

WWW.OEAW.AC.AT

ÖAW

ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT | 17

**MODERNE BILDGEBENDE VERFAHREN
DAS UNSICHTBARE SICHTBAR MACHEN**

MODERNE BILDGEBENDE VERFAHREN

DAS UNSICHTBARE SICHTBAR MACHEN

**SYMPOSIUM
AM 1. OKTOBER 2019**

INHALT

EDITORIAL

GEORG BRASSEUR	5
HERBERT MATIS	5

BEGRÜSSUNG

GEORG BRASSEUR	7
-----------------------------	---

EINLEITUNG

HERBERT MATIS (Moderation)	9
---	---

VORTRÄGE

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Künstliche Intelligenz im Auge – und in der Medizin	13
---	----

KLAUS ACHTERHOLD

Ich sehe was, was du nicht siehst. Neue Möglichkeiten der Röntgen-Bildgebung
(Aus urheberrechtlichen Gründen konnte der Beitrag leider nicht abgedruckt werden).

GERT REITER

Trends in der Magnetresonanz-Bildgebung	31
---	----

NOTBURGA GIERLINGER

Raman-Mikroskopie an Pflanzenzellen: Chemische Bilder basierend auf Molekülschwingungen	43
---	----

WOLFGANG NEUBAUER

Forensik trifft Archäologie. Bildgebende Verfahren für den nichtinvasiven Blick in den Boden	57
--	----

FRANZ KERSCHBAUM

Das unsichtbare Universum	71
---------------------------------	----

RESÜMEE

HERBERT MATIS	83
----------------------------	----

EDITORIAL

GEORG BRASSEUR HERBERT MATIS

„What we know is a drop, what we don't know is an ocean.“¹ Mit diesen Worten charakterisierte Isaac Newton, wohl einer der größten Gelehrten in der Wissenschaftsgeschichte, im 17. Jahrhundert das Dilemma jeglicher wissenschaftlichen Erkenntnis, dass wir trotz ungeheurer Erkenntnisfortschritte, die seither gemacht wurden, nur einen Bruchteil dessen erkennen können, was – um Johann Wolfgang von Goethe zu zitieren – „die Welt im Innersten zusammenhält“ (Faust I, Vers 382 f.).

Ein Zeitgenosse Newtons, der englische Universalgelehrte Robert Hooker, hat bereits einen Ausweg aufgezeigt, wie man durch den Einsatz von neuen Methoden, Maschinen und Geräten unsere Erkenntnismöglichkeiten erweitern könnte: „Some other Course therefore must be

¹ <https://beruhmte-zitate.de/zitate/1969058-isaac-newton>, access 6. Sep. 2020.

taken to promote the Search of Knowledge. Some other kind of Art for Inquiry than what hath been hitherto made use of, must be discovered; the Intellect is not to be suffer'd to act without its Helps, but is continually to be assisted by some Method or Engine ...“²

Das menschliche Auge ist ein hochempfindliches Sinnesorgan zur Aufnahme und Verarbeitung optischer Reize mit Hilfe von 2 mal 132 Millionen³ lichtempfindlichen Nervenzellen

² “The Present State of Natural Philosophy, and wherein it is deficient”. The Posthumous Works of Robert Hooke ed. By Richard Waller, 1705, pp. 6–7. https://books.google.at/books?id=6xVTAAAAcAAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false, access 6. Sep. 2020.

³ Antonio Bergua, „Das Menschliche Auge in Zahlen“, Springer-Verlag, 2017, pp. 100–105. <https://books.google.at/books?id=MnIqDwAAQBAJ&pg=PA105&dq=menschliches+Auge+Rezeptoren+anzahl&hl=de&sa=X&ved=2ahUKewi3j8Kp7dTrAh>

(Fotorezeptoren), deren Erregungszustand durch die unterschiedlichen Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung aus dem sichtbaren Spektrum verändert wird. Es handelt sich dabei um einen kognitiven Prozess, der es ermöglicht, über die aufgenommenen optischen Reize unsere Umwelt zu visualisieren.

Schon seit der Renaissance wurden technische Geräte entwickelt, um die menschlichen Sinneswahrnehmungen, die es uns erlauben, Informationen aufzunehmen, im Gehirn weiter zu verarbeiten. Dabei wurden die für das menschliche Auge erkennbaren elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich des Lichtes eingesetzt, um den Mikro- und Makrokosmos mit Hilfe von Mikroskopen

[VUfMAKHVBPBywQ6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q=menschliches%20Auge%20Rezeptoren%20anzahl&f=false](https://books.google.at/books?id=VUfMAKHVBPBywQ6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q=menschliches%20Auge%20Rezeptoren%20anzahl&f=false), access 6.9.2020.

und Teleskopen zu erkunden. Der Weg ging dann weiter, indem man neben dem Licht auch andere elektromagnetische Strahlungen mit unterschiedlichen Wellenlängen dazu nutzte, durch Visualisierung unsere Wahrnehmungsfähigkeit zu erweitern, vor allem um das Unsichtbare sichtbar zu machen.

BEGRÜSSUNG

GEORG BRASSEUR

Meine sehr geehrten Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen, ich begrüße Sie heute im Namen des Präsidiums der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ganz herzlich zum Symposium „Moderne bildgebende Verfahren. Das Unsichtbare sichtbar machen“ hier im Sitzungssaal unserer Akademie. Ein besonderer Gruß und Dank gilt dem Organisator der Veranstaltung, dem wirklichen Mitglied Herbert Matis. Er ist Professor emeritus des Instituts für Wirtschafts- und Sozialgeschichte der Wirtschaftsuniversität Wien und wird die Moderation übernehmen. Gerne möchten wir die Diskussionen lebhaft gestalten und laden Sie ein, nach den Vorträgen viele Fragen zu stellen.

Ich begrüße die Referentinnen und Referenten des heutigen Tages, Ursula Schmidt-Erfurth, Klaus Achterhold, Gert Reiter, Notburga Gierlinger, Wolfgang Neubauer und Franz Kerschbaum. Die Vorstellung

der Rednerinnen und Redner übernimmt Herbert Matis im Anschluss. Ich bedanke mich bei den Mitarbeiterinnen im Aktuariat – vor allem bei Frau Julia Weilinger – für die Vorbereitung dieses Symposiums.

Zu Beginn stelle ich kurz die Österreichische Akademie der Wissenschaften vor.

Durch das Akademiegesetz hat die ÖAW schon in der Kaiserzeit den wichtigen Auftrag erhalten, die Wissenschaft in jeder Hinsicht zu fördern. 1847 wurde die Gelehrten-gesellschaft gegründet. Sie umfasst gegenwärtig 770 Mitglieder und 1.700 Mitarbeitende, die sich der innovativen Grundlagenforschung, dem interdisziplinären Wissensaustausch und der Wissensvermittlung widmen, mit dem Ziel, Wissenschaft und gesellschaftlichen Fortschritt zu fördern. Die Mitglieder pflegen einen regen fachübergreifenden Austausch wichtiger Zukunftsfragen, beraten die Politik und die Gesellschaft und



Georg Brasseur ist Professor für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung an der Technischen Universität Graz. 2012 wurde er zum wirklichen Mitglied der ÖAW gewählt. Seit 2013 ist er Präsident der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse.

informieren die Öffentlichkeit über neue wissenschaftliche Erkenntnisse. Die 27 Forschungsinstitute arbeiten im Bereich der anwendungsoffenen Grundlagenforschung in den Geistes-, Kultur-, Sozial- und Naturwissenschaften. Sie setzen Impulse, indem sie zukunftsweisende Forschungsthemen aufgreifen und Verantwortung für die Wahrung und die Interpretation des kulturellen Erbes übernehmen.

Die Akademie der Wissenschaften ist ein lebendiger Ort, an dem wissenschaftliche Leistungen und Erkenntnisse vermittelt werden. Sie bietet intellektuellen Raum für Diskussion und fördert die Gesellschaft. Vor allem fördert sie die Offenheit für Wissenschaft und Technologie. Die verschiedenen Veranstaltungen, die wir vor allem auch für junge Menschen ausrichten, sollen die Faszination für Wissenschaft, Forschung und Technologie wecken.

Ich komme zurück zum heutigen Symposium „Moderne bildgebende Verfahren“. Unsere Augen sind ein unwahrscheinlich leistungsfähiges optisches Instrument. Ein optischer Sensor, insbesondere wenn man diese geniale Bildverarbeitung mitberücksichtigt, die uns von der Natur mitgegeben worden ist. Diese Bildverarbeitung ist imstande, kom-

plexe Prozesse, die für unsere Augen wahrnehmbar sind, in eindrucksvollen Bildern in unserem Bewusstsein entstehen zu lassen. Wir sind also richtige „Augentiere“. Die Metapher „Ein Bild sagt mehr als 1.000 Worte“ drückt diese Fähigkeit sehr gut aus. Es liegt vermutlich in der Natur des Menschen, dass wir versuchen, möglichst alles in Bilder – vielleicht sogar in bewegte Bilder – umzuformen, weil man so sehr viele Informationen in sehr kurzer Zeit sehr einprägsam vermitteln kann. Es wurde zum Beispiel 2017 der Nobelpreis für Physik an drei US-Forscher für den ersten direkten Nachweis von im All entstehenden Gravitationswellen vergeben. Wahrscheinlich hat ein Großteil der Bevölkerung vorher nicht gewusst, was Gravitationswellen sind. Diese periodische Krümmung des Raumes ist eine Folge von sich sehr schnell bewegenden Massen, auch wenn diese sehr, sehr weit weg sind. Mit diesem Phänomen hätte die Bevölkerung vorher gar nichts anfangen können. So etwas entzog sich der Vorstellungskraft der meisten Bürgerinnen und Bürger. Erst durch die grafische Aufbereitung, wie beispielsweise auf dem Deckblatt der Einladung zum heutigen Symposium ersichtlich, konnten Gravitationswellen in der

Öffentlichkeit bekannt gemacht und Interesse geweckt werden. Im Oktober wird der Nobelpreis für Physik vergeben. Ich bin gespannt, ob das Forscherteam, dem es gelungen ist, den direkten visuellen Nachweis für supermassenreiche schwarze Löcher – in dem Fall war es ein schwarzes Loch aus dem Zentrum der gewaltigen Galaxie Messier 87 – zu liefern, heute auch Erwähnung finden wird. Dieses Team hat es geschafft, etwas zu visualisieren, was wirklich unsichtbar ist. Es ist auch ein Beispiel für moderne bildgebende Verfahren; Verfahren, die Informationen für den Menschen perfekt aufbereiten können und damit das Unsichtbare sichtbar machen.

Ich darf damit auch schon das Wort an Professor Herbert Matis weitergeben.

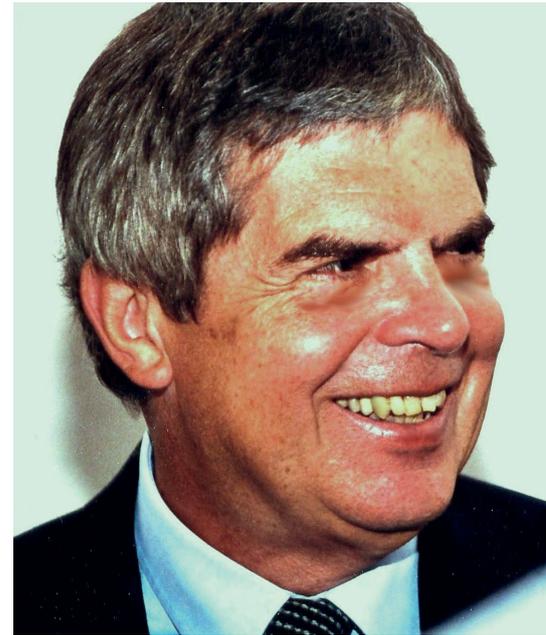
EINLEITUNG

HERBERT MATIS

Meine Damen und Herren, Sie werden sich vielleicht fragen, wie ein Wirtschaftshistoriker dazu kommt, sich mit dem Thema „Moderne bildgebende Verfahren“ auseinanderzusetzen. Hierzu kurz die Vorgeschichte: Ich war gemeinsam mit dem Generaldirektor von Siemens Österreich, Wolfgang Hesoun, bei einem Abendessen nach einem Besuch im Naturhistorischen Museum, und er war mein unmittelbares Gegenüber am Tisch. Wir sind ins Reden gekommen, und ich habe ihm erzählt, dass ich vor Jahren einmal medizinische Röntgenaufnahmen gesehen habe, die mich schon damals sehr beeindruckten, und dass seither moderne bildgebende Verfahren in der Medizin wohl einen unerhörten Fortschritt erlebt hätten. Ich habe Herrn Hesoun sodann gefragt, ob er sich vorstellen könne, moderne bildgebende Verfahren aus dem Healthcare-Bereich an der Akademie der Wissenschaften vorzustellen. Er meinte, dies ließe sich

realisieren, und es ist ja auch jemand von „Siemens Healthcare“ für das heutige Symposium nominiert worden. Georg Brasseur und ich wollten aber das Thema „Moderne bildgebende Verfahren“ an der Akademie bewusst in einen größeren Zusammenhang stellen und auch ein breiteres Anwendungsgebiet ansprechen, wodurch sich fächerübergreifend auch Vertreterinnen und Vertreter ganz unterschiedlicher Disziplinen angesprochen fühlen können.

