums“ präsentierte er neueste Beobachtungen und theoretische Überlegungen und nahm das Publikum zunächst mit auf eine bildgewaltige Reise von der Wüste Chiles startend in ein schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße, erkennbar durch einen Schatten, nämlich heißes Gas, das sich um das schwarze Loch befindet, und auf den gezeigten Bildern einem Donut nicht unähnlich sieht. Das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum ist rund vier Millionen Sonnenmassen schwer – für die Entdeckung dieses *Black Holes* erhielt Prof. Reinhard Genzel den Nobelpreis (s. S. 488).

Auch ein zweites schwarzes Loch stellte Hasinger vor, und zwar eines, das aktiv frisst, das also sehr viel Aktivität zeigt, wo Gas und Staub hineinstürzen, wo ganze Sterne gefressen werden. „Es gibt schwarze Löcher in verschiedenen Formen. Einerseits schwarze Löcher, die so schwer sind wie zehn Sonnen, die also am Ende des Lebens eines massiven Sterns entstehen, aber eben auch supermassereiche schwarze Löcher, die Millionen bis Milliarden Sonnenmassen schwer sind. Und dazwischen gab es immer eine Lücke von den mittelschweren schwarzen Löchern, wo wir bislang nicht genau wussten, wie die eine mit der anderen Sorte zusammenhängt. Das Weltraumteleskop Hubble zeigte aber erste Bilder eines intermediären schwarzen Loches mit rund 50.000 Son-



Abb. 5 Folie aus dem Vortrag von Prof. Hasinger.

nenmassen in der Mitte eines Kugelsternhaufens einer anderen Galaxie, das gerade einen Stern zerreißt“, beschrieb Hasinger.

In Zukunft wird es möglich sein, einzelne schwarze Löcher durch einen vom Loch selbst erzeugten Mikrolinseneffekt isoliert zu entdecken und zu betrachten (Abb. 5). Denn das schwarze Loch erhellt wie eine Linse wirkend einerseits den Stern direkt in seiner Nähe bzw. wenn es an diesem Stern vorbeifährt und bewirkt gleichzeitig eine Art elliptische Rotation des Sterns um das schwarze Loch. Diese beiden optischen Phänomene können die Suche erleichtern – dank GAIA. Der Satellit hat schon zahlreiche Daten gesammelt – und die nächsten Jahre dürften spannend werden, wenn Forschergruppen diese Daten und Entdeckungen weiterer schwarzer Löcher veröffentlichen. Diese werden dabei helfen, die vielen Rätsel der schwarzen Löcher Puzzleteil für Puzzleteil zu entschlüsseln. „Auch die Gravitationswellendetektoren wie Virgo oder Ligo machen uns Forscher glücklich. Diese können mittlerweile schon routinemäßig die Vereinigung von schwarzen Löchern messen. Die Detektoren haben schon einen ganzen Zoo an schwarzen Löchern entdeckt“, beschrieb Prof. Hasinger begeistert die aktuellen technischen Möglichkeiten zur Forschung. „Es gibt Löcher mit 80 bis 100 Sonnenmassen, die sich in Paaren befinden, und die sich miteinander vereinigen und dann ein Loch mit 200 Sonnenmassen bilden. Dabei wissen wir noch gar nicht, wo die überhaupt herkommen. Und dann gibt es Löcher mit nur fünf Sonnenmassen, die nach der Theorie gar nicht existieren sollten.“

Schließlich lüftete Günther Hasinger eine Entdeckung, die die bisherige Evolutionstheorie des Universums ins Wanken bringen könnte. „Wir haben vor zehn Jahren Daten gemessen, die den Fingerabdruck des vermutlich frühesten schwarzen Loches zeigen. Es gibt eine signifikante Korrelation der Hintergrundfluktuationen des Weltraums zwischen der kosmischen Infrarot- und Röntgenstrahlung. Das starke Röntgensignal deutet auf schwarze Löcher hin. Im sichtbaren Licht des Hubble Space Teleskops gibt es keine derartigen Signale. Daraus schließt man, dass das Signal aus der Frühzeit des Universums stammen muss“, erläuterte Hasinger die fast schon kriminalistische Spurensuche im Weltall. „Diese schwarzen Löcher müssen schon vor über 13 Milliarden Jahren existiert haben. Möglicherweise sind schon viele dieser Löcher beim Urknall entstanden und machen die Dunkle Materie aus“, mutmaßte Hasinger. Generationen von Teilchenphysikern suchen schon seit Jahrzehnten verzweifelt nach Teilchen dieser besonderen Materie. Doch nun gibt es Hoffnung, denn das Hubble-Teleskop hat über Gravitationslinsen-Phänomene (Einsteinringe) wohl eine Klumpung von Dunkler Materie in einer Galaxie entdeckt.

„Wenn schwarze Löcher schon beim Urknall existieren, müsste die Evolution des Universums und die Bildung der Sterne und Galaxien nochmal überdacht werden. Nach dem bisherigen Modell sollten sich Sterne erst 300 Millionen Jahre nach dem Big Bang gebildet haben. Mit dem neuen Modell könnte dies schon nach 50

Millionen Jahren erfolgt sein“, so Prof. Hasinger. Beweise für diese Theorie der primordialen schwarzen Löcher könnte das Superteleoskop James Webb liefern, dass bis in die früheste Zeit des Universums zurückschauen kann, also das früheste Licht überhaupt entdecken könnte. Auf die Auswertung dieser Messreihen wird nicht nur Prof. Hasinger mit Spannung warten, denn schließlich könnte oder müsste die Entstehung der Sterne dann neu geschrieben werden.

[1] <https://www.meereisportal.de/>

## MOLEKULARMEDIZIN

### Eine kurze Einführung in die RNA-basierte Medizin

**Bei Arzneimitteln und Impfstoffen drehen sich bisher (fast) alles um Proteine – aber seit der schnellen und erfolgreichen Entwicklung der Covid19-Impfstoffe kennt fast jeder einen neuen Weg zu diesen Zielen: mRNA – die Boten- oder messenger-RNA. Jahrelange Vorarbeiten zu den Impfstoffen, viele davon aus der Grundlagenforschung, haben Wege aufgezeigt, wie die an sich sehr labilen mRNAs stabilisiert werden können und wie man sie verpacken kann, um sie an den Wirkort in Zellen gelangen zu lassen. Die GDNÄ nahm sich in Leipzig Zeit für einen Blick in die Zukunft: Was könnte sich alles mit mRNA als Wirkstoff erreichen lassen? Was könnte dies für die Therapie von Krebs, aber auch von anderen Krankheiten be-**

**deuten? Welche technischen Fortschritte gibt es und was ist noch nötig, bis neue Therapien auf den Markt kommen können? Professor Jörg Vogel, Professor Lorenz Meinel und Professorin Stefanie Dimmeler führten in das Gebiet ein und diskutierten über künftige Entwicklungen zusammen mit Professor Martin Lohse.**

Zunächst führte Prof. Jörg Vogel, Leiter des Instituts für Molekulare Infektionsbiologie an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, in das Thema ein. Der Mikrobiologe ist für seine Beiträge zur RNA-Biologie bekannt ist: Vogels Labor forscht an nicht-kodierenden RNA-Molekülen und RNA-bindenden Proteinen in wichtigen bakteriellen Krankheitserregern und in Mitgliedern des menschlichen Mikrobioms. Er arbeitet dabei mit verschiedensten Bakterien, von Salmonella bis hin zu Mikroben der Mundhöhle, die mit Darmkrebs in Verbindung gebracht werden. Ziel ist es, auf Ebene einzelner Zellen zu verstehen, wie und warum Bakterien RNA als Regulator verwenden.

„Der RNA sind viele von uns in den letzten beiden Jahren physisch nähergekommen, weil viele gegen das Coronavirus geimpft wurden und gesehen haben, dass wir einer Pandemie nicht völlig hilflos ausgeliefert sind. Auch die sehr schnelle Entwicklung von Wirkstoffen auf mRNA-Basis ist vielen in Erinnerung bei diesem Thema. Ein halbes Jahr nach Zulassung um Dezember 2020 waren bereits weltweit fast 500 Millionen Dosen verimpft worden. Corona hat uns gezeigt, dass die mRNA-basierte Medizin sichere Medikamente herstellen kann“, sagte Vogel in seiner Einstimmung auf das Thema.

mRNA als Technologie ist heute bereits ein breites Feld mit vielen potentiellen Anwendungsfeldern: Einmal auf Basis therapeutischer mRNA, die im Labor hergestellt, in die menschlichen Zellen eingeführt und daraus ein Protein gebildet wird – und beispielsweise im Falle eines Vakzins ein Antigen bildet, auf das unser Immunsystem trainiert werden kann. „Das gleiche Prinzip kann auch zur intrinsischen Erkennung von Krebszellen genutzt werden, die dann bekämpft werden können. Das zweite Prinzip ist, dass kurze RNA-Stränge so gestaltet werden, dass sie ein mRNA-Molekül binden können. Man versucht so, die Proteinproduktion im Körper zu verändern, das nennt sich *RNA Delivery*“, vermittelte Prof. Vogel dem Publikum. Als dritte Methode nannte er das CRISPR/CAS-System, um mit dieser Genschere Genomkorrekturen durchführen zu können. Für einen therapeutischen Effekt müssen diese Systeme in die menschlichen Zellen eingeführt werden.

Vogel versuchte sich an einer Definition der RNA-basierten Therapie bzw. Medizin, die es als Lehrfach noch gar nicht gibt. „Ich sage immer, dass RNA-basierte Therapeutika eine medizinische Behandlung unterstützen, die direkt auf RNA abzielt oder im Fall der mRNA-Vakzine mRNA selber nutzt, um im Körper in der Zelle als Medikament zu wirken.“ Auf dem Weg zur erfolgreichen Entwicklung von mRNA-Impfstoffen gab es für Meilensteine der Grundlagenforschung und Entdeckungen zahlreiche Nobelpreise, etwa für die Entdeckung der RNA-Interferenz Ende der 1990er Jahre, oder CRISPR/CAS als Genschere, die mittlerweile in der Biotechnologie und Medizin erfolg-



**Abb. 1** v.l.n.r.: Prof. Dr. Jörg Vogel (am Podium), Prof. Dr. Martin Lohse, Prof. Dr. Stefanie Dimmeler, Prof. Dr. Lorenz Meinel. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

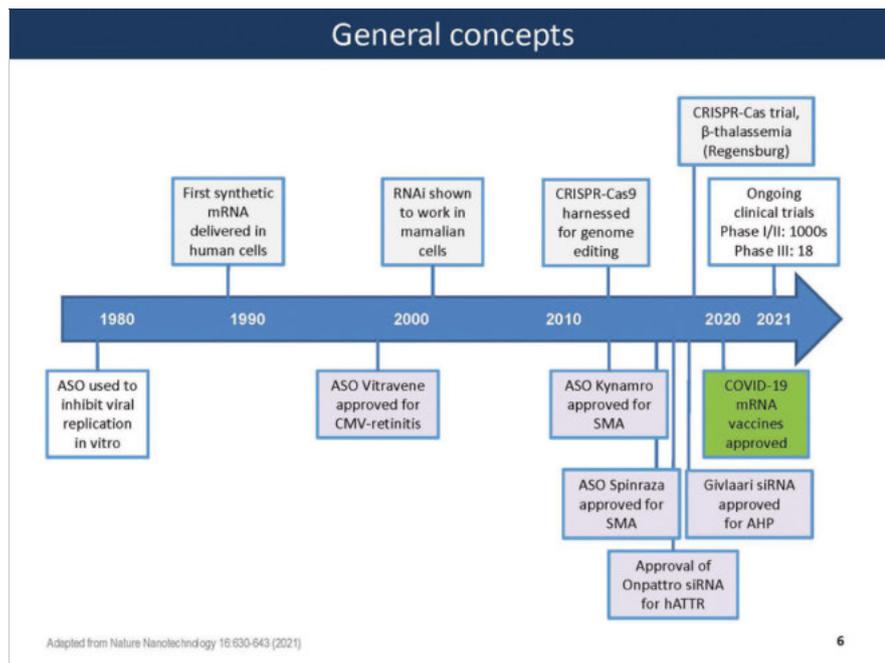


Abb. 2 Folie aus dem Vortrag von Prof. Dr. Vogel.

reich eingesetzt wird. Erste zugelassene Therapien damit dürften in den nächsten zwei oder drei Jahren erfolgen, so Vogel.