Es zeigt ja den großen Vorzug einer Gelehrtenengesellschaft wie der Akademie der Wissenschaften auf, dass hier immer wieder interessante Themen quer über die einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen diskutiert werden, also nicht nur rein fachspezifisch, sondern mit vielen möglichen Zugängen. Visualisierung, das Unsichtbare sichtbar machen, wie ja der Untertitel der Veranstaltung lautet, ist ein solches Thema. Es ist bekannt, dass in der Medizin wahrscheinlich



Herbert Matis ist Professor der Wirtschafts- und Sozialgeschichte an der Wirtschaftsuniversität Wien. 1995 wurde er zum wirklichen Mitglied der ÖAW gewählt. 2003 bis 2009 war er Vizepräsident der Akademie.

die spektakulärsten Anwendungen stattfinden, und es ist zweifellos interessant, auch andere Disziplinen, bei denen Visualisierung ebenfalls eine große Rolle spielt, in die Betrachtung miteinzubeziehen und damit ein breiteres Spektrum abzudecken.

Moderne bildgebende Verfahren gibt es also, wie gesagt, in sehr unterschiedlichen Bereichen, und die Fülle der wissenschaftlichen Anwendungen reicht natürlich auch über das hinaus, was wir hier heute in dieser Veranstaltung vorstellen können. In unserem Symposium werden Beispiele aus der Medizin und der Biologie bis hin zur Archäologie und zur Astronomie gebracht. Daneben gibt es natürlich auch viele andere Felder, die man hier beleuchten könnte. Was interessant ist, ist der Umstand, dass alle in diesem Zusammenhang vorgestellten Verfahren auf einer gemeinsamen Grundlage beruhen. Herr Brasseur hat es schon gesagt: Der Mensch ist ein Augenwesen, das seine Umgebung vor allem über dieses Sinnesorgan wahrnimmt. Und um das Unsichtbare sichtbar zu machen, bedient sich die Wissenschaft vor allem der elektromagnetischen Strahlung mit unterschiedlichen Wellenlängen, etwa der Radiowellen, Mikrowellen,

Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen-, Gammastrahlung und so weiter. Die jeweilige Wechselwirkung dieser elektromagnetischen Wellen beziehungsweise Strahlung mit Materie macht es möglich, viele für das Auge normalerweise unsichtbaren Eigenschaften eines Körpers, respektive Materials, sichtbar zu machen. Wir hätten ohne Zweifel in diesem Zusammenhang auch sehr schöne Beispiele in unserem ÖAW-Institut für Materialwissenschaften in Leoben gefunden.

Am Beginn der wissenschaftlichen Visualisierungsbemühungen standen optische Verfahren, mit welchen die dem menschlichen Auge zugänglichen elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich des Lichtes gesammelt und gebündelt werden sollten. Sie kennen alle die Instrumente, die dazu konstruiert wurden: für den Mikrokosmos das Mikroskop, für den Makrokosmos das Teleskop. Damit konnten Phänomene sichtbar gemacht werden, die ohne diese technischen Hilfsmittel dem menschlichen Auge nicht zugänglich sind. Diese klassischen optischen Verfahren sind weiterentwickelt worden und sind natürlich auch heute noch in Verwendung. Aber die Entwicklung ging vor allem in die Richtung, neben dem

Licht auch das gesamte Spektrum elektromagnetischer Strahlung für Visualisierungszwecke einzusetzen.

Sie wissen, dass etwa im Bereich des sichtbaren Lichtes Linsenfernrohre, Riesen- und Spiegelteleskope eingesetzt wurden zur Beobachtung ferner Himmelskörper. Darüber hinaus kam es später noch zur Messung der extraterrestrischen Radio-, Ultraviolett-, Infrarot-, Röntgen- und Gammastrahlung. Und auch bei den Mikroskopen hat es weitere Entwicklungen gegeben, die das ganze Spektrum ausgedehnt haben. Im Frequenzbereich des Lichtes kommen zum Beispiel die Endoskopie und die optische Tomografie zum Einsatz. Im Bereich der Röntgenstrahlung das klassische Röntgen und die Computertomografie. Bei der Kernspintomografie werden Wasserstoffatomen durch Radiowellen starke Magnetfelder angelegt. Sie sehen also, das alles hat sich enorm weiterentwickelt.

Die wohl spektakulärsten Erfolge erzielen, wie ich bereits gesagt habe, bildgebende Verfahren im Bereich der Medizin, wo ebenfalls mithilfe von den Körper durchdringender elektromagnetischer Strahlung ganz neue Möglichkeiten der nichtinvasiven Diagnostik eröffnet wurden. Dabei liefert die Wechselwirkung

der Strahlung mit den Körpern, verschiedenen Detektionseinrichtungen sowie Kontrastmitteln ein Bild des Körperinneren, wobei die einzelnen bildgebenden Verfahren entsprechend dem Frequenzbereich der Strahlenquellen jeweils verschiedene physikalische Effekte messen können. Wir haben heute die Möglichkeit, durch die einzelnen Referate des Symposiums verschiedene Anwendungsbereiche kennenzulernen, in denen durch moderne Methoden der Visualisierung ganz neue Erkenntnisse gewonnen wurden. Wie der Titel es verheißt: Das Unsichtbare wird sichtbar gemacht.

Ich darf nun als erste Vortragende Frau Ursula Schmidt-Erfurth näher vorstellen. Sie ist Professorin an der Medizinischen Universität in Wien und Leiterin der Abteilung für Ophthalmologie und Optometrie am Allgemeinen Krankenhaus sowie Leiterin eines Christian-Doppler-Labors für „Ophthalmic Image Analysis“, kurz OPTIMA, ebenfalls in Wien. Sie absolvierte das Medizinstudium in München, daran schlossen sich mehrfache Auslandsaufenthalte an, unter anderem auch an der Harvard Medical School und am Massachusetts General Hospital in Boston. Es folgte eine Professur

für Augenheilkunde an der Universität Lübeck, bevor sie dann 2004 nach Wien berufen wurde. Die Liste ihrer Publikationen ist mehr als beeindruckend. Die Auflistung der Herausgeberschaften, internationalen Patente, Auszeichnungen und Mitgliedschaften umfassen darüber hinaus mehrere eng beschriebene Seiten; alles aufzuzählen würde den Rahmen hier sprengen. Die Österreichische Akademie der Wissenschaften ist jedenfalls stolz, dass wir Ursula Schmidt-Erfurth zu unseren wirklichen Mitgliedern zählen dürfen. Der heutige Vortrag behandelt das Thema „Künstliche Intelligenz im Auge – und in der Medizin“, und wir sind schon alle gespannt auf den Vortrag. Bitte, Frau Schmidt-Erfurth.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ IM AUGE – UND IN DER MEDIZIN

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Vielen Dank für die freundliche Vorstellung, die Einladung und die Aufnahme in die Akademie der Wissenschaften. Da ist der Stolz natürlich ganz auf meiner Seite.

Außerdem freue ich mich darüber, dass in der Einleitungsrede schon neunmal das Wort „Auge“ aufgetaucht ist. Das ist natürlich genau das Mikrouniversum, in dem ich mich bewege und in das ich Sie nun gerne einladen möchte.

Künstliche Intelligenz und Auge, diese beiden sind jetzt vielleicht nicht etwas, was man automatisch zusammenbringt.

Vor drei Monaten hat meine Tochter die zweite und die dritte Seite

des „New Yorker“ Magazins mit dem Smartphone fotografiert und sie mir geschickt – das ist ja nicht unbedingt eine Hauspostille für Augenärzte –, und da liest man: „[...] the same technology that knows your dog from your cat“, und sieht die entsprechenden Google-Bilder. Und wenn man dann die andere Seite anschaut, wundert man sich schon ein bisschen mehr. Da steht nämlich: “[...] helps doctors know a healthy eye from an at risk one“. Und dann steht da auch noch darunter, dass eben genau dieses Google-System krankhafte Gefäße erkennen kann, am Augenhintergrund von 420 Millionen Diabetikerinnen



Ursula Schmidt-Erfurth ist Professorin für Augenheilkunde und Optometrie an der Medizinischen Universität Wien. Sie ist hier auch Leiterin des Christian Doppler Labors für „Ophthalmic Image Analysis“ (OPTIMA). 2019 wurde sie zum wirklichen Mitglied der ÖAW gewählt.

und Diabetikern, die es auf der Welt gibt und die alle im Lauf des Lebens eine diabetische Netzhauterkrankung entwickeln werden. Das wissen wir. Und was ich besonders lustig finde, ist, dass darunter steht: "[...] empowering doctors through diagnosis, with a little help from Google". Es ist immer schön, wenn man „a little help from Google“ hat. Und jetzt zeige ich Ihnen, was wir ohne „little help from Google“ hier in Wien machen.

Warum sind wir auf diesem Gebiet überhaupt so engagiert? Weil wir wissen, dass das Sehen bedroht ist. Die Ursachen oder die Häufungen von einem schweren Sehverlust in modernen Zeiten, mit einer so gehypten modernen Medizin, sind steigend. Und zwar gibt es 25 Prozent Zunahme an schwerem Sehverlust. Das ist schon mehr als deprimierend. Was sind das für Menschen, die da betroffen sind? Das sind in erster Linie Menschen, die älter werden, also wir alle. Es gibt im Moment 600 Millionen Menschen, die über 65 Jahre alt sind, und das wird noch steigen. Und dann gibt es die Diabetikerinnen und Diabetiker, die zu der Gruppe der arbeitstätigen Bevölkerung zählen, bei der es am häufigsten zur Erblindung kommt. Also Gründe

genug, um sich für das Sehvermögen und für die Netzhaut zu engagieren, denn die ist letztlich das, was hier beschädigt wird.

Hier hilft die künstliche Intelligenz. Die künstliche Intelligenz ist eine relativ neue Entwicklung, es gibt sie noch nicht so lange. Zwar existiert der Terminus schon viel länger, als es Artificial Intelligence wirklich gibt. Denn erst mit der Entwicklung der großen IT-Anwendungen kam langsam das Machine-Learning dazu – und in der Zwischenzeit mit den riesigen Datenmengen, die jetzt digital zur Verfügung stehen, auch das Deep Learning. Deep Learning in Healthcare ist etwas, was zu sehr viel Einsichten und zu sehr viel Publikationen führt, gerade in dieser modernen Zeit. Besonders in der Medizin ist die artifizielle Intelligenz ein ganz relevantes Thema. Warum? Weil das diagnostische Imaging in der Medizin in vielen Bereichen praktiziert wird, hier ist nicht nur die Radiologie zu nennen, sondern auch die Ophthalmologie, bei der 90 Prozent der Diagnosen aufgrund von digitalen Bildern gestellt werden. Der Anwendungsbereich der Artificial Intelligence, gerade in der Bildverarbeitung, ist wesentlich größer als der der genetischen Diagnostik oder

der klinischen Labordiagnostik. Das ist schon einmal eine bedeutende Gewichtung.