### RNA-Medizin steht vor dem Durchbruch

Grundlagen der Forschung, die teils schon Ende der 1970er Jahre begann, zeigte Prof. Vogel in einem Zeitstrahl. Nach über 40 Jahren intensiver Forschung scheint die Coronapandemie gewissermaßen als Katalysator gewirkt zu haben, denn nun dürfte die mRNA-Technologie vor dem endgültigen, revolutionären Durchbruch stehen. (Abb. 2)

„Die Entwicklung bis heute verlief aber immer wellenartig, es gab nach jedem neuen Meilenstein fast immer einen regelrechten Hype, es wurden Firmen gegründet, es floss viel Geld in die Forschung hinein, aber die ersten Medikamente in den 1990er und 2000er Jahren haben nicht das gehalten, was sie versprochen hatten bzw. was man sich von ihnen erhofft hatte. Wir haben aber auch durch die Rückschläge viel gelernt und wissen heute, wie wir RNA in therapeutisch richtigen Mengen herstellen können, im großen Maßstab synthetisieren können und es auch als Medikamente einsetzen können. Wir sind heute viel besser darin geworden, wie wir die RNA in den Körper einbringen können“, fasste Vogel die spannende und wechselhafte Entwicklungsge-

schichte der RNA-Medizin zusammen. „Aufgrund der vielen klinischen Studien – ob erfolgreich oder nicht – haben wir zudem eine sehr gute pharmakinetische Datenlage. Das hat am Ende auch bei der schnellen Entwicklung und Zulassung der mRNA-Impfstoffe geholfen.“

mRNA ist die Matrize zur Herstellung von Proteinen im Körper, RNA wird als „Gegner“ der DNA im Körper eingeschleust. Für beide Fälle nannte Vogel Beispiele in der medizinischen Anwendung. „Mit der RNA-Technologie können wir Nukleinsäuren so programmieren,

dass sie bestimmte andere Nukleinsäuren im Körper erkennen. Das ist das Antisense-Prinzip.“ Durch RNA-Interferenz kann man im Prinzip jedes Gen im menschlichen Körper adressieren. Ein erfolgreiches Antisense-Oligonukleotid ASO kommt bei *Spinal Muscular Atrophy* (Spinale Muskelatrophie) zum Einsatz (Spinraza) und ist seit 2016 zugelassen. Die genetische Erkrankung bei Kindern lässt sich damit gezielt behandeln. „Statt wie früher im Rollstuhl zu sitzen, können sie heute laufen. Es gelingt dabei, ein defektes Gen zu substituieren. Es wird also direkt die molekulare Ursache für die Erkrankung behandelt. Das ist das Neue daran“, erklärte Prof. Vogel (Abb. 3).

Die Antisense-Therapie ermöglicht die Charakterisierung von molekularen Mechanismen, die als ursächlich für Krankheiten gelten. Je mehr Kenntnisse über die molekularen Grundlagen von Erkrankungen genutzt werden können, umso besser kann die Entwicklung von neuen Therapieformen auf genetischer Ebene erfolgen [1].

Beim zweiten Beispiel, der mRNA-Vakzine, verwies Vogel darauf, dass schon 1990 ein Artikel erschien, der auf die Möglichkeiten der mRNA-Behandlung hinwies (Einbringen von mRNA in den Muskel einer Maus), es aber bis Ende 2020 dauerte, bis der erste mRNA-Impfstoff gegen das Coronavirus auch wirklich zugelassen werden konnte. „Es war ein Weg dahin mit viel Frustration. Schon

Targeting rare diseases

**Spinal muscular atrophy (SMA)**

- Survival motor neuron (SMN)
- Spinraza (nusinersen)
- FDA approval in 2016
- >10,000 treatments

*(Image of a woman and a child in a wheelchair)*

Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Dr. Vogel.

1993 wurde ein erster Impfstoff auf mRNA-Basis produziert, Curevac war 2000 dann auch das erste Unternehmen, das sich in diesem Bereich gegründet hat. Auch Biontech gibt es schon seit 2008. Die Firmen mussten relativ lange irgendwie überleben und zunächst selber Millionen vorfinanzieren. Erst jetzt fahren sie praktisch die Ernte ein“, betonte Vogel.

Obwohl schon seit etwa 2019 einige Studien und auch Zulassungen für verschiedene mRNA-Impfstoffe vorlagen, war der Markt für diese Technologie offensichtlich noch nicht bereit. Alle Hersteller stehen dabei vor den gleichen Problemen bei RNA – die RNA-Delivery und RNA-Modification: „Wie bekomme ich den Wirkstoff bzw. die sehr großen Moleküle in den Körper hinein und wie halte ich ihn stabil über einen gewissen Zeitraum“, so Vogel.

Mit ihrer Molekülgröße widersprechen RNA-Moleküle eigentlich der vom Chemiker Christopher Lipinski 1997 aufgestellten „Rule of Five“, die eine Faustregel für die orale Bioverfügbarkeit von chemischen Verbindungen ist und zeigt, dass viele gängige Moleküle für Arzneistoffe klein und lipophil sind. Die „Rule of Five“ findet unter anderem Anwendung in der Pharmaforschung, um abzuschätzen, ob ein neu entwickelter Arzneistoff als orales Arzneimittel eingesetzt werden kann. „Wichtig für die erfolgreiche Nutzung der RNA war die Entwicklung, diese mit einer Schutzhülle aus Nanopartikeln zu verpacken. Das andere Problem ist, dass eingeführte RNA im Körper als Fremdkörper angesehen wird – und sofort gehen alle Alarmsignale im Körper an, weil diese nicht als körpereigene RNA erkannt wird. Man muss sie also soweit modifizieren oder tarnen, dass sie nicht sofort vom Körper erkannt werden. Sie wollen eine Überaktivierung vermeiden, gleichzeitig aber den Wirkstoff zum Zielort im Körper bringen, das sind und waren die großen Herausforderungen bei mRNA“, fasste Jörg Vogel zusammen und gab einen Ausblick auf die nächsten denkbaren Anwendungen der RNA-Medizin. Im Fokus stehen dabei Krebstherapien (Tumorzellenbekämpfung mit mRNA) und personalisierte Medizin mit maßgeschneiderter Tumorthherapie. Auch Autoimmunerkrankungen wie Parkinson und Multiple Sklerose könnten in naher

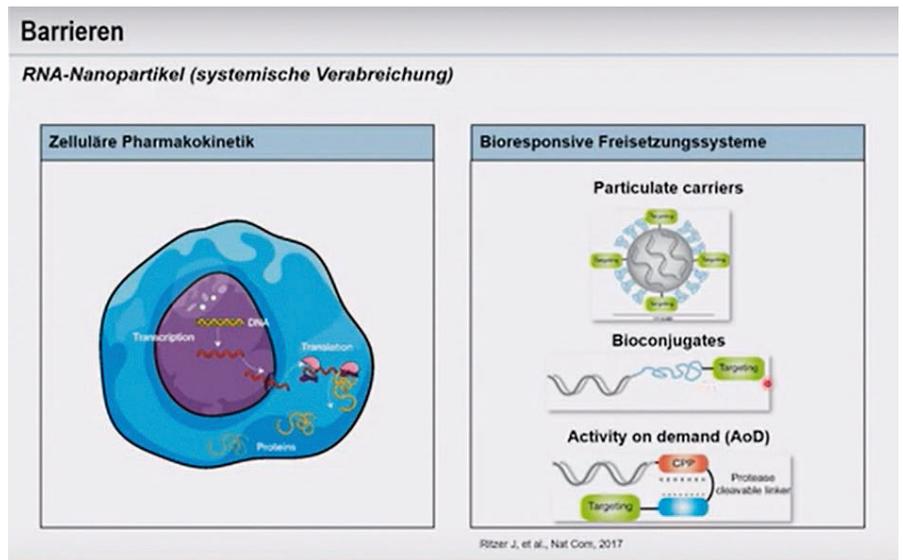


Abb. 4 Folie aus dem Vortrag von Prof. Meinel.

Zukunft mit Hilfe von mRNA-Therapien behandelt werden.

Prof. Dr. Dr. Lorenz Meinel, Lehrstuhl für Pharmazeutische Technologie und Biopharmazie der Universität Würzburg, nannte in seinem Kurzvortrag „RNAs – Wirkstoffe und Medikamente“ als große Herausforderung für die Hersteller das zentrale Dogma der Biologie: „Transkription der DNA in die RNA und Translation der RNA in die Proteine.“ Wünschenswerte Anforderungen bei mRNA sind aus seiner Sicht: Hilfsstoffe sollten idealerweise und sogar notwendigerweise bioabbaubar sein, die Herstellung muss einfach skalierbar sein mit konsistenter Qualität. Es muss eine möglichst selektive Targetierung der Zielgabe beim Delivery erfolgen, aus toxikologischer Sicht muss es eine sichere Anwendung bei einer für die Wirkung notwendigen Dosis geben und im Hinblick auf die Immunologie stehen sichere und effiziente Anwendungen bei erneuter Anwendung im Vordergrund (Abb. 4).

**RNA-Medizin gegen Herzerkrankungen**

Prof. Dr. Stefanie Dimmeler ist Professorin an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main und Direktorin des Instituts für Kardiovaskuläre Regeneration im Zentrum für Molekulare Medizin. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung von Reparaturmöglichkeiten und Regeneration im Gefäßsystem und im Herzen. In ihrem GDNÄ-Vortrag „Neue RNA-Therapeutika: Beispiele aus der Herz-Kreislauf-Medizin“ stand neben der

grundlagenwissenschaftlichen Aufklärung von Prozessen insbesondere die Entwicklung von therapeutischen Verfahren zur Behandlung von Herz-Kreislauf-erkrankungen im Vordergrund. „Unser Herz besteht aus zwei bis drei Billionen Herzmuskelzellen, die halten müssen, da sie nicht erneuert werden, und hält uns mit ca. 35 Millionen Schlägen im Jahr am Leben. Herz-Kreislauf-erkrankungen sind – wen wundert es bei dieser stark beanspruchten Biomachine – aber verantwortlich für weltweit fast 18 Millionen Todesfälle im Jahr“, erläuterte Dimmeler. Neue therapeutische RNA-Verfahren und klinische Untersuchungen zur Behandlung von Herz-Kreislauf-erkrankungen könnten dem vorbeugen.

So wurde beispielsweise PCSK9 siRNA (Inclisiran) zur Senkung des Cholesterin-Spiegels im Dezember 2020 zugelassen. „Mit nur zwei Injektionen pro Jahr kann das LDL-Cholesterin dauerhaft um 50 % gesenkt werden und damit auch das Risiko für Herzerkrankungen“, sagte Prof. Dimmeler. Inclisiran ist eine synthetisch hergestellte, so genannte *small interfering RNA* (siRNA), *kleine eingreifende RNA*. Dabei handelt es sich um kurze, einzel- oder doppelsträngige Ribonukleinsäure-Moleküle von 20 bis 25 Basenpaaren Länge. Sie codieren keine Proteine, sondern verbinden sich mit komplementären einzelsträngigen Ribonukleinsäure-Molekülen, wodurch sie deren normale Funktion unterbinden. „Das Medikament ist vor allem als Behandlungsoption

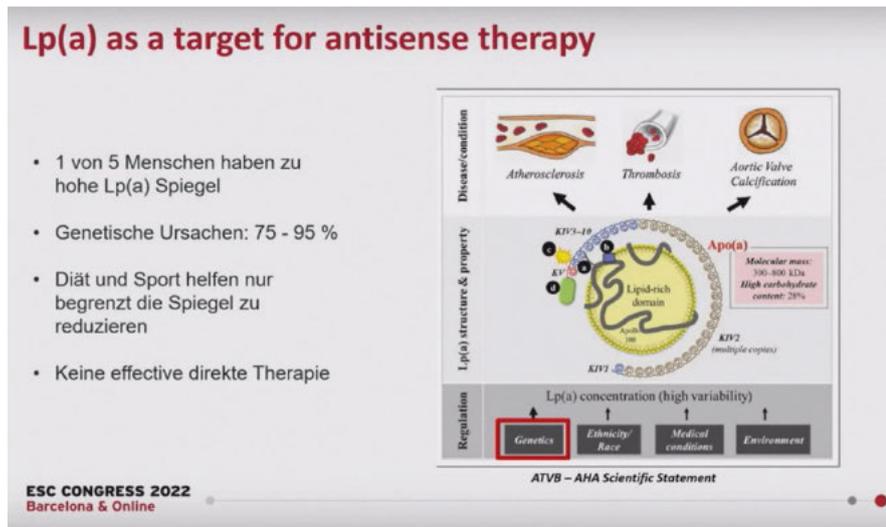


Abb. 5 Folie aus dem Vortrag von Prof. Dimmler.

tion für Patienten zugelassen, die keine üblicherweise verabreichten Statine als Cholesterinsenker vertragen. Das sind etwa 5–10 % der Patienten. Während die Statin-Tabletten täglich genommen werden müssen, benötigt der Patient mit dem RNA-Medikament nur alle sechs Monate eine Injektion“, nannte Dimmler einen weiteren Vorteil der neuen RNA-Medizin (Abb. 5).