Vom Auge, wie gesagt, gibt es besonders riesige Bildmengen. Diese Bildmengen kommen zum Beispiel von der Optischen Kohärenz-Tomografie, OCT abgekürzt. Sie wird mit einem sehr schnellen Laserscanner durchgeführt. Alle von Ihnen, die in der letzten Zeit beim Augenarzt waren, haben wahrscheinlich so ein OCT gemacht bekommen. Das spürt man kaum, es dauert nur 1,2 Sekunden, und es werden in dieser Zeit Bild-daten aufgenommen, die ungefähr 60 bis 80 Millionen Pixel haben, mit einer Auflösung von fünf Mikrometern, nicht invasiv, ohne Farbstoff und es kostet nichts. Das ist etwas, was es in der Medizin in keinem anderen Fachbereich gibt, eine so hochauflösende Darstellung von mikroskopisch kleinen Veränderungen im Auge. Im OCT sieht man diese vielen kleinen Flüssigkeitsveränderungen, die bei einer Makuladegeneration feststellbar sind, der Laserscanner rast dabei über die zentralen drei Millimeter des hinteren Augenpols hinweg. Es sind die einzelnen Netzhautschichten erkennbar. So kann die Netzhaut also dargestellt werden, in all ihren mikroskopisch

kleinen Veränderungen. Und nur zur Erinnerung: Die Makula, das ist der Teil des schärfsten Sehens, ohne den man weder lesen noch Gesichter erkennen kann. Das sind lediglich die zentralen 1,5 Millimeter. Und es ist klar verständlich, dass eine so hohe Auflösung – ohne dass man irgendwelche radioaktiven Mittel verwenden muss, ohne dass es lange dauert und ohne dass es viel kostet – schon ein riesiges Angebot ist.

Das andere, was in der Augenheilkunde wahrzunehmen ist, ist neben der Diagnostik die hoch entwickelte Therapie. Die häufigste Therapie in der Augenheilkunde besteht in Injektionen von Antikörpern direkt in das betroffene Auge. Wir machen das an der Wiener Augenklinik 50- bis 60-mal pro Tag. Sie können hochrechnen, wie oft wir das im Jahr machen. Und in Österreich waren es im Jahr 2016 80.000 Injektionen. Heute sind wir sicher allein in Österreich schon bei einer halben Million Injektionen in Augen von Patientinnen und Patienten, die sonst aufgrund ihrer Netzhauterkrankung erblinden würden. Das ist auch der sogenannte „biggest budget drain in medicine“, weil diese Antikörper natürlich sehr viel Geld kosten und weil man sie nur dann injizieren will, wenn es

wirklich nützt. Die meisten Erkrankungen, wie zum Beispiel Alterungsprozesse und Diabetes, sind chronische Erkrankungen. Das heißt, die Patientinnen und Patienten, die zu uns kommen, bleiben ihr Leben lang in unserer Betreuung und müssen zum richtigen Zeitpunkt die richtige Behandlung erhalten, damit kein Netzhautschaden entsteht, der nicht mehr rückgängig zu machen ist. Wie spielen hier die Diagnostik und die Therapie zusammen? Im OTC ist klar erkennbar, was der Diabetes bewirkt und was die feuchte Makuladegeneration macht, dass nämlich die neurosensorischen Netzhautschichten schwer verändert sind. Durch die Injektion kann man diese Flüssigkeit vertreiben und dann die Netzhaut wieder trocken machen. Das heißt, es ist eine Therapie, die gesteuert wird von Bildern. Und das sind sehr hochauflösende Bilder.

In den klinischen Studien, die all diese neuen Therapien eingeführt haben, sieht man, dass hier der Visus-Gewinn besonders hoch ist. All diese Patientinnen und Patienten sahen deutlich besser, nachdem sie behandelt wurden, aber eben nur in Studien. In der „wirklichen Welt“ – und die wirkliche Welt ist halt eine millionenfache – sind die Ergebnisse

viel schlechter. Das wundert einen ein bisschen, denn wir haben doch so eine hervorragende Diagnostik, in der wir eigentlich alles erkennen können und jede einzelne Flüssigkeitsblase sofort behandeln könnten. Dass dies in der realen Welt nicht so gut ist, liegt daran, dass in den klinischen Studien etwas arbeitet, was ich hier in Wien 2006 gegründet habe, nämlich ein sogenanntes „Reading Center“. Ein Reading Center sammelt Bilder, die von allen klinischen Sites, allen „Centers of Excellence“ in der Welt kommen. Das Wiener Reading Center an meiner Abteilung ist mit 600 Netzhautkliniken weltweit verknüpft, auf allen fünf Kontinenten, auf digitale Art und Weise. So erhalten wir digitale Bilder von der Netzhaut von Millionen von Patientinnen und Patienten, die wir auswerten – und das vor allen Dingen für klinische Studien. Und deswegen sind die klinischen Studienergebnisse auch so besonders gut.

In der wirklichen klinischen Routine aber sitzen Millionen von Augenärztinnen und Augenärzten in ihren abgedunkelten Ordinationen, erzeugen Hunderte und Aberhunderte von Bildern. Aus diesen versuchen sie dann abzuleiten, ob die Patientin oder der Patient jetzt eine Behand-

lung braucht, ob eine Erkrankung vorliegt, ob er oder sie frisch erkrankt ist, ob die Erkrankung schon älter ist, ob sie chronisch ist, ob die Prognose gut oder schlecht ist. Sie sind damit relativ hilflos. Zu viele Fälle, zu viele OCT, die Technologie geht immer weiter. In der Zwischenzeit erzeugen die Scans nicht nur 60 Millionen Pixel, sondern 400 Millionen Pixel in 1,4 Sekunden. Das kann natürlich ein Mensch auch mit einem geübten Auge nicht gut auswerten. Und viele dieser Daten werden gar nicht genutzt. Obwohl es viele Publikationen und immer mehr Einsichten gibt, ist das Problem der Datenflut nicht gelöst. Vielleicht brauchen wir doch „a little help from our friends“ und etwas, was zumindest Google-Style ist. Google ist ein Spezialist und hat mit der Bilderkennung angefangen. Der Begriff „ImageNet“ ist Ihnen vielleicht bekannt. „ImageNet“ ist eine riesige Bilddatenbank, die von der Universität Stanford initiiert wurde. Dazu wurden in den Jahren 2009 bis 2015 viele nicht akademische Bildmacher und Computerfreaks eingeladen, Bilder zu schicken und diesen Bildern gleichzeitig ein Label zu geben. Darauf beruht die Bilderkennungsweisheit von Google größtenteils, und auf dieses „ImageNet“

möchte ich am Ende des Vortrags auch noch einmal kurz zurückkommen. Das Sehen an sich ist ja nichts anderes als Bilderkennung. Wenn ein Baby geboren wird, wenn ein Mensch geboren wird, hat er keine Vorstellung davon, was er sieht. Die Verknüpfung zwischen dem, was der optische Eindruck ist, und dem, was das Bild wirklich bedeutet, entsteht erst durch das Lernen im Gehirn. So kann man das, was wir mit der künstlichen Intelligenz machen und mit diesen neuronalen Netzwerken und Filtern differenzieren, eigentlich genau gleichsetzen mit dem, was visuelle Wahrnehmung in der physiologischen Welt bedeutet.

Das heißt, es entsteht irgendwo ein Bild, das aus Bilddaten besteht. Und diese Bilddaten werden dann über die Sehbahn und über diverse neuronale Filter im Kopf jeder Betrachterin und jedes Betrachters ins Gehirn geschickt. Im Gehirn sind 31 Zentren gleichzeitig online damit verbunden, Bildverarbeitung zu machen. Deswegen bin ich immer dafür, die künstliche Intelligenz gar nicht künstliche Intelligenz zu nennen. Sie ist eine etwas billigere Kopie von dem, was an biologischer Intelligenz ohnehin schon bei der Bilderkennung stattfindet. Wen-

den wir das jetzt auf diagnostische Bilder an. Wie machen wir das? Im OPTIMA-Labor kann man automatisch segmentieren, man kann die pathologischen Läsionen quantifizieren. So etwas war bisher überhaupt nicht möglich. Natürlich können aus Tausenden von Daten auch Krankheitsmuster erkannt werden, und damit kann die Pathogenese von Erkrankungen viel besser verstanden werden. Es können prognostische Aussagen gemacht werden, und wir können verstehen, welche Veränderungen in der Netzhaut dann überhaupt zu funktionellen Veränderungen führen. Dafür habe ich 2013 das „Christian-Doppler-Labor für Ophthalmologische Bildanalyse“ gegründet. Wir sind also schon sieben Jahre aktiv in diesem Labor, mit sehr gescheiterten Menschen aus aller Welt, die alle entweder englisch miteinander sprechen oder gar nicht. Wenn man in das große Labor hineinkommt, tippt jeder etwas in seinen Laptop. Und dann sage ich: „Why don't you guys talk to each other?“ Und dann schauen sie mich an und sagen: „But that's what we are doing.“ Weil sie, obwohl sie im selben Raum sitzen, sich nur digital unterhalten, das sei nämlich effizienter, sagen sie. Und das stimmt auch,

weil sie in der Zwischenzeit schon sehr viele schöne Algorithmen entwickelt haben.

Einer dieser Algorithmen, der wahrscheinlich wichtigste, ist der, den wir jetzt in die klinische Routine bringen werden. Er schaut sich an, was Flüssigkeit in der Netzhaut macht. Diabetes, feuchte Makuladegeneration, Gefäßverschlüsse verursachen Flüssigkeit in und unter der Netzhaut, unter dem Sehpigment und diverse andere exsudative Veränderungen. Und das ist eine Netzhaut, die nicht mehr funktionieren kann und das Sehen verliert und die behandelt werden muss. Zum richtigen Moment. Jetzt kann die Augenärztin oder der Augenarzt wie gesagt diese vielen kleinen Zysten, im OCT als rote Kugeln erkennbar, gar nicht alle durchzählen. Das sind nämlich jeweils mehrere Hundert, und von solchen Patientinnen und Patienten sieht man je ungefähr 80 bis 90 am Tag. Es braucht also ein kluges System, das diese Information über die Flüssigkeit herauszieht. Dafür haben wir Algorithmen entwickelt, die auf Deep Learning basieren. Das nennt man dann End-to-End-Learning, und das ist der besonders „fancy“ Teil von Deep Learning oder Bildanalyse, bei der nämlich gar nichts

Christian Doppler Laboratory 2013...

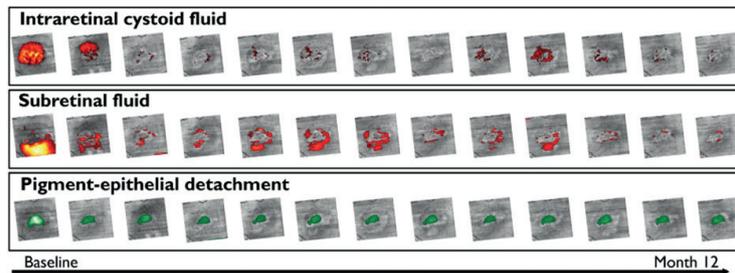
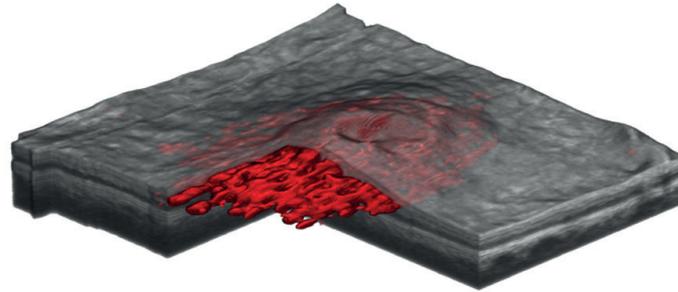


Abb.: Schmidt-Erfurth, U., Sadeghipour, A., Gerendas, B.S., Waldstein, S.M., Bogunovic, H., 2019. Artificial intelligence in retina. *Progress in Retinal Eye Research* 67, 1–29.

mehr markiert werden muss und bei der die braven, fleißigen Lieschen im Reading Center gar nicht mehr dort sitzen und „Malen nach Zahlen“ auf jedem Scan durchführen müssen. Sondern dieser Algorithmus erkennt selbst – über eine sogenannte

Encoder-Decoder-Architecture oder eine U-net-Architecture, das ist in der Zwischenzeit ein Standardbegriff im Deep Learning geworden –, wo Veränderungen in Form von Flüssigkeit in der Netzhaut sind. Er kann sie lokalisieren und auch quantifizieren.