In der anschließenden Podiumsdiskussion eröffnete Prof. Dr. Martin Lohse gleich mit der Gretchenfrage: „Ist das gefährlich, was da gemacht wird, und kann man die einmal angestoßene Therapie wieder zurücknehmen, wenn man damit angefangen hat?“ „Bei der Geneditierung lässt sich das nicht zurücknehmen, es sei denn man fände einen Weg der Rückeditierung. Deswegen wird diese Gentherapie auch nur in sehr schweren Krankheitsfällen eingesetzt und wenn man keine Alternative hat“, schränkte Stefanie Dimmler ein. Und Prof. Meinel ergänzte: „Es wird immer eine Nutzen-Schaden-Abwägung bleiben. Es sind ja aktuell sehr viele Nischenerkrankungen, die behandelt werden. Wenn man in die pharmakologische Breite und in breitere Krankheits-Anwendungsfelder geht, müssen wir schauen, wie sich die ganze Form der Therapie entwickelt. Die präzisen Tools, die uns jetzt zur Verfügung stehen, sind natürlich dann effizient, wenn die genetische Grundlage gegeben ist wie beim CRISPR/CAS. Aber bei Volkskrankheiten haben wir häufig ein so breit gefächertes Bild an Ursachen, dass die Wirkung der Medikamente dann

auch spannend abzuwarten ist.“

Die RNA ist eigentlich ein unmögliches Molekül als Therapeutika, so Lohse, die man durch geschickte Verpackung und aufwändige Modifizierung dann doch irgendwie in das jeweilige Organ zur Behandlung einbringen kann. „Gäbe es denn dafür nicht auch andere, kleinere Moleküle, die besser geeignet wären als Medikamente, und die diese ‚unmögliche‘ Chemie der Basenpaarung nutzen könnten?“, fragte er. Dazu sagte Prof. Vogel: „Das Entscheidende bzw. das Grundprinzip der RNA-Therapien ist ja die faszinierende Programmierbarkeit der nukleinsäurebasierten Medizin, die diese Methode von allen anderen Ansätzen deutlich unterscheidet. Die Frage ist also, gibt es andere makromolekulare Moleküle, die man auf diese Weise als Ketten aneinanderhängen kann, die mit Nukleinsäuren auf eine vorhersehbare Weise interagieren können? Es gibt spezielle Proteine, die sich um Nukleinsäuren wickeln, und die kann man tatsächlich programmieren. Aber die sind noch größer als die RNA!“

Die neue Technologie könnte die personalisierte Medizin ermöglichen, wobei bislang, so Prof. Meinel, immer Nischenerkrankungen mit in der Regel wenigen hundert Patienten weltweit behandelt werden: „Technisch ist vieles möglich, muss aber unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit betrachtet werden. Sehr häufig ist hier der Spielverderber das Geld.“

Prof. Vogel sieht vor allem die Bekämpfung von Krebs als wesentlichen Treiber der neuen Therapie. „Krebs wird

man nicht verhindern können, Krebs passiert jeden Tag in unserem Körper. Jeden Tag mutiert oder verändert sich unsere DNA, jeden Tag wird sie geschädigt. Natürlich haben wir Reparatursysteme, die den Schaden reparieren, und wenn das nicht klappt, kommen Immunabwehrsysteme zum Einsatz. Wenn diese versagen, bricht der Krebs aus. Die Idee der mRNA ist nun, sich diese entarteten Zellen genau anzuschauen, welche Oberflächenproteine sich dort bilden, und dass man dann gezielt eine Impfung gegen die Krebszellen individuell auf den Patienten durchführt bzw. entwickelt. Für Hautkrebs konnte schon in klinischen Protokollen gezeigt werden, dass das funktionieren kann. Doch da kommen wir dann umgekehrt auch an die Grenzen dieser individuellen, personalisierten Methode. Denn einen Tumor zu bekämpfen mit unprogrammierten T-Zellen ist nun mal deutlich schwerer als eine Infektion zu bekämpfen. Bei Corona wird durch eine Impfung in den Oberarm das Immunsystem im gesamten Körper aktiviert. Tumore sind dafür bekannt, dass sie das Immunsystem weitestgehend draußen halten, wir müssten also versuchen, die T-Zellen direkt in den Tumor einzuschleusen und zu aktivieren. Aber das ist die sehr große Herausforderung.“

In einigen Fragen aus dem Publikum ging es anschließend unter anderem darum, warum Curevac mit seinem „natürlichen“ mRNA-Ansatz bei der Impfung gegen Covid mehr oder weniger an der Effizienz scheiterte, obwohl sie als eine der ersten Firmen sich schon lange damit beschäftigten, eine andere Frage bezog sich darauf, warum Biontech und Moderna modifizierte Impfstoffe gegen neue Covid-Varianten immer wieder durch den gesamten, sehr komplexen Zulassungsprozess laufen lassen müssten, obwohl es sich doch nur um leichte Varianten des bereits zugelassenen Impfstoffs handelt, und warum es nicht möglich sei, hier wie bei der Grippe-Impfung vorzugehen. Allgemeiner Tenor war hier, dass sich die Unternehmen selber bei dieser neuen Methode absichern wollen und daher selber auch diese Vorgehensweise begrüßen würden.

[1] Antisense Therapie – gezielte Synthesehemmung krankheitsfördernder Proteine – Bio Medical Center (biomedical-center.de)

## MIKROSTRUKTURFORSCHUNG

## Bilder aus der Nanowelt als Basis neuer Entdeckungen

**Der Festkörperphysiker Prof. Dr. Roland Wiesendanger promovierte (1987) und habilitierte (1990) an der Universität Basel. 1992 folgte er dem Ruf an die Universität Hamburg, verbunden mit dem Aufbau des Hamburger Zentrums für Mikrostrukturforschung. Prof. Wiesendanger ist der Erfinder einer Mikroskopietechnik, welche erstmals die direkte Abbildung, Untersuchung und Manipulation von magnetischen Strukturen auf atomarer Skala ermöglichte. Damit werden die Grundlagen gelegt für neuartige hochdichte magnetische Datenspeicher und energieeffiziente Logikbauelemente auf ultimativ kleiner Skala. Für seine Forschungsarbeiten erhielt er zahlreiche nationale und internationale Auszeichnungen. In seinem GDNÄ-Vortrag „Bilder aus der Nanowelt als Basis neuer Entdeckungen“ zeigte er faszinierende Bilder, die mittels Rastertunnelmikroskopie erzeugt wurden. Durch einen Trick gelingt es, dieses Mikroskop empfindlich auf magnetische Signale zu machen und auf diese Weise neue Phänomene des Magnetismus auf atomarer Skala zu entdecken.**

Prof. Wiesendanger (Abb. 1) lud in seinem Vortrag zu einer Entdeckungsreise in die geheimnisvolle, magische Nanowelt der Atome und Moleküle ein und zeigte, wie es gelingt, komplett neue Strukturen und Anwendungen zu erschaffen. Zu Beginn stellte Prof. Wiesendanger einige Fragen: Kann man Atome sehen? Wie kann man sie sichtbar machen? Kann man physikalische Eigenschaften atomarer Strukturen abbilden, und wenn ja, welche? Kann man atomare Strukturen gezielt beeinflussen? Kann man Strukturen Atom für Atom wie bei Legosteinen gezielt aufbauen? Eine zentrale Frage und Zukunftsperspektive ist: Kann man atomare Bauelemente mit spezifischen Funktionalitäten realisieren, wie z.B. eine atomare Elektronik? Und schließlich: Welche neuen Entdeckungen in der Nanowelt sind möglich? Wie können diese die Fortschritte im Bereich der Informati-



**Abb. 1** Prof. Dr. Roland Wiesendanger. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

ons- und Kommunikationstechnologie etwa bei den Datenspeichern beeinflussen?

Zur Beantwortung all dieser Fragen muss die Wissenschaft zunächst einmal sehend werden. „Mit Blick in die Nanowelt sind wir zunächst einmal blind, unser menschliches Sehen ist beschränkt. Mit dem bloßen Auge oder der Standardmikroskopie sehen wir da natürlich überhaupt nichts. Auch bildgebende Verfahren wie die optische Mikroskopie sind durch die Verwendung von Linsensystemen eingeschränkt und durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts von einigen 100 Nanometern limitiert“, sagte Roland Wiesendanger. Der Nachweis der Realität von Objekten, die man mit dem menschlichen Auge nicht sehen kann, gelingt entweder durch Verwendung weiterer Sinne, wie dem Tastsinn, oder durch Nutzung verschiedener Wechselwirkungen oder Strahlungsarten in Form einer korrelativen Mikroskopie, so Prof. Wiesendanger. Durch atomar auflösende Mikroskopietechniken gelingt es dann auch, Atome sichtbar zu machen. Diesen revolutionären Blick in die Welt der Atome ermöglicht das Rastertunnelmikroskop (RTM), das in der Oberflächenphysik und Oberflächenchemie eingesetzt wird, um die Oberfläche einer Probe real abzubilden. Das RTM kann im Gegensatz zu Beugungsmethoden auch nicht-periodische, lokale Strukturen, etwa Oberflächendefekte oder Nanostrukturen, sichtbar machen. Bei der rastertunnelmikroskopischen Messung wird eine elektrisch leitende Nadel in einem Raster über das

ebenfalls leitende Untersuchungsobjekt gefahren. Die Rastertunnelmikroskopie ist ein indirektes Abbildungsverfahren, da das Gesamtbild einer Messung aus den an jedem Rasterpunkt gemessenen und in Graustufen umgerechneten Werten des Höhen-Regelsignals zusammengesetzt wird. [1]

„Es ist eine einfache, aber geniale, direkt abbildende Abtast-Methode, die ohne störende und einschränkende Linsensysteme und somit ohne Linsenfehler auskommt. Sie ermöglicht eine Nahfeldmikroskopie, da die Auflösung nicht durch die Wellenlänge der Elektronen limitiert ist. Dabei erfordert das Vakuumtunneln extrem kleine Abstände zwischen der Abtastspitze und der Probe“, erläuterte Prof. Wiesendanger. „Die Energie der Elektronen, die tunneln können, ist extrem klein. Sie liegt im Millielektronenvoltbereich, und somit deutlich unter den Bindungsenergien von Molekülen. Damit ist das RTM eine nicht-destruktive Methode, das Verfahren schont die Probe, da es keine Veränderungen der Probe auf atomarer Skala durch die verwendete ‚Strahlung‘ gibt“, so Wiesendanger. (Abb. 2)

### Wie real ist das Abbild der Nanowelt?

Die Frage, die sich bei der Abtastung der Oberflächen allerdings fast immer stellt, ist, wie real das Abbild tatsächlich ist. Können andere Messtechniken ergänzt werden, um das Ergebnis zu verifizieren, um die Abstände der Atome und die Strukturen zu bestätigen? „Das kann z.B. durch das Raster-Kraft-Mikroskop gelingen, das mit einem Kraftsensor nicht die Stromstärke, sondern die Abstoßungskraft der Atome misst, durch einen dynamischen Nichtkontakt. Gemessen wird dabei die Wechselwirkung mit einer atomar dünnen, schwingenden Feder. Dabei werden die Schwingungsfrequenzveränderungen des Federbalkens ermittelt. Auch mit dieser rein mechanischen Mikroskopie können Oberflächen sehr exakt abgetastet werden. Man kann also auch mit rein mechanischen Prinzipien in die Welt der Atome vordringen. Wir nutzen die korrelative Mikroskopie – also die Nutzung verschiedener Wechselwirkungen – um die Realität der Oberflächenstruktur unabhängig voneinander zu verifizieren“, beschrieb der Festkörperphysiker.

Und weiter führte er aus: „Kein Kristall der Welt ist perfekt. Es gibt immer wieder Fremdatome, die sich in die natürliche Struktur einmischen. In der Praxis macht man das sogar gezielt durch Dotierung, um etwa die Leitfähigkeit von Halbleitern zu erhöhen. Diese Fremdatome lassen sich im RTM sehr schön und charakteristisch visualisieren. Man kann sogar die elektronische Unordnung durch die statistische Verteilung der Dotieratome zeigen und damit die Beeinflussung der Fremdatome auf die Umgebung veranschaulichen. Schon vor 25 Jahren konnten wir in einer Aufnahme beweisen, wie ungeordnet die Elektronendichteverteilung in solch einem dotierten Halbleiterkristall ist. Das konnte man damals zunächst kaum glauben.“ Das Erkennen dieser Unordnungseffekte war aus seiner Sicht auch wichtig zur Klärung von elektronischen Transporteigenschaften von Halbleiterkristallen. Diese Erkenntnisse halfen auch, um Quanteneffekte besser erklären und verstehen zu können. „Aus den Interferenzen, die sich durch die Elektronenstreuung ergeben, können Sie unmittelbar auf die Wellenlänge der Elektronen schließen. Sie können über diese Aufnahmen die Quantennatur der Elektronen, den Teilchen-Wellen-Dualismus, wunderschön visualisieren“, so Wiesendanger.