Diese Art der artifiziellen Intelligenz, des Deep Learning in der Medizin wurde 2015 entdeckt, das heißt, da waren wir schon zwei Jahre in diesem Bereich aktiv und sonst niemand, das können wir mit Stolz sagen. Da waren wir die Pioniere. Das wurde benannt als eine der “worldchanging ideas which will change and improve the world – and not only healthcare”. Was haben wir mit diesem Algorithmus lernen und zeigen können? Wir haben zeigen können, dass bei all diesen Erkrankungen, wie diabetische Makulopathie, choroidale Neovaskularisation und Gefäßverschlüssen, häufig bei allen Gesellschaftserkrankungen, hier Flüssigkeit in der Netzhaut in kleinsten Mengen gemessen werden kann. Wir haben gezeigt, dass die „area under the curve“, das heißt die Präzision, hier bei 96 Prozent liegt. Das ist wahnsinnig hoch, denn wir befinden uns hier in einem menschlichen Mikrouniversum.

Wir haben das außerdem auch in der Auswertung verknüpft, indem wir geschaut haben, welche Art von Flüssigkeit sich findet. Wo ist diese Flüssigkeit in diesem kleinen Bereich genau, diesen zentralen 1,5 Millimetern der Netzhaut, und zu welchem Zeitpunkt befindet sie sich dort? Dann kann mit einem anderen

Algorithmus ein Ranking gemacht werden, und das zeigt uns, welche Art von Flüssigkeit überhaupt die relevante für das Sehvermögen ist: nämlich die „intraretinal fluid“, wie man im Ranking der 20 wichtigsten Ursachen sieht. Dieses Ranking geht noch viel weiter, weil die Bildanalyse natürlich sehr viele Parameter findet. Was wir damit gezeigt haben, ist, dass nur die Flüssigkeit in der Netzhaut wichtig ist. Das ist dummerweise gerade die, die mit so vielen Zysten vorkommt und von der Ärztin, vom Arzt besonders schlecht quantifiziert und überhaupt entdeckt werden kann. Wir haben auch gezeigt, dass man nur, wenn man diese intraretinale Flüssigkeit misst, dass 100 Nanoliter – wir sind wirklich in einem klitzekleinen Labor hier in der Makula – zu einem Sehverlust von vier Buchstaben auf einem standardisierten Sehtest führt. Vergleicht man den tatsächlichen Visus, der am lebenden Patienten gemessen worden ist, und das, was der Algorithmus misst, sieht man, wie eindrücklich genau der Algorithmus – wenn er nur die Netzhautbilder vorliegen hat und die Patientin oder den Patienten nie gesehen hat – sagen kann, wie deren oder dessen Sehvermögen ist. Das heißt, er schaut sich

nicht nur die Morphologie, sondern auch die Funktion an.

Das macht nun vieles möglich. Wir können nämlich voraussagen, wie oft eine Patientin oder ein Patient behandelt werden muss. Ich habe bereits gesagt, das sind alles lebenslange Behandlungen, die auch sehr teuer sind. Allein an der Augenklinik am AKH geben wir drei Millionen Euro im Jahr nur für diese Medikamente, diese Antikörper, aus – ein großer Teil des Budgets. Und das wollen wir natürlich sinnvoll verwenden, und wir wollen das so machen, dass so viel behandelt wird wie nötig, aber so wenig wie möglich, „pro re nata“ also. Bisher war es nicht möglich, das genau zu bestimmen. Der Algorithmus kann es aber, der Algorithmus ist hier auch besser als der Mensch. Somit können wir natürlich unser Wissen über die Erkrankung deutlich erweitern und damit auch die Behandlung. Und wir können der Patientin oder dem Patienten auch sagen, was sie beziehungsweise er für eine Prognose hat. Das ist in der Medizin ja immer ganz besonders wichtig. Vor allen Dingen, wenn es sich um so eine lebenslange Behandlungs- und Betreuungsaufgabe handelt.

Was wir als Letztes gemacht haben, war eine ganz große Studie, die soge-

nannte AREDS-Studie. Bei ihr wurden diese Medikamente in einer niedrigen und einer hohen Dosis gegeben und entweder monatlich ständig, was natürlich in der „normalen Welt“ unbezahlbar und undurchführbar ist, oder nach einer „loading dose“ dreimal injiziert, dann nur nach Bedarf. Nämlich dann, wenn Flüssigkeit in der Netzhaut war. Wenn man bedenkt, dass das 1.097 Patientinnen und Patienten sind und dass diese 1.097 Personen über zwei Jahre jeden Monat so ein OCT bekommen haben, dann endet man bei 25.300 Volumenscans, die Millionen von Pixeln haben, und man endet bei 3,1 Millionen von Einzelbildern, also einer riesigen Menge.

Damit man überhaupt über den Zeitverlauf ein Follow-up machen kann, braucht es wieder einen anderen Algorithmus, nämlich zur Registrierung, sodass man wirklich von Untersuchung zu Untersuchung und auch zwischen den Patientinnen und Patienten die Bilder genau übereinanderlegen kann. Auch das ist gar nicht so trivial. So bekommt man ein dreidimensionales Volumen, und hier kann man dann die Flüssigkeit in der Netzhaut, das sind eben diese roten kleinen Poren oder Zysten im OCT, separat erkennen. Und genau

auf die kommt es an, die müssen wir messen. Die andere Flüssigkeit ist dagegen unter der Netzhaut und unter dem Sehpigment, das sind viel größere Poolings, aber für das Sehen nicht relevant, wie wir gezeigt haben. Mit diesen Studiendaten und dem entsprechenden Follow-up konnten wir demonstrieren, dass die intra-retinale Flüssigkeit auf die erste Injektion hin bereits verschwindet und dass wir das auch noch genau messen können.

Ich möchte noch einmal darauf hinweisen, dass es sich hier um Nanoliter handelt. Es ist ja in der Medizin kaum einmal so, dass man so kleine Veränderungen im Gewebe auch wirklich messen kann. Dann ist es die Flüssigkeit unter der Netzhaut, auch sie geht weg unter Therapie. Es ist sehr viel mehr Flüssigkeit unter der Netzhaut vorhanden. Für die Sehschärfe ist sie aber nicht wichtig. Und das, was viele Kolleginnen und Kollegen in der Welt auch noch behandeln, ist Flüssigkeit unter dem Sehpigment. Man sieht aber in der Messung, das kann man gar nicht wegbehandeln. Da ist man sehr schlecht beraten, wenn man hier jedes Mal der Patientin oder dem Patienten eine Spritze ins Auge gibt. Das ist das, was die Bildbearbeitung

bieten kann, und das ist natürlich allein von der visuellen Erkennung schon ein sehr gutes diagnostisches Bild. Und jeder dieser kleinen Flüssigkeitseinschlüsse ist unter fünf Mikrometer groß, also wirklich winzig klein. Wir haben das in dieser Studie aufgrund des großen Datensets genau messen können. Wir sehen, dass unser Algorithmus sehr genau misst. Er erkennt hier nämlich sehr genau, dass dort, wo die Dosis geringer ist, auch mehr Flüssigkeit übrig bleibt, das heißt, es ist wesentlich effizienter, wenn man die Dosis erhöht. Und vor allen Dingen kann man, wenn man die Frequenz der Wiederbehandlung erhöht, wesentlich effizienter behandeln. Es geht natürlich in diesem großen Pharma-Markt, wo es sehr viele Produkte gibt und sehr viele Substanzen, die alle wahnsinnig viel kosten, darum, dass man das bestmögliche Medikament identifiziert. Das kann man auf diesem Wege machen. Jetzt ist, wenn die Netzhaut schon so mit Flüssigkeit überschwemmt ist, eigentlich das Kind schon in den Brunnen gefallen. Diese Menschen sehen schon nur noch ungefähr zehn Prozent. Für das normale Lesen von Buchdruck braucht man 40 Prozent. Mit zehn Prozent kann man nicht allzu viel anfangen.

Man kann vor allen Dingen nicht einmal Auto fahren oder Gesichter erkennen.

Eigentlich ist die Aufgabe der Augenärztin oder des Augenarztes, dass sie beziehungsweise er erkennt, wer so eine Erkrankung entwickelt. Das kann man im OCT jetzt viel besser voraussehen. Man kann nämlich bereits in einem Stadium, in dem die Patientinnen und Patienten noch gar nichts merken, in dem sie noch einen vollen Visus haben, erkennen, dass im Vergleich zum normalen Auge die äußeren Netzhautschichten deutlich verbogen sind. Auch das sieht man nur im OCT. Das sieht die Augenärztin oder der Augenarzt nicht, wenn sie bzw. er ins Auge schaut.

Wenn wir ein OCT einer feuchten Makuladegeneration von dem Algorithmus schichtweise aufbereiten lassen, dann erkennen wir nicht nur, dass dort viele kleine Bogen sind – sie werden Drusen genannt und sind einfach nur Ablagerungen –, sondern wir sehen, dass die neuronalen Schichten in der Netzhaut bereits massiv zerstört sind. Das ist eine wichtige Erkenntnis. Das heißt, dass die Erkrankung wesentlich früher beginnt, und zwar genau dort, wo die Netzhaut am sensibelsten ist. Dafür gibt es wieder andere Algorithmen,

die voraussagen können, bei welchen Veränderungen – und die sind auch wieder nach Häufigkeit gerankt – es so eine feuchte Makuladegeneration gibt, also jene Form, die mit den Spritzen behandelt werden muss. Das sind alles Veränderungen, die mit diesen Drusen, diesen Wellen im Sehpigment, zu tun haben, die sehr gehäuft auftreten. Wir entdecken sie, indem wir den Algorithmus das einfach ganz genau nachmessen lassen. Obwohl: Einfach ist hier gar nicht einfach, weil es sich, wie gesagt, immer um Millionen von Bildpunkten handelt.

Es lassen sich aber auch andere Veränderungen feststellen, die man klinisch gar nicht sehen kann. Hier sind wir im subklinischen Raum. Das ist gar nicht sichtbar für den Kliniker, nur für das OCT-Gerät. Und hier auch nur, wenn der Algorithmus das heraus sucht, erkennbar als kleine, helle Punkte. Diese hellen Punkte sind Sehpigment, das wegläuft, wenn es krank wird, und das ist das, was das Altern an der menschlichen Netzhaut macht. Daraus entwickelt sich dann eine sogenannte geografische Atrophie. Hier ist das Alter ein ganz, ganz wichtiger Faktor. Das bedeutet, dass jeder Mensch im Lauf seines Lebens, je nach genetischer

Ausstattung, früher oder später in jedem Fall sein Sehvermögen aufgrund dieser trockenen Makuladegeneration oder geografischen Atrophie verlieren wird. Das heißt, es besteht hier wirklich ein ganz großer Bedarf, so etwas rechtzeitig zu erkennen.

Jetzt kann man das OCT noch genauer machen, nämlich mit Adaptive-Optics-Methoden. Das kennt mein Kollege aus der Astronomie noch sehr viel besser als ich. Er richtet das Teleskop in das Weltall. Unser All ist die Netzhaut, und hier sieht man, dass beim normalen Altern diese grünen und roten Punkte, nämlich die Stäbchen und Zapfen, schon ein bisschen unregelmäßig werden, aber beim pathologischen Altern zerfallen die Sinneszellen dann und verlassen dann eben den Ort des Geschehens, verlassen ihre Reihe und laufen weg. Migration nennt man das.

Das ist etwas Neues, das hat es vorher nicht gegeben. Kein Mensch hat bislang verstanden, woher die Makuladegeneration kommt, und durch diese künstliche Intelligenz, angewendet auf den hochauflösenden Bildern, kommen wir der Sache sehr viel näher. Was hat der Augenarzt oder die Augenärztin bisher gemacht? Man hat sich den Augen-

hintergrund angesehen. Selbst solche digitalen Fotos haben nur eine begrenzte Auflösung, bestehen nur aus zwei Millionen Pixeln – oder Voxeln in dem Fall. Was man also sehen kann, muss mindestens 100 Mikrometer groß sein. Das, was das OCT sehen kann, ist fünf Mikrometer groß oder sogar noch kleiner. Das ist natürlich ein Quantensprung.

Es gibt jetzt verschiedene Möglichkeiten, hier Künstliche-Intelligenz-Algorithmen anzuwenden. Ein wenig habe ich bereits davon erzählt. Man misst die Netzhautschichten und da vor allen Dingen die neuronalen Schichten. Hier gibt es übrigens denselben Aufbau wie im Gehirn, dieselben elf Schichten des kortikalen Hirns, und deswegen ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass man auch das neurologische oder das Gehirnaltern hier repräsentativ an den Netzhautschichten verfolgen können. Man sieht, wie im Zeitverlauf sich diese Sehpigmente oder neuronalen Zellen, die Sinneszellen, bei der geografischen Atrophie aufmachen und wegwandern. Wenn ein Mensch nicht dazu neigt oder noch nicht in diesem Stadium ist, hat er diese Punkte im OCT nicht. Wir können sie messen und dann zeigen, wie durch dieses Weglaufen dieser Seh-

zellen dann der dunkle Ausfall, die dunkle Stelle, wo Sehen nicht mehr möglich ist, stattfindet.

So hat man eine wunderbare Möglichkeit, die Erkrankungs-pathologie wirklich sichtbar zu machen, und überall dort, wo die Sinneszellen weglaufen, die sich tatsächlich im unsichtbaren Raum befinden, wird dann diese Stelle entstehen, an der die Netzhaut komplett zerstört ist und auch nicht wiederkommt.

Das ist alles Ophthalmologie. Ophthalmologie – vielleicht sagen Sie: „Ja, der Elfenbeinturm Medizinische Universität.“ So ist es aber nicht. Künstliche Intelligenz ist in der Medizin durchaus schon angekommen. In „Nature“ gibt es einen Artikel von Dermatologen, den haben sie lustigerweise „Lesions Learnt“ benannt. Eben durch dieses Deep Learning ist es möglich, zum Beispiel allein mit einer App ein Foto von einem Hautmal zu machen, und der Algorithmus sagt dann mit einer unwahrscheinlichen Genauigkeit, die wesentlich besser ist als der Blick einer Hautärztin oder eines Hautarztes, ob es gutartig oder bösartig ist.

Ein einfaches Foto vom Augenhintergrund wird im Moment bei uns an der Wiener Klinik und an einzelnen anderen ausgewählten Zentren

dazu verwendet, hier ganz andere Informationen herauszuziehen, die mit einer Augenerkrankung nichts zu tun haben. Wenn z. B. ein Augenarzt, auch der größte Experte, es sich ansieht, wird er sagen: „Na ja, das ist ein Patient, er ist wahrscheinlich mittelalt, und es handelt sich um ein rechtes Auge, das ist ganz klar, denn der Sehnerv ist auf der rechten Seite, aber mehr kann ich darüber wirklich nicht sagen.“ Wenn man den Algorithmus darüber laufen lässt, dann sagt dieser: „Dieser Mensch ist 75, er ist weiblich, er hat früher geraucht, raucht jetzt nicht mehr. Das ist sein Blutzuckerwert, sein Blutdruck ist 140 zu 90, und die Wahrscheinlichkeit, dass er in den nächsten fünf Jahren einen Herzinfarkt erleidet, liegt bei 75 Prozent.“

Vielleicht wollen wir das alles gar nicht wissen, aber wenn man sich einmal mit der Idee angefreundet hat, wäre es doch ganz nützlich. Das ist natürlich viel besser als jede klinische Expertin und jeder klinische Experte. Das entsprechende Paper dazu wurde publiziert, darin ist auch nachzulesen, mit welcher Genauigkeit gemessen wird. „Predicting cardiovascular risk“ ist eine der ganz großen Anwendungen der Zukunft, hier sind wir gerade dabei, uns mit den

Kardiologen kurzzuschließen. „The five coolest things on earth“, dazu zählte vor sechs Monaten die Zulassung des IDX-Geräts, das ist das erste autonome, voll AI-basierte diagnostische Gerät. Es gibt in keinem Bereich in der Medizin, auch nicht in der Radiologie, auch nicht in der Pathologie, die Möglichkeit, dass ein Gerät ohne Arzt oder technische Hilfskraft eine genaue Diagnose stellt. Und es ist von der FDA und der EMA zugelassen. Nur dieses IDX-Gerät, eine autonome Kamera, macht Bilder der Netzhaut, erkennt dann dort pathologische Stellen – besonders bei Menschen mit Diabetes findet man diese – und kann mit einer riesigen Genauigkeit feststellen, ob jemand eine diabetische Retinopathie hat und behandelt werden muss. Und auch das hat wieder gezeigt, dass das wesentlich besser ist, als die menschliche Expertin oder der menschliche Experte es jemals könnte.

Die menschlichen Expertinnen und Experten im „Vienna Reading Center“, das sind, glaube ich, die Menschen, die sich am meisten in ihrem Leben bereits mit Bildern von diabetischen Augenhintergründen haben herumschlagen müssen; und trotzdem sind sie wesentlich schlechter als der Algorithmus. Das auto-

matische Tool gibt es jetzt in Österreich. Wir haben diesen Scanner in Zusammenarbeit mit unseren Kolleginnen und Kollegen in Iowa jetzt in den Diabetes-Kliniken aufgestellt. Wenn Sie eine Person kennen, die Diabetes hat, schicken Sie sie in die Diabetes-Klinik des AKH oder in die Rudolfstiftung oder in das Kaiser-Franz-Josef-Spital, dort kann sie eine genaue Augendiagnostik erhalten. Wie gesagt, sie ist besser als die bei der Augenärztin oder beim Augenarzt, aber das sagen Sie dort bitte nicht, denn sonst kriege ich gleich wieder einen bösen Brief von der Ärztekammer geschickt. Die Ärztekammer sollte sich am besten nicht mit bösen Briefen aufhalten, sondern sie sollte dieses vor fünf Monaten erschienene Paper wahrnehmen, das von Google stammt. Google beziehungsweise die Veröffentlichung des Papers zeigen hier, dass sie 50 Diagnosen am Augenhintergrund stellen können, und sie sagen aber: „Work removes previous barriers to wider clinical use.“ Warum kommen zum Beispiel in Österreich nur 15 Prozent aller Menschen mit Netzhauterkrankungen rechtzeitig in die Augenarztpraxis? Das ist die klinische Barriere des „wider use“, es sind die Augenarzttermine, es ist die

Tatsache, dass wir viel zu wenig Augenärztinnen und Augenärzte haben. Nur wenn die „removed“ werden, weiß man, was das Geschäftsmodell ist. Das heißt gut, dass Sie mich noch eingeladen haben, nächstes Jahr bin ich vielleicht schon eingespart. „We demonstrate performance that reaches and exceeds that of experts“ ist natürlich kein Abendgebet, sondern es ist eine klare Marktansage. Was hier in diesem Paper gezeigt wird, ist der Algorithmus, er hat eine Fehlerrate von fünf Prozent. Das ist ja an sich auch schon nicht beruhigend, denn wenn man zur Ärztin oder zum Arzt geht, möchte man nicht zu den fünf Prozent gehören, bei denen die Diagnose falsch ist. Wenn Sie aber in eine richtige Augenarztpraxis gehen, dann sehen Sie, wo die „Error Rate“, die Falschdiagnoserate, in Wirklichkeit in der „wirklichen Welt“ liegt. Und das, so glaube ich, ist ein ziemlicher Albtraum – dass Sie bei einer Augenärztin oder einem Augenarzt landen, wo jede vierte Diagnose falsch ist. Als niedergelassener Mensch, als niedergelassene Augenärztin, zumindest jeden zweiten Donnerstag im Monat, muss ich mich dem Eindruck leider anschließen. So, das ist jetzt, während wir darüber sprechen, alles schon kalter Kaffee,

denn jetzt machen wir „Unsupervised Learning“, das heißt, da trainieren wir den Algorithmus gar nicht, wir sagen dem Algorithmus nicht, was in der Netzhaut falsch ist, sondern wir lassen ihn selbst suchen. Das ist natürlich noch wesentlich besser, weil wir alle natürlich an der Lehrmeinung, der alten Schulmedizin, hängen und nur bestimmte Dinge wahrnehmen. Man sieht ja nur das, was man weiß. In der Wissenschaft ist das ein wichtiger Punkt. Viele Dinge wissen wir nicht, weil wir sie nie gesehen haben. Da lassen wir jetzt den Algorithmus die Bilder anschauen und Muster erkennen. „Unsupervised Learning“ heißt das also. Das wollen wir jetzt in die Klinik einfädeln, wir machen es auch schon für Screenings und dann auch für Monitoring, das heißt, um die Behandlung zu steuern, um es vollautomatisch zu benutzen – das geschieht individuell und ist nicht nur Ärztinnen und Ärzten vorbehalten. Es geht darum, den richtigen Patienten bzw. die richtige Patientin zur richtigen Zeit mit der richtigen Therapie zu behandeln. Das müssen wir machen, weil in der modernen Medizin sonst die Budgets sehr schnell ausgelaufen sind. Ob das „superhuman“ ist? Man muss es fast vermuten, ja. Unser Ein-

sichtsspielraum kann durch diese „Unsupervised“-Methoden noch wesentlich erweitert werden, und dass das alles ziemlich „unlimited“ ist, ist, so glaube ich, klar geworden. Wir haben ein wenig allgemein darüber publiziert. Das können Sie, wenn Sie möchten, auch lesen. „Artificial Intelligence in Retina“ ist letztes Jahr bei PRER herausgekommen. Hier werden die Methoden erklärt und das, worum es geht. Ich denke, eigentlich sollte jede Patientin und jeder Patient das im Warteraum in die Hand gedrückt bekommen, damit sie und er weiß, wo die Medizin eigentlich schon sein könnte – nämlich in einer Evolution von immer besserer Entwicklung. Ob das beim Roboter landet, wissen wir nicht, aber hier sind wir sicher im Moment schon angekommen und die Evolution lässt sich ja bekanntlich nicht aufhalten. Deep learning has just begun. Das ist jetzt die Aufgabe. Wir müssen CE-Zulassungen haben. Wir müssen ein Decision-Support-System schaffen, damit die Ärztin und der Arzt es verwenden und besser werden können. Und wir müssen das möglichst evidenzbasiert machen. Damit auch geglaubt wird, was der Algorithmus sieht, darf das kein Blackbox-Algorithmus sein.

Ich habe „ImageNet“ gesagt. „ImageNet“, die Bilderkennung, gibt es schon länger. Das hier ist Gesichtserkennung. Gesichtserkennung ist das Stichwort aus der künstlichen Intelligenz, das besonders häufig in den allgemeinen Medien auftaucht. Die US-amerikanische Armee hat bereits 1991 Gesichtserkennung durchgeführt. Das ist schon etwas länger her. Sie sehen, das Interesse geht schon weit zurück und kommt natürlich sehr deutlich aus dem militärisch-industriellen Komplex. Jetzt ist das alles wesentlich weiter fortgeschritten. Es gibt natürlich sehr viel mehr Bilder. Das ist „face recognition now here and there in the US, and China“. Und alle Systeme, die sich dafür interessieren.

Im Moment findet in der „Fondazione Prada“ in Mailand eine großartige Ausstellung statt, von Trevor Paglen und Kate Crawford, die aus Stanford ist. Die beiden zeigen, wie Bilder, Gesichtsbilder, von normalen Menschen in dieses System eingegeben werden können – „ImageNet“-Gesichtserkennung. Wie ist „ImageNet“ wirklich entstanden? “Through the Crowd-Sourcing Service of Amazon, Mechanical Turk. They earned pennies for each photo they labeled, scanning through hundreds of texts

an hour. As they did, biases were baked into the database, though it's impossible to know where the biases were held by those doing the labeling." Das heißt, die Gesichtserkennung im „ImageNet“, und das ist die am meisten und oft zum Beispiel auch von der Polizei benützte, wird jetzt automatisch über den Algorithmus definiert. Aber dieser ist eben trainiert worden von diesen Menschen, die dort für Pennies viele Gesichter gelabelt haben als guter, böser, wertvoller Erfolgsmensch oder „Wrongoer“. Das Wort „Wrongoer“ habe ich da gelernt. „They defined what a loser looked like.“ Die anderen Worte möchte ich gar nicht wiederholen, weil sie wahrscheinlich ganz schrecklich sind, aber Sie können sich das schon denken. Schauen Sie sich das einmal an. Es ist wirklich interessant. Etwa: „A photograph of a woman smiling in a bikini is labeled as slattern“ und so weiter. Oder ein junger Mensch, der trinkt, der ein Getränk in der Hand hat, wird bezeichnet als „alcoholic“, das ist die Klassifizierung der Gesichtserkennung in diesem großen etablierten „ImageNet“. „A child wearing sunglasses is classified as failure, loser, non-starter.“ Das heißt, wir müssen uns sehr hüten vor dem, was Artificial

Intelligence auch noch produzieren kann, weil es eben so ein starkes sozio-ökonomisches Bias hat, und auch das ist der Blick über den Tassenrand der künstlichen Intelligenz hinweg. Das ist interessant und nötig. Wenn wir uns nicht mit der künstlichen Intelligenz befassen, dann werden wir sie nicht verstehen und dann wird sie über uns hinweggehen, und zwar wird sie da nicht in den Händen von Ärztinnen und Ärzten sein. Mit diesem „Urbi et Orbi“ danke ich für die Aufmerksamkeit.