Aber lassen sich auf diese Weise auch magnetische Eigenschaften auf der Nanoebene darstellen? Man kann es, und zwar mit einem eigens dafür entwickelten neuen Verfahren, der Spin-Polarisierten Ras-

tertunnelmikroskopie (SP-RTM). Der Spin ist dabei der entscheidende Schlüssel für alle magnetischen Eigenschaften. Wie kann es also gelingen eine Korrelation zwischen der atomaren Struktur, der Elektronenstruktur und der Spinstruktur herzustellen? „Der Trick ist, dass wir die magnetischen Spitzen mit einer ganz speziellen Vorzugsrichtung präparieren. Wir können dabei einen neuen Effekt beobachten, wenn eine solche magnetische, atomare Spitze auf eine magnetische Oberfläche trifft, die Spinabhängigkeit, die magnetische Abhängigkeit des Stromflusses zwischen einer solchen Spitze und der Oberfläche. So können dann unterschiedlich magnetisierte Bereiche sichtbar gemacht werden – und zwar sehr präzise. Ohne die magnetische Spitze – die wie eine extrem empfindliche Kompassnadel funktioniert – könnte man diese Magnetfelder gar nicht erkennen“, sagte Prof. Wiesendanger. Die gemessenen Spin-Signale beim Abrastern der Oberflächen werden am Ende in ein ganz einfaches Höhenmesssignal übersetzt. Magnetismus lässt sich somit in ein Höhenprofil übertragen.

### Erstaunliche Entdeckungen warten in der Nanowelt

„Und da kommen wir nun in den Bereich der neuen Entdeckungen durch diese Messmethode. Bei Mangan wussten wir schon länger, dass auch im Kristall eine antiferromagnetische Ordnung vorhanden ist. Eisen hingegen ist der Prototyp für einen Ferromagneten, bei dem die

atomare Vorzugsrichtungen ganz klassisch alle in eine Richtung zeigen. Wenn man aber eine Eisenatomlage auf einen Wolfram-Untergrund aufbringt, dann kann man Eisen auch in einer antiferromagnetischen Struktur stabilisieren. Uns gelang die erste direkte Visualisierung der antiferromagnetischen Néel-Ordnung auf atomarer Skala“. Dies belegte Prof. Wiesendanger mit eindrucksvollen Bildern aus der fabelhaften Welt der atomaren Schichten am Beispiel von Eisen.

Ferromagnete und Antiferromagnete sind natürlich schon lange bekannt. Aber die magnetische Welt hält noch weitere Überraschungen bereit. Weiter ging es daher mit erstaunlichen Entdeckungen in der Nanowelt, denn magnetische Strukturen sind sehr viel komplexer, als die Wissenschaft noch im letzten Jahrtausend dachte. So gibt es beispielsweise Skyrmionen, magnetische Knoten in der Nanowelt. Dabei handelt es sich um teilchenartige, lokalisierte Spinstrukturen mit einem festgelegten Rotationssinn. Es gibt also keine einzelne Vorzugsrichtung, sondern der Magnetisierungsvektor dreht sich um 360 Grad, ob im oder gegen den Uhrzeiger, es gibt immer einen bevorzugten Drehsinn. Theoretisch vorausgesagt wurde dieses Phänomen schon 1989, aber erst 2013 konnten Wiesendanger und sein Team den praktischen Beweis erbringen. In Hamburg gelang ihnen die erste experimentelle Beobachtung von einzelnen magnetischen Skyrmionen (3D-Spinstruktur von nanoskaligen Skyrmionen) mit extrem kleinen Dimensionen von drei bis fünf Nanometern auf einer Palladium-Eisenschicht mit einer Iridium-Unterlage (Abb. 3).

„Und tatsächlich kann man diese magnetischen Knoten auch künstlich erzeugen und für Datenspeicherung nutzen. Wir können gezielt diesen Knoten mit Hilfe unserer superfeinen Magnetspitze durch gezielten Stromfluss in einer ansonsten ferromagnetischen Schicht erzeugen. Das nennt man lokale Spin-Strom-Injektion. Je nach Stromfluss können die Knoten gelöscht oder wieder erzeugt werden. Das führt natürlich zu ganz neuen Konzepten der magnetischen Speichertechnologien. Die Industrie arbeitet aktuell in verschiedenen Projekten an der Realisierung“, sagte Prof. Wiesendanger.

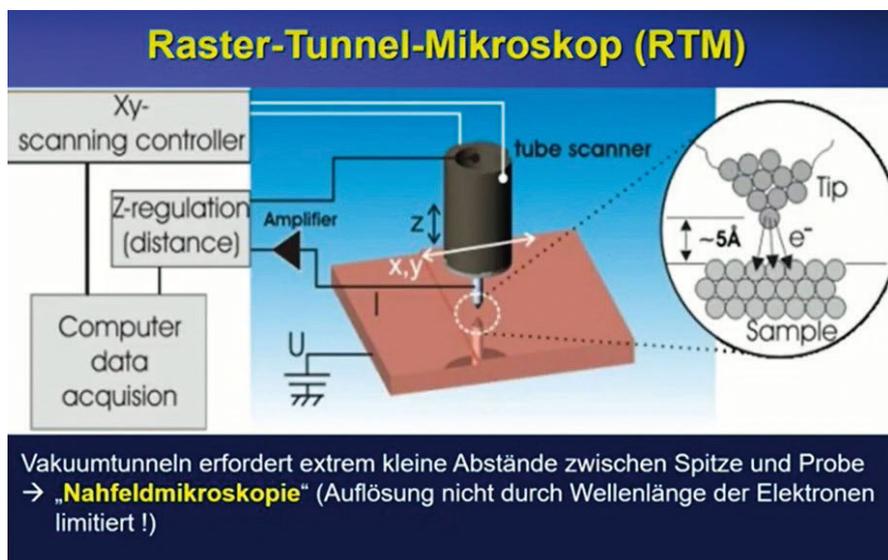


Abb. 2 Folie aus Prof. Wiesendangers Vortrag.

Seiner Forschergruppe gelang die erstmalige Demonstration des „Schreibens“ und „Löschens“ einzelner magnetischer Skyrmionen in einer ultradünnen magnetischen Schichtstruktur. Dies geschieht mit Hilfe der Injektion eines lokalen Spinstroms aus der atomar scharfen Spitze eines spinpolarisierten RTMs. Die magnetischen Knoten sind zwar um einen Faktor 10 größer (ca. 3 nm) als einzelne Atome (ca. 0.3 nm), haben jedoch für Anwendungen den entscheidenden Vorteil einer höheren Stabilität gegenüber Störungen.

Auf der Homepage des Instituts von Prof. Wiesendanger ist nachzulesen: „Besonders die Entdeckung nanoskaliger magnetischer Skyrmionen und deren Manipulierbarkeit mit lokalen Spinströmen haben ein extrem hohes Anwendungspotential im Hinblick auf zukünftige magnetische Speicher und neue Bauelemente der Spintronik. Für die technologische Nutzung solcher Skyrmionen steht die Suche nach Schichtsystemen, welche solche komplexen Spinstrukturen auch bei Raumtemperatur ausbilden, im Vordergrund des Interesses. Auf Grund der Verfügbarkeit atomar auflösender magnetischer Mikroskopiemethoden, wie der spinabhängigen Rastertunnelmikroskopie und der magnetischen Austauschkraft-Mikroskopie, in Kombination mit der Möglichkeit des auf atomarer Ebene kontrollierten Wachstums ultradünner Schichten und lateraler Nanostrukturen, ist die Hamburger Forschungsgruppe hier

in einer hervorragenden Position, um eine neue Generation magnetischer Datenspeicher zu entwickeln. Dabei ist nicht nur die extrem geringe Dimension einzelner Skyrmionen für Anwendungen interessant, sondern insbesondere die einfache Manipulierbarkeit von Skyrmionen durch Spinströme. Damit können nicht nur Datenspeicherkapazitäten erhöht werden, sondern es werden gleichzeitig extrem energieeffiziente Bauelemente der Spintronik mit einer sehr geringen Leistungsaufnahme ermöglicht.“ [2]

Die weitere Entwicklung überlässt Prof. Roland Wiesendanger nun aber der Industrie; er fokussiert sich schon wieder auf ein anderes Forschungsfeld, die Einzelatom-Magnetometrie basierend auf SP-RTM. „Kann ich mit dieser Methode nicht nur eine atomare Auflösung erzielen, sondern kann ich auch einzelne atomare Systeme adressieren? Das heißt, wenn ich ein einzelnes magnetisches Atom auf der Oberfläche habe, kann ich ein magnetisches Signal bekommen von einer magnetischen Spitze und der Nutzbarmachung von spinabhängigen Strömen? Die Antwort ist Ja! Ich muss dazu natürlich eine makroskopische Spitze auf ein einzelnes Atom positionieren. Das ist etwa so, als wenn Sie einen Fernsehturm umgedreht auf einen Tischtennisball setzen und stabilisieren sollen und dann auch sicherstellen müssen, dass die Distanz von wenigen Millimetern konstant bleibt. Und wir können das“, so Wiesendanger.

Das zeigte er anschaulich durch direkte Visualisierung der antiferromagnetischen Kopplung zwischen zwei Cobalt-Atomen auf einer Platin-Unterlage. Das geschieht durch die Tunnelmikroskop-basierte Einzelatommanipulation. „Wir können einzelne Atome mit unserer Rastertunnel-Spitze über die Oberfläche gezielt bewegen, sie manipulieren und zu neuartigen Strukturen anordnen. Wir können somit völlig neuartige Nanomagnete mit neuen Eigenschaften designen“, überraschte und faszinierte Prof. Wiesendanger das Leipziger Publikum.

„Wir spielen damit aber nicht nur, sondern entwickeln neue Funktionalitäten wie das atomare Spin-Logik-Bauelement, in diesem Fall ein Oder-Element. Wir haben als Erste gezeigt, dass man tatsächlich solche Logik-Operationen in atomaren Dimensionen realisieren kann. Wir können mittlerweile durch vertikale Verschiebung einzelner Atome und gezielte Dotierungen sogar dreidimensionale Bauelemente bauen. Wir können einzelne Atome aufnehmen und an einer anderen Stelle wieder einfügen. Das ermöglicht uns Bauelemente, die eine Grundlage und Basiselemente für die Quantencomputer der Zukunft sind. Atomare Technologien werden uns hier ganz neue Möglichkeiten eröffnen“, zeigte sich Prof. Wiesendanger zuversichtlich.

Ziel seiner Arbeitsgruppe ist nun, ein zum atomaren Spin-Logik-Bauelement komplementäres, molekular basiertes Bauelement in enger Kooperation mit Forschungsgruppen der Chemie zu entwickeln, welches nicht mehr auf der Basis der Einzelatommanipulation, sondern auf Basis der molekularen Selbstorganisation hergestellt werden kann und auf Grund der signifikant höheren intramolekularen Spin-Wechselwirkungsenergien potentiell auch bei Raumtemperatur funktionieren wird.

#### Fazit des Vortrags:

- Bildgebende Verfahren wie die Rastertunnelmikroskopie lassen atomare Strukturen und einzelne Atome sichtbar werden.
- Nachweis der „Realität der Atome“ möglich über gezieltes Eingreifen und kontrolliertes Verändern der atomaren Strukturen

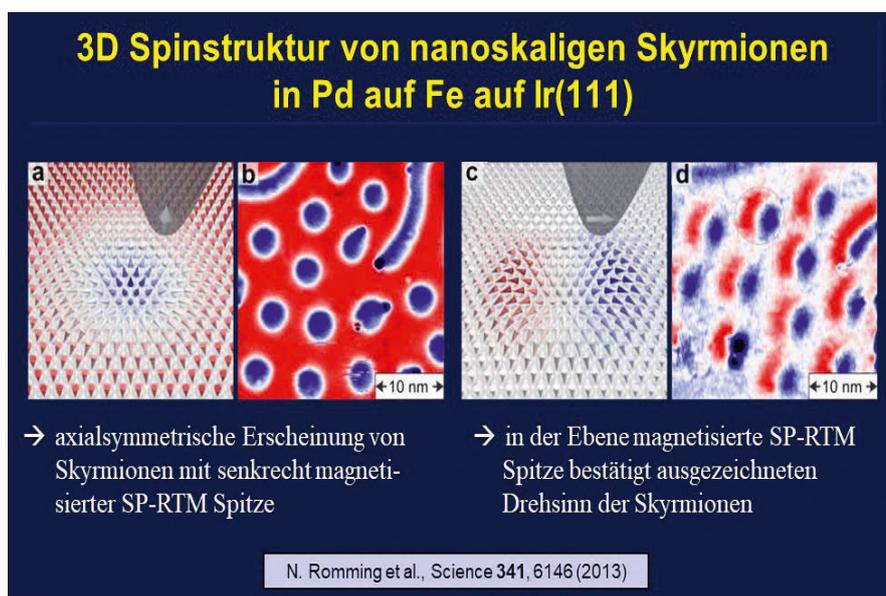


Abb. 3 Folie aus Prof. Wiesendangers Vortrag.

- Verschiedene physikalische Eigenschaften Atom-für-Atom messbar und manipulierbar
- Basis für neue Bauelementkonzepte (Speicher, Logik) auf atomarer Ebene

[1] <https://www.chemie.de/lexikon/Rastertunnelmikroskop.html> - [2] <https://www.physik.uni-hamburg.de/en/inf/ag-wiesendanger/team/wiesendanger-roland/documents/forschungsleistung-wiesendanger.pdf>

## ÖKOLOGIE

### Wildtieren tropischer Regenwälder mit Kamerafallen auf der Spur

**Dr. Andreas Wilting ist Wissenschaftler in der Abteilung Ökologische Dynamik und Leiter der Arbeitsgruppe Biodiversitätsdynamiken am Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung in Berlin-Friedrichsfelde. Die Forschung seiner Arbeitsgruppe konzentriert sich auf die Ökologie und Evolution von Säugetieren in Südostasien, wobei *in-situ*-Feldforschung, Modellierung der Artenverteilung und genetische Datensätze integriert werden, um die ökologischen Anforderungen, sowie die Verbreitung dieser Arten zu erforschen. Während eines einjährigen Aufenthaltes in Nepal und Malaysia entdeckte er als Student seine Faszination für die Biodiversität Südostasiens. Nachdem er 2007 sein Hauptstudium in Würzburg mit Schwerpunkt Tropenbiologie und Tierökologie abgeschlossen hatte, promovierte er 2012 an der Freien Universität Berlin und dem Leibniz-Institut für Zoo und Wildtierforschung (Leibniz-IZW) über die Phylogeographie von Katzen und Schleichkatzen in Südostasien. Seit 2018 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und beschäftigt sich mit der Erforschung und dem Schutz hochbedrohter Säugetiere. In seiner Forschung verbindet er moderne Feld- und Labormethoden (Fotofallen und Umwelt-DNA) mit statistischer Modellierung, um Populationen räumlich zu erfassen und somit gezielter zu schützen.**

Das war auch der Schwerpunkt seines Vortrags „Mit Kamerafallen den Wildtieren tropischer Regenwälder auf der Spur“.

Er zeigte eindrucksvoll, wie er und sein Forscherteam mit Kamerafallen und Barcodes den verborgenen Wildtieren tropischer Regenwälder auf die Spur kommen. In seinem Vortrag zeigte er, wie technische Entwicklungen der letzten zwei Jahrzehnte neue und einzigartige Einblicke in das Herzstück tropischer Regenwälder geben können. „Die unermüdlichen Augen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind heute moderne Kamerafallen, mit denen es uns gelingt, Fotos und Videos verloren und als ausgestorben geglaubter Arten zu bekommen. Die faszinierenden Kamerafallen-Bilder und Artnachweise helfen uns und unseren Partnern, Forschung für den Artenschutz gezielt durchzuführen und somit zum Erhalt der besonders hohen biologischen Vielfalt tropischer Regenwälder beitragen zu können“, betonte Wilting. Die wissenschaftlichen Arbeiten seiner Arbeitsgruppe sind dabei eng mit lokalen Naturschutzakteuren vernetzt, um die Ergebnisse seiner Forschung direkt in die Artenschutzmaßnahmen einfließen zu lassen.

#### Kaninchengroße Hirschart wiederentdeckt

Als eines der bisher bedeutendsten Erfolge seines Forschungsteams ist die Wiederentdeckung des Vietnam-Kantschils (*Tragulus versicolor*, eng. *Silver-backed Chevrotain*) mittels Kamerafalle (Abb. 2). Die kaninchengroße Hirschart galt als ausgestorben – die Wiederbegegnung



**Abb. 1** Dr. Andreas Wilting. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin [www.mika-fotografie.berlin](http://www.mika-fotografie.berlin)]

machte weltweit Schlagzeilen. „Das ist das bisher beeindruckendste Ergebnis unserer Forschung. Vor hundert Jahren wurde diese Hirschart erstmals beschrieben, vor dreißig Jahren auf einem asiatischen Wildtiermarkt erneut gesichtet. Meine Arbeitsgruppe hat den Fund 2019 in einem Nature-Journal publiziert. Mit Hilfe von Kamerafallen konnten wir inzwischen drei Populationen in drei Provinzen Vietnams entdecken. Wir suchen jetzt nach weiteren Kantschil-Populationen und setzen mit vietnamesischen Kollegen alles daran, die seltene Tierart zu schützen“, erläuterte Andreas Wilting.

Der Biologe nahm die Zuhörer mit auf eine Reise vom Leipziger Zoo bis ans Ende der Welt, in die Regenwälder des malaysischen Teils auf Borneo. Die Forschung in diesen abgelegenen Gebieten ist immer noch abenteuerlich. Mit dem Geländewagen im Schlamm auf holprigen, abgelegenen, schlaglochdurchzogenen Pisten stecken zu bleiben ist dabei fast schon Alltag. „Das hatte mich als Schüler und Student aber schon immer gereizt, in die Regenwälder zu gehen. In Vietnam ist unsere Forschung sogar noch unzugänglicher, hier müssen wir teilweise wochenlang im Regenwald kampieren. Wir bewegen uns hauptsächlich in der Vertikalen, und es geht in der Regel vorbei an Wasserfällen, steil hinauf. Für jemanden mit Höhenangst wie mich, ist das extrem schwere Forschung, und ich bin sehr stolz auf meine Forschungsteams, die hier wochenlang Unglaubliches leisten. Da stehen dann auch schon einmal Kaulquappen auf dem Speiseplan“, sagte er eindrucksvoll und erzeugte ein entsprechendes Kopfkino im Auditorium.

„Wenn wir dann aber den Weg in den Regenwald geschafft haben, sehen wir nichts. Wir wollen ja eigentlich die Tiere sehen, wir wollen sie beobachten, wir möchten sie zählen können. Aber die verstecken sich, und selbst bei konzentrierten, langjährigen Beobachtungen können uns spektakuläre, seltene Spezies wie der Nebelparder durch die Lappen gehen, und wir verpassen den Moment seines Erscheinens. Das ist das Charakteristikum unserer Forschung. Die Tiere sind im Dickicht oder auf den Baumkronen nur schwer zu erkennen. Auch Schuppentiere sind mittlerweile so selten, dass

**Kamerafallen - Entdeckungen**



**Camera-trap evidence that the silver-backed chevrotain *Tragulus versicolor* remains in the wild in Vietnam**

An Nguyen<sup>1,2</sup>, Van Bang Tran<sup>3</sup>, Duc Minh Hoang<sup>4</sup>, Thi Anh Minh Nguyen<sup>5</sup>, Dinh Thang Nguyen<sup>6</sup>, Van Tiep Tran<sup>7</sup>, Barney Long<sup>8</sup>, Erik Meijaard<sup>9,10</sup>, Jeff Holland<sup>11</sup>, Andreas Wilting<sup>12</sup> and Andrew Tilker<sup>13,14</sup>

Guardian & WWF:  
2019 promising conservation news  
Altmetric score: 3009  
listed in top 100 papers 2019

**Abb. 2** Folie aus dem Vortrag von Prof. Wilting.

man sie kaum vor das Auge bekommt.“ Seine Kamerafallen immerhin haben einige Beweisfotos liefern können. Dass diese Tiere so selten sind, liegt möglicherweise auch daran, dass sie in Malaysia, Vietnam oder China als Delikatesse gelten und somit oftmals im Kochtopf landen oder in der traditionellen Medizin genutzt werden. Südasiatische Säugetiere sind in einer Aussterbekrise! Die Gründe sind Waldverlust und Walddegradation, etwa durch Palmölplantagen, oder illegaler Tierhandel und Jagd.

### Orang-Utans machen seltsame Dinge

Warum es den Forscher ausgerechnet nach Südostasien und die Regenwälder zieht? Darauf gab Wilting eine klare Antwort: „Dort ist die Biodiversität am größten, beherbergt aber auch die größten Risiken für die Tierwelt. Die Bedrohung des Artensterbens ist dort menschengemacht spürbar. Die Weltnaturschutzorganisation IUCN hat drei große Aussterbekrisen erkoren: Die Korallen, Amphibien und die großen terrestrischen Tiere Asiens, zu den die Landschildkröte und Säugetiere gehören. Es gibt auf Borneo 25 große Raubtierarten, von denen die meisten von Ihnen wohl noch nie gehört haben. Eine Gefahr ist ‚*extinction by oversight*‘: Bevor wir überhaupt wissen, dass diese Tiere bedroht sind, sind die Arten vielleicht schon ausgestorben. Wir wissen so unglaublich wenig über die Tierwelt dort.“ Tiere wie der rotschenklige Kleideraffe, das anamitische Streifenkaninchen oder der Riesenmuntjak wurden dort in den letzten 30 Jahren überhaupt erstmals

beschrieben. „Vorher wussten wir aus wissenschaftlicher Sicht gar nicht, dass diese Tiere existieren.“

Und selbst über Tiere, bei denen wir denken, schon alles über sie zu wissen, zeigen seine Kamerafallen oft eine andere Realität. Das verdeutlichte er dann auch an einer Spezies, die uns sehr bekannt vorkommt, aber eigentlich noch viele Überraschungen bereithält. „Wir dachten zum Beispiel, wir wissen alles über Orang-Utans und waren uns sehr sicher, dass die Tiere sich hauptsächlich in den Baumwipfeln aufhalten. Die sitzen da oben auf den Bäumen und fressen Blätter und Früchte. Und dann haben unsere Kamerafallen auf dem Boden aber immer wieder Aufnahmen von Orang-Utans gemacht, die auf dem Boden rumgelaufen sind, auch in Straßennähe. Was uns zu der Hypothese führte, dass die Utans ihre angestammten Baumkronen verlassen müssen, weil die Bäume durch die Straßen beseitigt worden sind und sie daher fußläufig in ihr angestammtes Habitat gelangen müssen. Wir haben Daten gesammelt aus ungestörten Primärwäldern und extrem zerstörten Waldgebieten und gestörten Sekundärwäldern und uns die Häufigkeit der Fotos angeschaut. Da mussten wir feststellen, dass die Menschenaffen in Primärwäldern sogar viel häufiger auf dem Boden sind. Wenn eine Mutter mit ihrem Kind auf dem Rücken zufrieden auf dem Boden spielt, dann muss an unserem bisherigen Weltbild der Orang-Utans einiges geradegerückt werden. Sie nutzen zumindest in Borneo den Boden zur Nahrungssuche und fühlen

sich offensichtlich ganz wohl dabei“, erstaunte und überraschte der Tropenbiologe das Publikum in Leipzig.

### Räumlicher Naturschutz

Durch die Kamerafallen erhalten die Forscher insgesamt ganz neue Einblicke. „So haben wir das anamitische Streifenkaninchen beispielsweise 400 Kilometer entfernt von dem eigentlich vermuteten Verbreitungsgebiet beobachten können – und das zeigt uns einmal mehr, wie wenig wir tatsächlich wissen. Wir wissen eigentlich so gut wie nichts über die Tierwelt vor Ort. Und sicher nicht nur dort.“ Als weiteres Beispiel nannte er die Suche nach dem „Gespenst“ namens Vietnam-Kantschil: „30 Jahre lang gab es keinen Nachweis, viele haben schon vermutet, das Tier sei ausgestorben. Wir konnten es aber 2018 via Kamerafalle fotografieren und wissenschaftlich veröffentlichen. Wir möchten aber nicht nur Entdeckungen neuer oder seltener Arten machen, wir wollen auch deren Lebensweise und Umgebung analysieren. Beim Vietnam-Kantschil haben wir beobachten können, dass es in überwiegend trockenen Regionen vorkommt. Mit hochauflösenden Satellitenaufnahmen der trockenen vietnamesischen Küstenwälder haben wir mittlerweile drei Populationen in drei Provinzen lokalisieren können.“

Von diesen wichtigen Einzelnachweisen führt der nächste Schritt zum räumlichen Naturschutz! Daher bringen Wilting und sein Team Kamerafallendaten mit hochauflösenden Satellitendaten zusammen, um funktionelle Karten zur Verbreitung von Arten zu erstellen. „Wir sammeln mit Fotofallen möglichst viele Aufnahmen unterschiedlicher Arten in einer bestimmten, kartografierten Region wie einem Regenwaldabschnitt, kombinieren diese gesammelten Daten mit hochauflösenden Satellitenaufnahmen der Regionen, bis am Ende ein statistisches Modell entsteht bzw. funktionelle Karten zur Biodiversität und Verbreitung der Arten. Wir können so nicht nur die Verbreitung einzelner Arten, sondern die gesamte Biodiversität räumlich darstellen. Wir können so auf Borneo den Unterschied zwischen naturbelassenen oder bewirtschafteten Waldflächen darstellen, den Zusammenhang zwischen Biomasse der Wälder und

Artenvielfalt zeigen. Waldgebiete mit großen Ölplantagen zeigen deutlich weniger Biodiversität und weniger Säugetiere, das kann auch damit zusammenhängen, dass dort mehr gejagt wird.“ (Abb. 3)

Deutlich wird durch seine Forschung: Der Klimawandel hinterlässt auch im Regenwald seine Spuren, vor allem bei Arten, die in Bergregionen leben. „Zur Priorisierung von räumlichen Naturschutzmaßnahmen haben wir Vorhersagen der heutigen und zukünftigen Verbreitung von 81 Säugetieren wie Fledermaus, Primaten und Raubtiere für 2020, 2050 und 2080 gemacht, um festzustellen, welche Gebiete wir heute schützen müssen, um für die Zukunft gewappnet zu sein. Wichtig ist dabei, ob wir überhaupt die Möglichkeit haben, diese Gebiete zu schützen und unter welchen gesetzlichen Vorgaben diese Gebiete liegen“, erläuterte Andreas Wilting ein Beispiel.