HERBERT MATIS

Liebe Frau Professor Schmidt-Erfurth, herzlichen Dank für Ihren Vortrag, der, wie ich glaube, für uns alle sehr viel Neues gebracht hat. Die optische Kohärenztomografie liefert also, wie Sie demonstriert haben, hochauflösende und dreidimensionale Visualisierungsmöglichkeiten – auch das ist ein großer Fortschritt. Wobei sich aus der Anwendung der künstlichen Intelligenz ganz neue diagnostische und therapeutische Möglichkeiten ergeben. Und ich glaube, es war auch beeindruckend, dass dies nicht nur auf die Ophthalmologie beschränkt ist, sondern in sehr vielen Bereichen

der Medizin Eingang finden wird oder zum Teil schon Eingang gefunden hat, wie Sie am Beispiel der Dermatologie gezeigt haben. Wir haben noch die Möglichkeit, ein paar Fragen zu stellen oder Diskussionsbeiträge zu liefern, und ich darf Sie um Beantwortung bitten. Wir haben schon sehr viele Wortmeldungen.

PUBLIKUMSGAST

Vielen Dank für den Vortrag. Es war wirklich faszinierend, zu erfahren, wie die Diagnose sich hier letztlich entwickelt. Wie schaut es denn mit der Therapie aus? Ich kann mich erinnern, am Anfang waren es einfach komplette Antikörper, die injiziert wurden. Dann waren es die Farbfragmente dieser humanisierten monoklonalen Antikörper. Gibt es aufgrund der Diagnose jetzt eine spezifischere Reform der Behandlung mit den verfügbaren Medikamenten?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Die Antikörper werden sicher bleiben, und sie gehören auch in das Auge, weil sie besonders gut verträglich sind, weil sie, in entsprechend

kleinen Mengen dort direkt in das Auge gegeben, sehr wirksam sind. Es gibt aber nicht nur Antikörper gegen diesen VEGF, den „Vascular Endothelial Growth Factor“. Es gibt zum Beispiel Antikörper gegen Angiopoietin 2, da machen wir gerade das Reading Center für eine große Studie bei diabetischen Netzhauterkrankungen. Es wird andere Antikörper geben, etwa gegen das Komplementsystem. Das verhindert, dass diese Ablagerungen, diese Drusen am Augenhintergrund, sich entzündlich verändern, weil man vermutet, dass das der Grund dafür ist, dass die Sinneszellen untergehen. Also, dieses große Universum der Antikörper ... that is here to stay for ten more years, würde ich einmal sagen, nur das Spektrum der Targets verändert sich. Und auch diese Therapie muss man natürlich steuern. Denn man muss ja zuerst einmal sehen, was ein sinnvolles therapeutisches Target ist und wie man eine trockene Makuladegeneration dort, wo die Sinneszellen ausfallen, behandelt. Man behandelt sie nicht, indem man versucht, den bereits ausgefallenen Boden hier vor Komplement zu schützen, sondern man muss früher einsetzen und schauen, dass diese neuronalen Degenerationen nicht

eintreten und dass die Sinneszellen keinen Anlass haben, dort ihre Reihe zu verlassen. Das ist auch essentiell für das Verständnis der Erkrankung und um die richtigen therapeutischen Targets zu identifizieren. Das ist das eine. Und das andere ist dann natürlich, bei diesen chronisch progressiven, lebenslangen Krankheitszuständen den richtigen Zeitpunkt zur Behandlung zu finden. Das ist eine große Aufgabe. Monitoring heißt das. Es ist sehr wichtig, denn sonst können wir uns das alles gar nicht leisten.

FRANZ KERSCHBAUM

Danke schön für den inspirierenden Vortrag. Am Schluss haben Sie ja über die Leute gesprochen, die für ein paar Pennies bei Amazon die Gesichter getaggt oder klassifiziert haben. Im Prinzip – und verzeihen Sie mir, dass ich den Vergleich hier bringe – entsprechen diese Leute ja Ihren Readern, die ja quasi die medizinischen Aufnahmen durchschauen und klassifizieren, was sie darauf sehen. Sie haben aber auch Systeme vorgestellt, die das komplett automatisch selbstlernend – unsupervised – machen. Wie kommt man da aber

dann letztlich zu einem Zusammenhang mit einem Krankheitsbild?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Man verbindet, man macht eine „Structure Function Correlation“. Wir schauen uns hier genau diese morphologischen Veränderungen an, die der Algorithmus findet. Dieses spezielle Unsupervised-Learning-Tool beispielsweise findet, wenn man es auf Augenbilder mit einer feuchten Makuladegeneration loslässt, natürlich all das, was wir schon kennen. Oder ich sage besser nicht „natürlich“, sondern: Erfreulicherweise und überraschenderweise findet es auch alles, was wir kennen. So wissen wir, der Algorithmus hat verstanden, worum es geht. Er findet aber auch diverse andere Veränderungen, die wir gar nicht wahrgenommen haben, weil sie klinisch nie erschienen sind und weil davon in keinem Buch und in keiner Publikation etwas steht. Und diese Veränderungen muss man jetzt in Zusammenhang bringen mit dem Verlauf der Erkrankung bei den Patientinnen und Patienten, die diesen Marker zeigen, und mit deren Prognose. Damit entsteht dann eine neue Verknüpfung, nämlich ein so-

nannter Biomarker, der eine Krankheitsaktivität, eine klinische Krankheitsaktivität, anzeigt. Das ist das Learning, und das ist natürlich der besonders spannende Horizont.

GEORG BRASSEUR

Auch meinerseits vielen Dank für den interessanten Vortrag. Sie haben zum Schluss eine ungefähre Fehlerate eines solchen Algorithmus von fünf Prozent erwähnt. Was ist dabei die „Ground Truth“? Wie kommt man von einer Abweichung von fünf Prozent zu dem was die Wahrheit ist?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Die Wahrheit, die sogenannte „Ground Truth“, wird dann von Reading-Center-Expertinnen und -Experten überprüft. Und es werden noch alle anderen Daten dazugenommen, nicht nur die Bilddaten, auch der Verlauf der Erkrankung. Das heißt, diese fünfprozentige „Error Rate“, die ist tatsächlich dann falsch. Das ist nicht nur so, dass alle Beurteiler sagen: „Ja ich weiß auch nicht, was das ist.“ Sondern es ist aufgrund des Verlaufs und all der vielen zu-

sätzlichen Informationen eine andere Diagnose gewesen.

GEORG BRASSEUR

Inwieweit spielt die Aufnahmetechnik eine Rolle, beispielsweise das Rauschen, das immer in allen Aufnahmen vorhanden ist und damit das Aufnahmeergebnis verfälschen könnte? Resultiert die Abweichung nur aus der Beurteilung dieser Datensätze, so als ob man diese Bilder Hunderte Male diesem Algorithmus vorwirft und trotzdem immer das gleiche Ergebnis erhält? Oder ist das Messrauschen im Frontteil auch ein Thema?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Wenn man ein gutes Bild x-mal durch den Algorithmus jagt, kommt definitiv immer das Gleiche heraus. Google hat hier natürlich überhaupt nur die ganz superscharfen Bilder verwendet. Klar ist nicht jedes Bild, das in der Medizin erhoben wird, scharf. Also, wenn man nur jetzt ein OCT-Gerät, das über die Cloud mit einem Algorithmus verbunden ist, in eine beliebige Praxis stellt, wird

die Fehlerrate wahrscheinlich höher sein, weil auch viele schlechte Bilder darunter sein werden. Diese haben sie, Google, jetzt alle herausgenommen, denn sie wollten ja von ihrem neuen Produkt überzeugen, vermute ich einmal. Ich weiß es nicht, vielleicht ist es aber so. Aber das Gleiche gilt natürlich auch für die Klinik. Da gibt es auch schlechte Bilder. Und gute klinische Expertinnen und Experten müssen sich auch mit schlechten Bildern befassen.

Dass eine Patientin, ein Patient während der Untersuchung blinzelt ist ja ein Problem, das in der Medizin immer präsent ist. Auch der Herzschlag spielt eine Rolle. Das ist ein wichtiger Punkt. Ich meine das jetzt nicht ironisch, sondern es ist natürlich ein wichtiger Aspekt. Beim normalen OCT wird ein verwackeltes Bild einfach erneut gemacht, aber beim Adaptive-Optics-OCT mit einer sehr hohen Auflösung sind etwa 1,5 Sekunden schon wesentlich, denn dann verrutscht der Ausschnitt allein durch den Herzschlag um drei Zellen. Das heißt, je höher die Auflösung wird, umso gravierender sind solche Bewegungsartefakte. Und da sind wir noch am Basteln. Das betrifft aber nicht das normale OCT.

HERBERT MATIS

Wie viel kostet dieses IDX-Gerät in etwa?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Das Gerät kostet 20.000 Euro. Das ist aber vergleichsweise wenig, weil dieses Gerät die augenärztliche Diagnose vollkommen ersetzt. Und gerade im Diabetes-Screening geht es ja um jene 85 Prozent Patientinnen und Patienten, die gar nicht in die Augenarztpraxis gehen. Wenn der Mensch nicht dorthin geht, dann muss die augenärztliche Untersuchung zum Menschen kommen. Und wo erreichen wir die Diabetikerinnen und Diabetiker? Bei der Allgemeinärztin, beim Diabetologen, in der Apotheke; und das Ziel ist natürlich, überall dort Geräte aufzustellen und dann ein Screening unter allen Menschen zu machen, die jemals eine Apotheke betreten haben. Es haben ja nur rund zwei bis drei Prozent dieser sogenannten Allcomers wirklich eine Netzhauterkrankung. Allen anderen kann man sagen: „Du hast nichts, du brauchst aber auch nicht die Augenarztpraxis zu verstopfen. Die Augenärztinnen und Augenärzte sollen

lieber diejenigen sehen, die eine Behandlung brauchen.“ Also, das bringt natürlich eine enorme Qualitätsverbesserung in die allgemeine Augenheilkunde. Das Gleiche gilt für die Kardiologie. Wenn Sie keine aufwendigen invasiven kardiologischen Untersuchungen brauchen, sondern einfach in so ein Gerät schauen, der Algorithmus in der Cloud analysiert das und aus dem Drucker neben Ihnen kommt nach vier Minuten die Diagnose heraus, wie das bei dem IDX der Fall ist, hat das schon was. Viel Effizienz auch.