### Treiber des Säugetiersterbens

Auf Borneo ist ein kleiner Teil schon Schutzgebiet, ein weiterer Teil soll Schutzgebiet werden, viele Bereiche werden konvergiert zum Straßen- und Städtebau oder zu Ölplantagen. Ein großer Teil sind Produktionswälder zur Nutzung von Harthölzern. „Was wir umgehend brauchen, ist eine nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung der Produktionswälder, etwa durch zertifizierte Harthölzer, denn das ist der Schlüssel zum Erhalt der Biodiversität, die wir dank unserer Fotofallen in den Wäldern nachweisen konnten. Es ist auch besser für die Natur, wenn diese Hart- oder Tropenhölzer genutzt werden. Denn wenn keine Nachfrage danach besteht, werden diese Nutzwälder umfunktioniert, weil sie keinen Ertrag mehr abwerfen. Stattdessen entstehen dann daraus Plantagen für Öl oder die Herstellung von schnellwachsendem Holz für Toilettenpapier. Auch daran sollte man beim Naturschutz denken – an Angebot und Nachfrage“, mahnte Wilting.

Doch was sind die Treiber des Säugetiersterbens? Wildtierjagd oder Walddegradation? „Wir haben die Nutzwälder Borneos, in denen fast keine Jagd erfolgt, mit Nationalparks in Vietnam und Laos verglichen. Dort gibt es wunderschöne Wälder, in denen es fast keinen Holzeinschlag gibt, aber dafür umso mehr gejagt

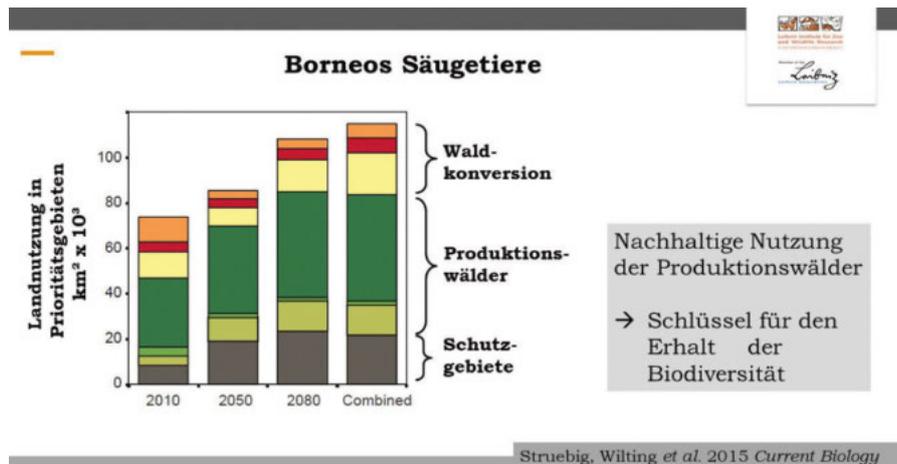


Abb. 3 Folie aus dem Vortrag von Prof. Wilting.

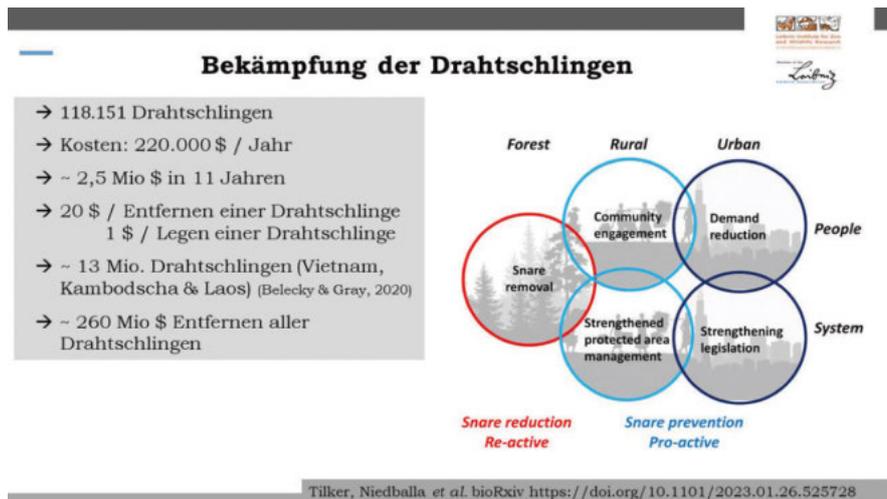
wird. Was passiert in beiden Fällen mit den Säugetieren? In den bejagten Nationalpark-Gebieten sind immer mehr Tiere verschwunden oder deutlich reduzierter als in den reinen Nutzwäldern. Das betrifft vor allem die großen Säugetiere in Vietnam. Dort gibt es keinen Tiger mehr, keinen Leoparden, keinen Nebelparder, keine Bären, es fehlen Elefanten und Otter, und weitere Schleichkatzenarten – alles Arten, die dort normalerweise heimisch sind, jetzt aber nahezu komplett ausgestorben sind. In den degradierten Gebieten hingegen kommen all diese Arten häufiger vor. Somit ist die illegale Jagd die häufig größere und direktere Bedrohung der Artenvielfalt, speziell der Säugetiere, und nicht die sonst an den Pranger gestellte Walddegradation. Da müssen wir dringend umdenken. Aus meiner Sicht müssen hier Entwicklungshilfe- und Naturschutzinitiativen einen ähnlichen Fokus auf die Bekämpfung der Jagd setzen wie auf den Schutz der Regenwälder! Diese sind wichtig für den Klimaschutz, da sie viel Kohlendioxid aufnehmen. Aber es sind zunehmend leere Wälder, und wir wissen nicht welche Auswirkungen das dauerhaft auf das Ökosystem haben wird.“

### Millionen Drahtschlingenfallen

Was können wir tun? Als Beispiel nannte er die Bekämpfung der Drahtschlingenfallen. 40 Ranger fanden bei über 3000 Patrouillentagen im Zeitraum von 2011 bis 2021 über 118000 Schlingen, also 118000 Möglichkeiten, ein Tier zu töten. Durch den Einsatz der Ranger hat die Zahl der Drahtschlingen um über 35 % abgenommen. Das Problem: Ist eine ent-

fernt, taucht mit Sicherheit an einer anderen Stelle schon wieder eine neue Falle auf. Eine Studie vermutet alleine in Kambodscha, Vietnam und Laos über 13 Millionen Drahtschlingenfallen. Zwar würden Ranger im Auftrag von Naturschutzorganisationen immer wieder Drahtschlingen entfernen, aber der Kampf scheint ziemlich hoffnungslos. Der große Hunger auf Wildtierfleisch, vor allem in asiatischen Großstädten, ist ungebrochen, und noch gilt die illegale Jagd als Kavaliersdelikt. Zudem kosten das Entfernen und der Rangereinsatz Geld. Dies zeigt anschaulich eine Übersicht. (Abb. 4)

Wilting sagte: „Schlingfallen entfernen wird daher auf Dauer nicht ausreichen, die Dorfbewohner der Regionen müssen proaktiv im Kampf gegen die Wilderer eingebunden werden, wir müssen aber auch die Nachfrage nach Wildtieren in den Städten durch entsprechende Aufklärungskampagnen reduzieren, denn das Fleisch geht überwiegend in die großen Städte. Und wir müssen das Management der Schutzgebiete verbessern, wir brauchen auch einen gesetzlichen Rahmen, um die Wilddiebe verurteilen zu können. Das Setzen von Schlingfallen ist aber immer noch ein Kavaliersdelikt. Es wird also unmöglich sein, alle Fallen zu entfernen. Wir müssen auch den Einsatz der Forstpatrouillen optimieren und auf die Gebiete konzentrieren mit den bedrohten Tierarten. Die Aufgabe unserer Forschung, aber auch die des Instituts sehe ich ganz klar: Wir betreiben Wildtierforschung für den Artenschutz! Wir wollen einen Beitrag zum angewandten Artenschutz leisten.“



**Abb. 4** Folie aus dem Vortrag von Prof. Wilting.

### Barcodes und Blutegelsuppe

Andreas Wilting sucht auch mit Hilfe von Barcodes nach Tieren. Diese werden mittels Umwelt-DNA aus abiotischen Wasserproben und Bodenproben gewonnen – direkt aus der Umwelt, ohne die Organismen selber zu isolieren. Es geht aber auch aus biotischen Quellen wie Zecken, Mücken oder Blutegel, die mit den Zielorganismen in Kontakt waren. Auf diese Weise können die Forscher auch Arten finden, ohne dass diese in die Kamerafallen gelaufen sind. Er beschäftigt sich dabei vor allem mit Blutegeln. „Wir packen die Blutegel in Blutegelsuppen zusammen, müssen dabei natürlich aufpassen, dass wir selber nicht angezapft werden. Je mehr Blutegel wir sammeln, desto mehr Arten-DNA können wir finden und isolieren und zu Barcodes, also der genetischen Sequenz machen.“

Bei der Analyse und Sequenzierung der Proben kommt viel Bioinformatik zum Tragen. Das sei Magie, wie Wilting betonte. Durch Abgleich mit gesammelten Sequenzen aus Datenbanken lässt sich dann trotz aller Komplexität schnell aus der Blutegelsuppe herausfinden, welche Säugetier-DNA dort vorhanden ist, und das gibt den Forschern Hinweise auf die Arten in dieser untersuchten Region. „Jeder erzielte Nachweis einer Art – ob durch Fotofalle oder Barcode – erhöht die Genauigkeit unserer Modelle und Analysen. Auf diese Weise werden für den Erhalt beispielsweise des Streifenkaninchen genetische Codes gesammelt, um diese auf einer Zuchtstation für die Nachwelt erhalten zu können, falls das Tier in freier

Wildbahn nicht mehr auffindbar ist. Wir konnten durch die Umwelt-DNA auch zeigen, dass sich die Schweine in Zentralvietnam im genetischen Code von denen in Nordvietnam unterscheiden. Wir wollen nun gezielt eine genetische Referenzdatenbank aufbauen. Auch diese kann uns bei der Bekämpfung des Wildtierhandels helfen, um genau nachzuweisen, woher die illegal gehandelte Tiere stammen. Dazu brauchen wir Blutegelsuppen aus ganz Südostasien! Wir können anhand der Datenbanken sogar Wildtierkrankheiten durch Viren identifizieren. Wir konnten sogar zeigen, dass wir durch die Blutegel sogar neue unbekannt Viren, etwa neue Coronaviren entdecken können“, erklärte Wilting.

### Forschung muss schneller werden

Die größte Herausforderung für die nächsten zehn Jahre ist aus seiner Sicht, dass die gesamte Forschung schneller werden muss: „Wir führen mehr und mehr großflächige Forschung mit unseren Partnern vor Ort durch. Wir müssen aber schneller werden. Von der Datensammlung bis zur Analyse müssen weniger als ein paar Wochen oder Monate vergehen. Einige dauern aktuell sogar noch Jahre. Wir brauchen aber eine Echtzeiterfassung der Wildtiere, sonst kommen wir zu spät. Wir brauchen Feldlabore vor Ort, um dort direkt die Sequenzierung in Echtzeit durchzuführen. Wir müssen die Daten schneller auswerten, mit anderen Daten etwa von Satelliten koppeln und in automatisierte Modelle übertragen. Wir müssen Künstliche Intelligenz und Cloud

Computing nutzen. Der Edwardsfasan (eine Zuchtpopulation gibt es seit 20 Jahren im Leipziger Zoo) oder das Saola (zuletzt 2013 gesehen) gelten in der Natur schon als ausgestorben. Das Streifenkaninchen könnte bei schnellerer Umsetzung der Datenanalyse und Priorisierung der Schutzgebiete vielleicht noch gerettet werden.“

Aufgrund der enormen Belastungsfaktoren durch die illegale Jagd, Waldverlust und Klimawandel wird es unglaublich schwer den Artenschwund in den nächsten zehn Jahren aufzuhalten und eine Erholung der Populationen wird mit Sicherheit 30 bis 40 Jahre dauern, falls dies überhaupt gelingen wird.“ erklärt Wilting die Mammutaufgabe des Artenschutzes in Südostasien. Dennoch bleibt er optimistisch, denn neue wissenschaftliche Methoden werden auch neue Möglichkeiten geben, Arten gezielter zu schützen.

## COMPUTERGRAPHIK

### Informatik für die Bilder aus Hollywood

**Zum Abschluss des dritten Versammlungstages lud Professor Markus Gross von der ETH Zürich das Publikum ein, ihm in seinem Vortrag „Informatik für die Bilder aus Hollywood“ hinter die Kulissen des Filmbetriebs zu folgen. Markus Gross ist seit 1994 Professor für Informatik an der ETH Zürich und leitet dort das Labor für Computer-Graphik. In einer zweiten Rolle war Gross als Vize-Präsident für Forschung bei der Firma Walt Disney an der Gründung von Disney Research 2008 beteiligt und leitet seitdem das Labor in Zürich. Seine Forschung umfasst Computer-Animation, Künstliche Intelligenz, Spezialeffekte für Filme, sowie die Simulation digitaler Menschen. Gross diplomierte 1986 und promovierte 1989 an der Universität des Saarlandes. Er hat mehr als 400 wissenschaftliche Artikel verfasst. Die praktische Relevanz seiner Forschung ist durch mehr als 100 erteilte Patente zusammen mit Industriepartnern untermauert. Für seine wissenschaftlichen und technischen Leistungen erhielt Gross zahlreiche Preise und**

Ehrungen, u.a. den *Steven Anson Coons Award* der ACM SIGGRAPH, den *Technical Achievement Award* der EUROGRAPHICS, die *Konrad Zuse Medaille* der GI sowie zwei *Technical Achievement Awards* 2013 und 2019 (Technische Oscars) der Academy of Motion Picture Arts and Sciences. Gross gilt als einer der Pioniere der punktbasierten Graphik. Seine Forschung trug wesentlich zum wissenschaftlichen Verständnis von Punkten für die mathematische Darstellung und Darstellung der 3-dimensionalen Geometrie bei. Er entwickelte auch die weltweit erste Architektur für effizientes Punkt-Rendern. Darüber hinaus haben Gross und seine Studierenden zahlreiche Algorithmen für die numerische Simulation physikalischer Phänomene wie Verformungen, Brüche oder Flüssigkeiten entwickelt. Diese Methoden werden sowohl in medizinischen als auch in Unterhaltungsanwendungen auf der ganzen Welt eingesetzt.

Computer-generierte, virtuelle Welten und digitale Menschen sind mittlerweile zu einem zentralen Bestandteil moderner Unterhaltung geworden. Dies umfasst nicht nur computer-animierte Kinofilme oder Videospiele, sondern auch innovative Formen der interaktiven Unterhaltung. Die erfolgreiche Umsetzung solcher Medienformate erfordert eine Symbiose von künstlerischen und wissenschaftlich-technischen Elementen, wobei einerseits neuartige Methoden der Computergra-



Abb. 1 Prof. Dr. Markus Gross, ETH Zürich und Chief Scientist der Walt Disney Studios. [Foto: MIKA-fotografie | Berlin www.mika-fotografie.berlin]

phik den Animationskünstler inspirieren und andererseits künstlerische Anforderungen die Forschung im Bereich Computeranimation vorantreiben. In seinem Vortrag beleuchtete Markus Gross diese Symbiose aus Kunst und Wissenschaft und zeigte anhand von Beispielen aus Disney-Produktionen, wie jüngste Resultate aus der Informatik-Forschung im Be-

reich der Computeranimation ihre Anwendung in der Hollywood-Unterhaltung finden. (Abb. 2) Insbesondere steht dabei auch die Kontrollierbarkeit der Verfahren durch den Künstler im Vordergrund. „Zentrale Rollen nehmen Methoden zur Erstellung und Animation von lebensechten Digitalen Menschen ein, Verfahren zur virtuellen Filmproduktion, sowie interaktive, digitale Charaktere. Innerhalb all dieser Forschungsthemen führt die künstliche Intelligenz zu sehr großen Fortschritten“, führte der Filmenthusiast aus, warnte aber schmunzelnd vorab, dass es neben vielen Bildern aus bekannten Hollywood-Filmen auch zwei mathematische Gleichungen geben werde.

### Digitaler Schnee fällt in Hollywood

„Wenn gefragt wird, was wir in den Disney-Studios so treiben, dann zeige ich gerne Ausschnitte aus Animationsfilmen wie etwa dem Erfolgsfilm ‚Frozen‘. Da kamen die Animationskünstler drei Jahre vor Fertigstellung des Films auf uns zu mit dem Wunsch, sie bräuchten digitalen Schnee, der realistisch aussieht. Die im finalen Film gezeigten Bilder von Schnee existieren nur als Computerprogramme und Algorithmen. Nichts davon ist real. Es ist ausschließlich Informatik und Mathematik“, sagte Prof. Gross. Für die exakte Darstellung der Schneeflocken – von denen im realen Leben jeder Kristall einzigartig ist – ging einer seiner Doktoranden an der ETH Zürich in die Schweizer Berge, vermaß Schneekristalle und nahm das

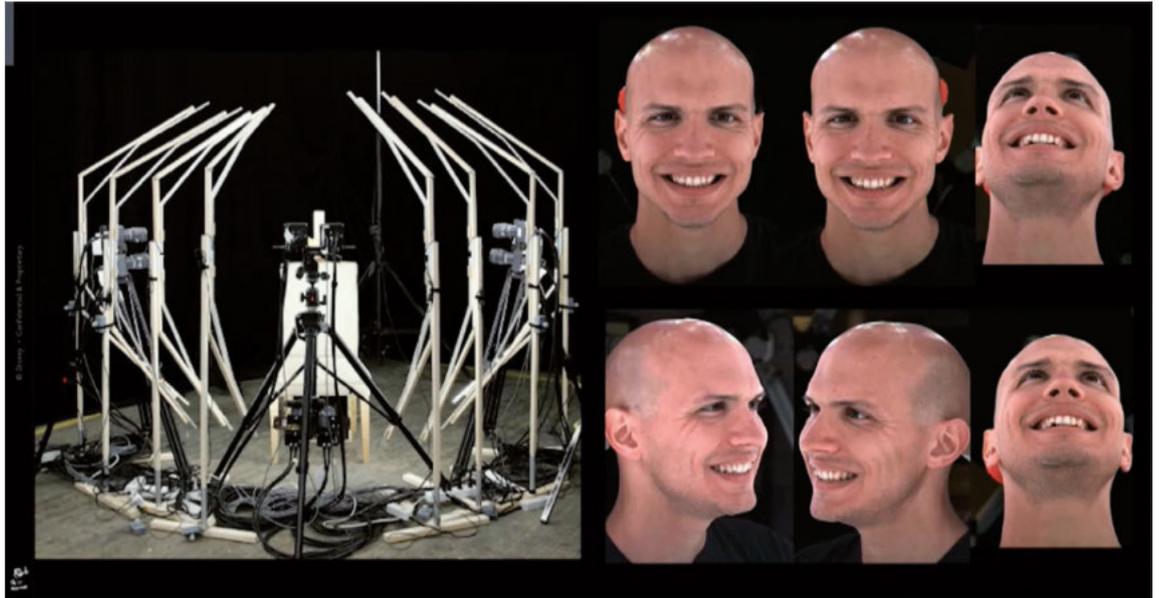
Diffusionsmuster von Schnee auf. Maschinelles Lernen ermöglichte anschließend die Berechnung der Interaktion aus Schneeoberfläche und Lichteinstrahlung. Digitaler Schnee aus Davos spielt also mittlerweile oscarreif in Hollywood mit.

„Wir machen Forschung und Entwicklung neuer Technologie für die Filmproduktion.“



Abb. 2 Folie aus dem Vortrag von Prof. Gross.

**Abb. 3** Der Medusa-Scanner zum Digitalisieren von Gesichtern. [Folie aus dem Vortrag aus dem Vortrag von Prof. Gross]



Dabei spielt schon heute KI bei verschiedenen Prozessen der Filmproduktionen eine wichtige Rolle, ob bei der Vorproduktion, der visuellen Effekte oder beim Mastering des Films in analoge oder digitale Formate. KI steigert die Effizienz und senkt die Produktionskosten. Wir geben den Künstlern Werkzeuge an die Hand, mit denen sie ihre Geschichten noch besser erzählen können. Wir fokussieren uns dabei auf Visual Computing, KI und maschinelles Lernen, inklusive Bildanalyse und Bildsynthese“, zeigte Gross auf, wie künstliche Intelligenz bereits die Filmbranche nicht nur in Hollywood oder den Disney-Studios beeinflusst.

Im Einzelnen ging der filmbegeisterte Informatikprofessor dann auf verschiedene Aspekte wie „digitale Menschen“ (Avatare), neuronale Bildsynthese oder spezielle Bewegungsmuster in der digitalen Filmwelt ein.

### Digitale Menschen

Die Erzeugung fotorealistischer digitaler Gesichter und Menschen wird für die Filmindustrie immer wichtiger, vor allem bei der Erschaffung von ausdrucksstarker Mimik. Mittlerweile können auch rein digitale Wesen glaubhaft eine sehr hohe emotionale Tiefe erzeugen und vermitteln, wie Hulk von den Avengers oder Gollum aus der „Herr der Ringe“-Trilogie. „Wir wollen als Firma Charaktere entwickeln, die emotional verbinden und berühren. Und dies funktioniert vor allem über überzeugende Gesichter. Jede Bewegung des

echten Schauspielers wird dabei über eine digitale Helmkamera übertragen und umgerechnet. Je ähnlicher ein Roboter oder eine digitale Figur uns als Mensch wird, desto mehr können wir für ihn empfinden. Mit einem Strichmännchen können wir natürlich weniger verbinden als mit einem humanoiden Roboter. Es darf aber nicht in Ablehnung oder Missgefühl abgleiten“, sagte Professor Gross.

„In Zürich haben wir dafür den Medusa-Scanner entwickelt, mit dem wir digitale Modelle von realen Gesichtern erzeugen. Man nimmt damit ein Gesicht von verschiedenen Perspektiven auf und erzeugt mit viel Informatik und Algorithmen Rohdaten. Man kann mittlerweile bis zur Stufe einzelner Poren digitalisieren und Mikromimik erzeugen. Um Gefühle wie Trauer, Hass oder Freude auf die Gesichter der digitalen Protagonisten zu zaubern, braucht man dafür in der Regel 24 Basisgesichter mit verschiedenen Gesichtsausdrücken, die man dann entsprechend modellieren kann.“ (Abb. 3)

Neue Technologien werden von seinem Team direkt unter Aufsicht am Filmset getestet und verbessert. So hat der Medusa-Scanner den Nachteil, dass der Darsteller nur das Gesicht bewegen darf, ansonsten muss er arretiert werden. „Das System haben wir dann entsprechend erweitert und verbessert, damit sich der Darsteller zusätzlich im Käfig bewegen kann. Wie bei der Neuverfilmung von Aladin mit Will Smith, der den Geist aus der Flasche spielt. Smith war im Film al-

lerdings nicht blau angemalt, sondern eine rein digitale erzeugte Filmfigur, die aber täuschend echt aussieht“, nannte Gross ein Beispiel.

### Gesichtsdatenbank

Mittlerweile gibt es auch spezielle Augenscanner, um digitale Augen noch überzeugender zu gestalten, dass selbst Kapillarstrukturen sichtbar werden. Aus den Fotos der Augen können dann dreidimensionale Strukturen der Pupille berechnet werden. „Digitale Augen gehören daher auch zu unserer Produktlinie für visuelle Effekte. Selbst Barthaare stellen kein Problem dar. Diese werden aus den Gesichtern einfach digital entfernt, ohne dass sich der reale Darsteller dafür rasieren müsste. Die Schauspieler werden gewissermaßen virtuell rasiert“, so Gross. Umgekehrt können den digitalen Darstellern natürlich auch jegliche gewünschte Bartfrisur und Bartform digital ins Gesicht gezaubert werden.