PUBLIKUMSGAST

Kann das System bei den fünf oder zehn Prozent, die falsch sind, sagen, was der Grund ist, warum die Diagnose falsch ist und wer schlussendlich bei der falschen Diagnose mit einem automatisierten Gerät letztverantwortlich ist? Ist es das Gerät oder ist es die Ärztin oder der Arzt, der dieses Gerät in der Praxis stehen hat und eine falsche Diagnose macht?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Verantwortlich für eine Fehldiagnose ist immer derjenige, der sie macht. Wenn wir jetzt wissen, dass ein Arzt eine Fehldiagnoserate von durchschnittlich 15 Prozent aufweist, und wenn wir wissen, dass ein Algorithmus eine Fehldiagnoserate von fünf Prozent zeigt, what would you choose? Wo würden Sie selbst gerne Ihre Diagnose gemacht haben? Die Fehldiagnosen werden ja nie begründet, weil sie gar nicht auffallen. Wenn ein Arzt eine Fehldiagnose macht, dann sagt er Ihnen ja nicht: „Bei Ihnen – es tut mir leid, Sie sind jetzt der Fünfte heute – muss ich leider meine statistische Fehldiagnoserate anbringen, und ich mache jetzt diese Fehldiagnose, weil ich das und das nicht gesehen habe.“ So ist es ja nicht. Ich möchte jetzt nur den Realitätsbezug in das Verhältnis setzen. Die Fehldiagnosen werden natürlich in der klinischen Praxis nicht erkannt. Der Algorithmus erkennt sie, er weiß auch nicht, warum er etwas falsch macht, sonst würde er es ja nicht falsch machen, nur ist der Algorithmus so schnell, er berücksichtigt so viel mehr Informationspunkte. Das wollte ich damit auch zeigen. Was dieser Augenarzt sehen kann,

ist ja viel weniger. Natürlich ist der Algorithmus im Vorteil, weil er aus diesen 85 Millionen Datenpunkten eine Diagnose machen kann. Diese muss ja besser sein. Wenn der Arzt sich hinsetzen würde und jeder oder jedem sagen würde: „Ich nehme mir jetzt einen Monat Zeit, um alle Pixel durchzuzählen“, dann würde auch seine Präzision besser werden. Aber das kann er nicht. Und der Algorithmus macht das in ein paar Sekunden. Und deswegen ist er besser.

PUBLIKUMSGAST

Wie kann man überprüfen, wie korrekt die maschinellen Ergebnisse sind?

URSULA SCHMIDT-ERFURTH

Das wird überprüft in sogenannten Parallelstudien, durch eben solche hochausgebildeten sogenannten zertifizierten Reader, in ein paar wenigen Zentren in der Welt. Wir haben unter anderem so ein „Vienna Reading Center“. Hier sind Menschen tätig, die nichts anderes tun, als jeden Scan genau anzuschauen und genau zu markieren, wo es Auffällig-

keiten gibt. Sie sehen das genau, sie sehen das wahrscheinlich auch mit eyes closed. Und sie können das dann überprüfen. Aber das ist ja nicht das, was in einer Arztpraxis gemacht werden kann, wo die Patientinnen und Patienten nacheinander kommen, vor das OCT gesetzt werden, und dieses Fly-through an Bildern ausgespuckt wird mit 450 Schnitten, das kann die Ärztin oder der Arzt nicht. Es ist natürlich auch eine Frage der Effizienz, die die Diagnosen besser macht.

Aber wohin führt das Ganze? Warum machen wir das? Wir wollen natürlich nicht die Augenärztinnen und Augenärzte entlassen, sondern wir hätten gerne, dass sie sich diese Technologie zunutze machen, weil es ihre Arbeit um so vieles bereichert und präziser und schneller macht. Wir haben auf der Welt nur 210.000 Augenärztinnen und Augenärzte. Wir haben 420 Millionen Diabetikerinnen und Diabetiker. Wir haben 600 Millionen Menschen, die über 65 sind und eine Makuladegeneration entwickeln werden. Das ist nicht zu schaffen, wenn wir einfach Random-Leute, die in die Praxis kommen, anschauen. Davon haben die meisten nichts, sie brauchen halt eine Lesebrille, und all die

anderen, die wirklich etwas haben, laufen unerkannt draußen herum. Das wollen wir verbessern. Wir wollen gerne die Augenärztinnen und -ärzte besser ausstatten, und wir möchten ihnen die Patientinnen und Patienten zuführen, die in einem möglichst frühen Stadium dann nämlich eine besonders erfolgreiche Therapie bekommen können.

HERBERT MATIS

Ich denke, das war sehr beeindruckend, und wir müssen uns daran gewöhnen, dass wahrscheinlich die ärztlichen Praxen in Zukunft ganz anders aussehen werden. Wir hoffen es zumindest, dass ganz neue therapeutische und diagnostische Möglichkeiten damit gegeben sind.

Ich darf Ihnen nun Herrn Kollegen Gert Reiter vorstellen. Er ist an der Medizinischen Universität Graz für theoretische und experimentelle Radiologie habilitiert und ist leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter bei „Siemens Healthcare Diagnostics“. Er arbeitet auch eng mit dem „Exzellenzzentrum Hochfeld-MR“ der Medizinischen Universität Wien zusammen. Die Magnetresonanztomografie, abgekürzt MRT, bei

ultrahohen magnetischen Feldstärken, also sieben Tesla und darüber, versetzt uns in die Lage, noch nie da gewesene Einblicke in die Anatomie, Physiologie und Biochemie des Menschen zu finden. Herr Reiter ist Co-Autor zahlreicher Artikel in internationalen Fachjournalen. Ich möchte auch erwähnen, dass er gemeinsam mit seiner Frau Ursula Reiter, die heute auch unter uns ist, im medizinischen Fachverlag Thieme, der allen Medizinerinnen und Medizinern bekannt ist, das Buch „MR-Herzbildgebung interaktiv“ veröffentlicht hat. Ich darf Gert Reiter bitten, uns in seinem Vortrag aktuelle Trends in der Magnetresonanzbildgebung nahezu bringen. Herr Reiter, Sie haben das Podium.

TRENDS IN DER MAGNET- RESONANZ- BILDGEBUNG

GERT REITER

Ganz herzlichen Dank für die netten einleitenden Worte. Ich freue mich immer, die aktuellen Trends der Magnetresonanzbildgebung vorzustellen. Die Magnetresonanztomographie ist die am aller stärksten wissenschaftsgetriebene Bildgebung in der Medizin, wohl aufgrund der unendlich vielen Möglichkeiten, die man damit hat.

Es haben wahrscheinlich zumindest 50 Prozent von Ihnen eine MRT-Untersuchung schon erlebt. Für alle, die das noch nicht erlebt haben, nur ganz kurz der Ablauf aus der Sicht der Patientin oder des Patienten. Typischerweise betritt man zunächst einen Scanner-Raum, in dem eine

große Röhre zu sehen ist. Das ist ein sehr starker Magnet. Der Raum ist als Faraday-Käfig ausgeführt und somit von externen Feldern abgeschirmt. Man legt sich – hoffentlich einigermaßen entspannt – auf eine Untersuchungsliege. Dann bekommt man typischerweise eine Matte auf das Organ gelegt, das es zu untersuchen gilt. Dann bekommt man, weil das MRT-Gerät in Aktion einerseits Krwall macht, und andererseits man mit der Patientin oder dem Patienten kommunizieren möchte, einen Kopfhörer aufgesetzt. Wenn das alles passiert ist, wird man mit der Liege in die Mitte des Magneten gebracht. Schlussendlich werden vom



Gert Reiter arbeitet bei Siemens Healthcare Diagnostics Österreich und ist dort seit 2003 für alle magnetresonanztomographischen Research & Development-Kooperationen verantwortlich. 2017 habilitierte er sich an der Medizinischen Universität Graz für das Fach „Theoretisch-Experimentelle Radiologie“.

Computer unterstützt und von einer Person gesteuert typischerweise sehr, sehr viele Bilder des betreffenden Organs oder Körperbereichs erzeugt. Was ist jetzt speziell an der Technik? Zunächst, dass man Schnittbilder gewinnt. Das heißt, keine Projektionsbilder, wie man sie etwa beim Röntgen macht, sondern Schnittbilder durch den Körper. Was die Bilder zusätzlich auszeichnet, ist ein hoher Weichteilkontrast – ganz im Gegensatz zum normalen Röntgenbild. Weichteile, wie beispielsweise Blut und Muskel oder Fett beim Herzen, oder im Kopf graue und weiße Hirnsubstanz, sowie Knochen, Knorpel und Flüssigkeiten im Knie lassen sich sehr gut unterscheiden. Worüber ich jetzt sprechen werde, ist das Prinzip der MRT-Bildgebung. Sie ist im Vergleich zu Röntgentechniken etwas komplizierter, deshalb ein kurzer Einblick, wie das MRT funktioniert. Und dann möchte ich einen Blick auf die neuen Trends der MRT werfen, nämlich: Wie werde ich schneller, wie werde ich quantitativ, und – was wir im ersten Vortrag auch gehört haben – wie kann ich die Bildgebung intelligent und intelligenter machen. Gut, zunächst zum Prinzip der MRT. Erinnern wir uns, wir liegen in einem starken Magneten und

haben – wie zuvor beschrieben, eine „Matte“ am Untersuchungsbereich liegen. Wenn wir uns eine Gesamtanimation, wie man ein MRT-Bild generiert, anschauen, sehen wir, dass der Ursprung des MRT-Bildes wohl offenkundig aus dem Magnetisierungsprozess kommt. Die Magnetisierung stammt von Wasserstoffatomen – oder noch genauer: von Wasserstoffkernen, weswegen die Magnetresonanz auch „Kernspinresonanz“ genannt wird. Die Wasserstoffkerne verhalten sich aufgrund ihrer Eigenschaft, einen Spin zu haben, im Magnetfeld wie kleine Magneten. Durch das starke Magnetfeld richten sich ein paar dieser kleinen Magneten etwas mehr in Magnetfeldrichtung aus als gegen die Magnetfeldrichtung. Wenn man nun kleine Volumina aus dem Körper herausnimmt und diese Magneten zusammenaddiert, sieht man, dass eben diese paar mehr Magneten in die Richtung des Magnetfelds eine Magnetisierung bewirken.

Daraus allein ergibt sich aber noch kein MRT-Bild, man muss die Magnetisierung nun irgendwie aus dem Gleichgewicht bringen. Um das zu tun, verwendet man – wie wir schon im Abstract der Tagung gehört haben – elektromagnetische Wellen. Elek-

tromagnetische Wellen haben verschiedene Frequenzbereiche. Wenn man mit Wellen Energie übertragen will, muss man das typischerweise mit einer Resonanzfrequenz machen. Wir kennen das Phänomen beispielsweise von Stimmgabeln: Hat man auf einem Tisch unterschiedliche Stimmgabeln stehen und schlägt eine an, dann wird nur eine Stimmgabel mit der gleichen Frequenz mitzuschwingen beginnen.

In der MRT gibt es auch so eine charakteristische Resonanzfrequenz. Sie hängt von der Stärke des Magnetfelds ab, liegt aber praktisch immer im Bereich von Radiowellen. Wenn man jetzt mit solch einer resonanten Radiowelle einstrahlt, passiert Folgendes: Die Magnetisierung beginnt sich zu verändern und kreiselt aus der Gleichgewichtslage hinaus. Wenn man die Radiofrequenz wieder abschaltet, wird sich die Magnetisierung wieder zurück in die Gleichgewichtslage bewegen; das nennt man „relaxieren“. Und wie erhält man daraus ein Signal? Das Prinzip dahinter kennen Sie vom Trafo, an älteren Fahrrädern befindet sich mitunter noch ein solcher: Man bewegt dabei einen kleinen Magneten neben einer Spule. Wann immer sich der Magnet dreht, ändert sich das Magnetfeld

durch die Spule und erzeugt dabei eine Spannung. Genau das Gleiche macht man in der MRT-Bildgebung. Die „Matte“ ist nichts anderes als eine Spule, das von der Magnetisierung erzeugte Magnetfeld ändert sich in der Spule und erzeugt das MRT-Signal.

Jetzt fehlt noch ein Konzept. Wir haben ein Signal und wollen wissen, woher es kommt. Dazu verwendet man noch ein weiteres Magnetfeld, das man Gradientenfeld nennt. Ein Gradientenfeld ist nichts anderes, als ein sich in einer Raumrichtung änderndes Magnetfeld, welches zum großen Magnetfeld dazu geschaltet werden kann. Dabei entsteht der für die MRT charakteristische Lärm, denn die Gradientenfelder werden von Spulen erzeugt, die – wenn man sie schnell schaltet – gegen die Wand tackern. Man kann mit diesen Gradientenfeldern nun sowohl Schichten anregen als auch beim Auslesen Ortsinformationen codieren.