Mit all der Technik und den gesammelten Daten ist eine umfangreiche Gesichtsdatenbank entstanden. Dazu sagte Prof. Markus Gross: „Wir haben die Künstliche Intelligenz und die tiefen neuronalen Netze mit Daten gefüttert und mit Anthropologen eine Gesichtsdatenbank erstellt und Mimiken über die Zeit (sprechend) aufgenommen. Dazu nutzen wir leistungsfähige Scanner mit extrem hoher digitaler Auflösung. Es werden nichtlineare 3D-Gesichtsmodelle erzeugt mit einer Trennung von Identität des

Menschen und einzelnen Gesichtsausdrücken. Wir sprechen hierbei von generativen neuronalen Netzen oder generativer Modellierung oder von einer Identitätssynthese. Damit können dann synthetische Gesichter von Menschen erzeugt werden, die gar nicht real existieren. Wir füttern das neuronale Netz mit den Gesichtsgeometrien. Das neuronale Netz kann diese dann selbstständig ergänzen oder neugestalten und kombinieren. Das Netz halluziniert anschließend den Rest wie Augen, Haare etc. einfach dazu.“

### Neuronale Bildsynthese

Gut trainierte neuronale Netze können sogar schon ohne Computergraphik selber synthetische Figuren bzw. Gesichter erzeugen, stellte Gross dar. Ohne Zweifel ist diese hochkomplexe Technologie für visuelle Effekte disruptiv, denn sie kann Gesichtsbewegungen synchronisieren. „Animationskünstler geben dem synthetischen Konstrukt dann am Ende noch manuell den Feinschliff, damit ein Hulk auch wirklich überzeugend wirkt. Deepfake-Programme sind zwar noch nicht in Kinoqualität, aber man sie heute schon nutzen. Wir können auch Varianten von Menschen erzeugen. Man kann aus einem bestimmten Grundgesicht je nach Wunsch Veränderungen vornehmen. Das sind dann generative Diffusionsmodelle, wir sprechen in diesem Fall von Doppeltgänger-Synthese“, beschrieb Gross. Hinzuweisen sei an dieser Stelle, dass die Deepfake-Technik nicht nur „ungefähr-

lich“ in Hollywood-Blockbustern zum Einsatz kommen kann. Jede Technik kann auch immer im negativen Sinne genutzt werden. So können Videos heutzutage gefälscht werden, in dem sie Gesichter imitieren und Stimmen täuschend echt nachahmen. Solche Deepfakes werden sicherlich häufig zum Spaß oder zur Unterhaltung veröffentlicht. Gefährlich kann es aber dann werden, wenn sie zur Verbreitung von Desinformation eingesetzt werden oder aber um einzelne Personen zu diskreditieren.

### Synthetisches Altern

Synthetisches Altern oder das Verjüngen durch die Face-Walking Technologie funktioniert heute ebenfalls aus Sicht von Professor Gross bereits sehr überzeugend und wird genutzt, um gealterte Kinostars in ihren berühmten Rollen wieder jünger aussehen zu lassen. Aktuelles Beispiel dieser *De-Aging*-Technologie ist der mittlerweile über 80 Jahre alte Hollywood-Veteran Harrison Ford, der im neuesten „Indiana Jones“-Film durch KI auf Mitte 30 verjüngt wird, um dort in seiner Parade-rolle neue Abenteuer bestehen zu können. Umgekehrt kann auch jedes jung aussehende Gesicht ziemlich realistisch digital altern.

### Computer-Animation

Dann wurde es in seinem Vortrag doch noch etwas mathematisch: „Alle KI-Tricktechnik basiert auf zwei Fundamentalgleichungen der Bildsynthese, die es zu

lösen gilt. Die Integralgleichung berücksichtigt vor allem die verschiedenen Lichtintensitäten in einem Raum bzw. in einer Filmszene, die in die Berechnung einfließen müssen. Die Lösung der Gleichung erfolgt durch die Monte-Carlo-Integration“, so Gross. *(Dabei werden im Definitionsbereich einer Gleichverteilung folgend zufällige Werte erzeugt; die zu integrierende Funktion  $f$  wird an diesen Stellen ausgewertet. Anschließend wird der Mittelwert dieser Funktionswerte gebildet und mit der Breite des Definitionsbereiches multipliziert. Dieser Wert wird dann zur Schätzung des Integrals verwendet. Anmerkung d. Red.)*

Um die computeranimierten Bilder im Film ohne Rauschen bzw. verrauschte Bilder scharf und in hoher Auflösung zu erzeugen sind allerdings gewaltige Rechenleistungen notwendig. „Für einen 90-Minutenfilm können dann schon mal leicht über 500 Mio. CPU-Stunden Prozessorzeit zusammenkommen, und mehrere Millionen Dollar an Kosten entstehen. Man kann aber neuronale Netze so trainieren, dass sie auch teils verrauschte Bilder im Postprozess der Fertigstellung entrauschen können, indem man diese mit den Bildern alter Digitalfilme füttert. Das Netz lernt dann, Rauschen durch Details zu ersetzen, also jedes fehlende Pixel durch eine sinnvolle Ergänzung (Haarfarbe, Hautpore etc.) eigenständig aus dem zuvor Gelernten zu vervollständigen. Das spart dauerhaft Rechenkapazität und Zeit und damit Kosten.“

**Interaktive Charaktere**

1. Genereller Dialog (GPT-3)
2. Integrität der Figur
3. Persönlichkeit und Emotion
4. KI-basierte Animation
5. Synthese der Stimme
6. Wissensrepräsentation
7. Intention und Planung
8. Interaktion mit der realen Welt

Disney RESEARCH STUDIOS

ETH zürich

The slide features a list of eight points on the left and an illustration on the right. The illustration shows a character in a blue and red outfit standing inside a transparent glass display case. A person in a dark jacket is looking at the character from the left. The background is dark with some purple and blue light effects.

Abb. 4 Folie aus dem Vortrag von Prof. Gross.

### Virtuelle Produktion

Ein Animationsfilm entsteht, im Gegensatz zu einem normalen Spielfilm (*Live Action*), wie ein Computerspiel. Dazu werden Konzepte der Story und einzelner Filmfiguren erstellt und dann alles – Puzzleteil für Puzzleteil – zusammengefügt. Dazwischen wird schon an den Bildern gerechnet, die dann immer mehr verfeinert werden. Gross träumt davon, dass Regisseure in Zukunft interaktiv mit den digitalen Figuren Szenen erstellen können, dass die digitalen „Darsteller“ also ähnlich wie echte Darsteller geführt werden können. „Szenen können dann immer wieder wiederholt werden, bis die Regie beispielsweise mit den Bewegungen der Figur in der Szene zufrieden ist“, so Gross. Eine Hilfe dabei ist *Motion Capture*: in entsprechend ausgestatteten Anzügen liefern reale Darsteller die Bewegungsdaten, mit denen die neuronalen Netze gefüttert werden und die daraus dann die digitalisierten Wesen erschaffen, die wiederum in Realzeit kontrolliert werden können. Das Studium der Körperbewegungen sei dabei enorm wichtig, so der Schweizer Computerpionier.

### Digitale Explosionen

Neben der perfekten Animation von Figuren geht es in den Animationsfilmen aber auch um die Gestaltung von Landschaften oder physikalisch-basierten Simulationen. „Wir lieben doch alle in Hollywood Explosionen in Filmen, die sind fundamental“, sagte Gross. Zur Berechnung solcher Szenen sind physikalische Grundkenntnisse unabdingbar, viel Physik und Mathematik kommen auch hier zum Tragen, etwa bei Elastizitätsgleichungen. Es müssen komplexe Oberflächen abgebildet werden, es muss eine Dynamik bei einer zerstörerischen Explosion gut und überzeugend animiert werden, da hier auch Flächen- und Geometrieberechnungen berücksichtigt werden müssen.

Auch hierfür kommt eine spezielle Navier-Stokes-Gleichung (eine nichtlineare partielle Differentialgleichung) zum Tragen, die z.B. Aussagen zum Druckverhalten oder der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Flüssigkeiten machen kann. Die *Wavelet-Turbulence Software*, für die Markus Gross den *Technical Achievement*

*Award* (Technik-Oscar) erhielt, war ein Durchbruch in der Filmindustrie und etablierte sich als Industriestandard für die Simulation von Rauch- und Explosionseffekten.

Die Lösung der Gleichung ist zwar realistisch, aber nicht spektakulär genug für Künstler. Für Hollywood muss es spektakulärer und turbulenter sein, als es die für Filmkünstler eher langweilige Gleichung hergibt, so Gross. „Sie ist nicht künstlerisch wertvoll genug. Daher möchten die Filmemacher gerne die Gesetze der Physik verändern“. Ein neuronales Netz kann diese Gleichung entsprechend durch virtuelle Kräfte manipulieren und zum gewünschten Ergebnis führen. KI hilft also auch bei Explosionen nach, um der Realität zu entfliehen, um damit Dinge zu erzeugen, die in der Realität unmöglich sind. Virtuelle erzeugte viskose Medien wie Sirup oder Wasser haben dann ganz andere Fließeigenschaften als echte Medien.

Eingesetzt wird KI auch bei der Bildnachbearbeitung. Unscharfe Bilder oder solche mit niedriger Auslösung können durch KI, die das vorher durch Füttern mit zahllosen Bilddaten gelernt hat, geschärft werden, weil die neuronalen Netze aus der „Erfahrung“ wissen, wo und wie die fehlenden Pixel im Bild ergänzt werden müssen und so hochaufgelöste Details oder Texturen und Oberflächenstrukturen erzeugen. „Die KI kann dadurch Details erzeugen, wo gar keine sind. Wir haben so unfassbar viel Archivmaterial in den Disneystudios aus den vergangenen Jahrzehnten gesammelt, die aber oft von geringer Auflösung und niedriger Bildqualität sind. Dies kann durch unsere Technologie verbessert werden, aber immer unter dem Gesichtspunkt der künstlerischen Kontrolle“, erklärte Prof. Gross. So kann das Auflösungsproblem behoben werden und alte Videoformate digitalisiert und remastered wieder von jungen Generationen neu entdeckt werden.

Ziel all der KI-Technologien ist es, am Ende Zeit und Geld (Serverkapazitäten, Strom, Rechenkapazitäten) bei der Produktion von animierten Filmen zu sparen und gleichzeitig die künstlerischen Freiheiten und die Kreativität auf ein höheres Niveau zu heben.

### Geschichten aus dem Metaverse

Einen visionären Ausblick ins Metaverse wagte der Filmenthusiast Gross am Ende seines bildgewaltigen Vortrags auch noch, denn die reale Welt wird zunehmend digital überlagert und vielleicht begleiten uns bald Avatare durch die reale Welt. „Wir wollen unsere beliebten Disney-Charaktere mit Künstlicher Intelligenz im Metaverse zum Leben erwecken. Wir wollen mit diesen Figuren reden und uns austauschen, sie sollen Teil unserer Welt werden. Aladin kann auf diese Weise ein Freund fürs Leben werden.“ (Abb. 4)

Um Interaktive Charaktere ins Laufen und Sprechen zu bringen, forscht die ETH Zürich an mehreren Aufgabenstellungen:

- 1. Genereller Dialog (GPT-3)
- 2. Integrität der Figur
- 3. Persönlichkeit und Emotion
- 4. KI-basierte Animation
- 5. Synthese der Stimme
- 6. Wissensrepräsentation
- 7. Intention und Planung
- 8. Interaktion mit der realen Welt

Die Beschäftigung mit diesen Themen wird noch Jahre dauern. Gross ist aber überzeugt, dass diese Thematik bzw. diese Avatare als digitale Charaktere in der Verbindung zwischen der realen Umwelt und dem digitalen Metaverse eine wichtige Rolle spielen werden.

Sein Fazit: „Die Methoden der künstlichen Intelligenz sind zu einem zentralen Werkzeug in der Film- und Medienproduktion geworden und formen die Basis für eine neue Generation des interaktiven, intelligenten Geschichtenerzählens.“

Ob in nächster Zeit dann dank KI auf teure Darsteller, Regisseure oder Drehbuchautoren verzichtet werden kann, wird die Zukunft zeigen. Wie wichtig das Thema KI für die Filmbranche ist, zeigte sich erst im Juli 2023, als Hollywood durch einen gemeinsamen Streik von Schauspielern und Drehbuchautoren praktisch still stand: So fürchten die streikenden Darsteller durch KI generierte Avatare ersetzt zu werden, und die Autoren befürchten, dass die Studios Drehbücher von KI-Software schreiben lassen könnten. Gefordert wurden daher klare Regeln für den Einsatz künstlicher Intelligenz bei der Film- und Serienproduktion.