So misst man nun ein erstes ortscodiertes Signal, ein zweites, ein drittes und viele mehr. Aus den Signalen gibt es dann eine Transformation, die sogenannte Fouriertransformation, welche die ortskodierten Signale in ein Bild transferiert. Diesen gesamten Ablauf von Anregung, Signalauf-

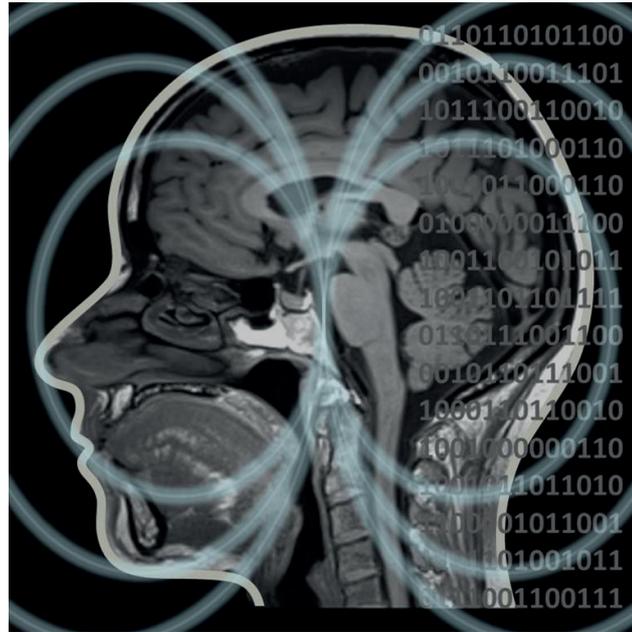


Abb.: Die Magnetresonanz-Bildgebung erlaubt Schnittbilder des menschlichen Körpers ohne Einsatz ionisierender Strahlung zu erzeugen. Nicht zuletzt aufgrund der digitalen Natur der Bilder wird sie zunehmend schneller, patientenfreundlicher, quantitativer und intelligenter. (© Gert Reiter)

nahme und Bildberechnung nennt man MRT-Sequenz. Diesen Ablauf kann man ganz unterschiedlich durchführen. Man kann zum Beispiel zwischen Anregung und Signalaufnahme unterschiedlich lang warten, oder unterschiedliche Hochfrequenzpulse einstreuen. Durch solche unter-

schiedlichen MRT-Sequenzen können ganz unterschiedliche Kontraste im Bild erzeugt werden. Zum Beispiel in Herzbildern ist das Blut einmal hell, einmal ist es dunkel. Einmal ist das Fett um das Herz herum hell, einmal ist es dunkel. Allgemein lassen sich durch verschiedene MRT-Sequenzen

Strukturen im Körper einmal hell, einmal dunkel in unterschiedlichen Kontrasten darstellen.

Die Kontraste beruhen auf unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von Geweben und unterschiedliche MRT-Sequenzen erlauben unterschiedliche magnetische Eigenschaften in der Bilddarstellung zu forcieren. Es ist die Aufgabe der Radiologinnen und Radiologen, zu wissen, in welchen Aufnahmen gewisse Pathologien, die unterschiedliche magnetische Eigenschaften besitzen, sich gegenüber normalem Gewebe heller oder dunkler darstellen. Eine magnetische Eigenschaft wäre zum Beispiel die „T2-Zeit“. In einem die T2-Unterschiede forcierenden MRT-Bild ist Ödem – also viel Flüssigkeit – im Herzmuskel heller dargestellt als der normale Herzmuskel. Oder mit der Forcierung einer anderen magnetischen Eigenschaft, der „T1-Zeit“, kann man einen Infarkt im Herzmuskel, wo Zellen tot sind, erkennen.

Soweit die klassische MRT-Bildgebung. Wenn man sich noch einmal kurz das Prinzip der MRT-Bildentstehung vor Augen ruft, dauert das Warten auf alle Echos relativ lange. MRT ist grundsätzlich eine sehr langsame Technik. Das hängt genau damit zusammen, dass man viele Signale

akquirieren muss, bis schlussendlich ein Bild rekonstruiert werden kann. Wenn Sie bereits eine MRT-Untersuchung hatten, bei der unterschiedliche MRT-Sequenzen aufgenommen wurden, sind Sie wahrscheinlich relativ lange im MRT gelegen. MRT-Sequenzen einer Untersuchung dauern typischerweise mehrere Minuten lang. Ein großer Trend in den letzten zehn bis 15 Jahren ist es, MRT-Aufnahmen schneller zu machen, um die Untersuchung patientenfreundlicher zu gestalten und eventuell zusätzlich komplexere Techniken verwenden zu können.

Eine „einfache“ Idee ist, eine Spule, die aus vielen Spulenelementen zusammengesetzt ist, zu bauen. Das hat den Vorteil, dass man ein Verfahren namens Parallelakquisition verwenden kann. Man misst dabei weniger häufig ortscodierte Signale, wodurch man schneller wird. Da man mehrere Spulenelemente hat, gibt es technische Tricks, das Bild trotzdem wieder berechnen zu können. Den Effekt sieht man zum Beispiel an einer MRT-Aufnahme des Kopfs, bei der die Bildaufnahme ohne Parallelakquisition drei Minuten gedauert hat. Wenn man nun mit vielen Spulenelementen rund um den Kopf beispielsweise nur ein Drittel der

Signale aufnimmt, entsteht mittels Parallelakquisition ein nahezu identes Bild, die Aufnahme dauert aber nur noch eine Minute. Die Frage, wie weit man das treiben kann, hängt sehr von den MRT-Sequenzen und natürlich von den verwendeten Spulen ab. Das Problem dabei sieht man etwa an MRT-Bildern eines schlagenden Herzens. Wird das Bild nur mit der Hälfte der Signale aufgenommen, ist es hervorragend. Wenn man jetzt immer weniger Daten akquiriert, ein Drittel zum Beispiel, wird man natürlich schneller. Das Bild ist immer noch sehr gut. Bei einem Viertel aufgenommener Daten wirkt das Bild jedoch schon etwas rauschig, obwohl man Strukturen noch immer sehr gut erkennen kann. Mit einem Sechstel der aufgenommenen Signale ist man nochmals schneller, aber das Bild ist sehr rauschig und Strukturen sind dann schon sehr schwer zu beurteilen. Das ist schlicht und ergreifend das Problem: Parallelakquisition kann das nicht beliebig weit treiben, weil die Bilder dann einfach zu rauschig werden.

Deswegen ist in den letzten drei bis fünf Jahren eine Beschleunigungstechnik immer interessanter geworden, bei der man Anleihen bei der digitalen Bildverarbeitung nimmt.

Ein normales Bitmap-Bild ist sehr speicherplatzintensiv, z. B. acht Megabyte. Dieses kann man beispielsweise auch in ein JPG-Bild komprimieren. Die Datenmenge hier ist ein Vierzigstel. Mittels Kompression von Bildern hat man also die Möglichkeit, mit viel weniger Daten ein Bild zu speichern, bei dem der Unterschied praktisch nicht ausmachbar ist. Jetzt könnte man folgende Idee nutzen, um Aufnahmezeit zu sparen: Man nimmt a priori nur die Daten auf, die man für ein komprimiertes Bild benötigt, also viel weniger. Die Kunst dabei ist, die relevanten Signale aufzunehmen. Diese Technik nennt sich „Compressed Sensing“. Das bedeutet, sehr wenige Daten aufzunehmen und „sehr intensiv“ Bilder zu berechnen. Das intensive Berechnen war und ist sicher einer der für lange Zeit limitierenden Faktoren dieser Technik. Heutzutage hat man aber sehr starke grafische Prozesseinheiten in den MRTs, die es erlauben, die Bilder entsprechend schnell zu berechnen. Was ist der Effekt? Zum Beispiel, dass man mittels MRT und Compressed Sensing jemandem beim Sprechen zuschauen kann und ablesen kann, was gesprochen wird. Sprich: Es ist möglich, ein Bild in Millisekunden aufzunehmen. Vielleicht ist das eine

zukünftig interessante Anwendung für Logopädinnen und Logopäden. Es gibt natürlich für verschiedene Techniken auch verschiedene Probleme. Man muss immer kontrollieren, ob man relevante Daten, möglicherweise im Sinne von „medizinisch“ relevant, verwirft, was in medizinische Studien überprüft werden muss.

Ich habe gesagt, dass man mittels MRT schöne Bilder mit schönen Weichteilkontrasten erzeugen kann. MRT kann aber auch sehr viele quantitative Parameter im Sinn physikalischer Größen erfassen, was neben der Beschleunigung der MRT Aufnahme den zweiten großen Trend darstellt. Man kann beispielsweise die Diffusion von Wassermolekülen zeigen, das kann in alle Raumrichtungen geschehen und man weiß, dass die Hauptrichtungen mit den Nervenbahnen korrespondieren, die man so rekonstruieren und visualisieren kann. Dies ist etwa in der Operationsplanung wichtig, um keine zentralen Nervenbahnen zu beschädigen. Man kann mittels MRT auch Temperaturen oder auch Geschwindigkeiten messen. Man berechnet z. B. die Bewegung fiktiver Teilchen, die ins Herz eingestreut wurden aus dem gemessenen Blutfluss-Geschwindig-

keitsfeld. Diese Technik kann bei einem Patienten angewandt werden, dessen Herz ein Loch aufweist: Streut man in die linke Herzhälfte Teilchen ein, stellt man fest, dass sich diese Teilchen nicht nur in der linken Herzhälfte ausbreiten, sondern auch durch dieses Loch in die rechte Herzhälfte gehen. Solch eine Darstellung ist sehr intuitiv, da beurteilt man schlussendlich wieder Bilder, obwohl es alles quantitative Daten sind.

All diese Techniken sind in kontinuierlicher Entwicklung. Der größte Boom in letzter Zeit ist aber, nicht mehr Kontraste zu beurteilen, sondern die magnetischen Eigenschaften von Gewebe selbst zu messen. Es ist für uns jetzt gar nicht so interessant, welche Eigenschaften das genau sind, aber es gibt magnetische Eigenschaften, die für die Kontraste relevant sind, und man kann sie selbst messen. Damit das etwas mehr „sexy“ aussieht, erzeugt man typischerweise farbkodierte Bilder. In jedem Bildpunkt ist hier ein magnetischer Parameter dargestellt. Der häufigste Weg, Bilder von magnetischen Parametern zu erzeugen, ist, mehrere Bilder unterschiedlichen Kontrasts zu messen und aus den Kontrastveränderungen bildpunktweise einen magnetischen Parameter zu berech-

nen. In den letzten drei, vier Jahren wurde dann zusätzlich eine in „Nature“ publizierte Methode, das sogenannte MR-Fingerprinting, eingeführt, bei der diese Parameter alle auf einmal bestimmt werden können. Warum ist die Bestimmung der magnetischen Parameter interessant? Zunächst ist es so, dass man Parameterbilder wie andere MRT-Bilder verwenden kann. Man sieht Unterschiede in magnetischen Parametern als „Kontraste“, das heißt zum Beispiel unterschiedliche T1-Zeiten in unterschiedlichen Farben. Man kann also einmal ganz klassisch lokalisierte Defekte in diesen Bildern magnetischer Parameter-Maps visualisieren. Aber es gibt noch eine zweite wichtige Anwendung dieser Bilder magnetischer Parameter. In einem Bild der magnetischen T1-Zeit des Herzmuskels sieht man zum Beispiel lokal keine Unterschiede mehr, der Herzmuskel sieht ganz homogen aus. Man kann hier aber auch bestimmen, wie groß die mittlere T1-Zeit des Myokards ist. Das ist eine physikalische Größe, die man mit Normalwerten vergleichen kann. Im Bild könnte man feststellen, dass das Myokard einen ziemlich hohen Wert hat, der weit über dem Normalbereich der T1-Zeit von gesundem Myokard

liegt. Also kann man, ohne wirklich Kontraste in den Bildern zu sehen, über die gemessenen Zahlen sagen, ob etwas nicht stimmt. Das heißt, man kann diffuse Veränderungen im Organ feststellen. Das ist medizinisch interessant, weil medizinische Veränderungen typischerweise zunächst schleichend, diffus beginnen, ohne dass lokalisierte Defekte auftauchen. Es kann auch den Glücksfall geben, dass manche Parameteränderungen sehr gut mit Veränderungen auf zellulärer Ebene oder auf molekularer Ebene zusammenhängen. Beispielsweise an der Leber sind solche Zusammenhänge schon sehr gut validiert, dass man die Methode inzwischen schon in der Routine anwendet. Man mache eine Messung eines magnetischen Parameters, was etwa 15 Sekunden dauert, und erhält einen Balken, der angibt, dass der Fettgehalt in dieser Leber ganz normal und der Eisengehalt zum Beispiel noch einigermaßen normal ist. Das entspricht praktisch einer histologischen Aufnahme, in der analysiert wird, was genau im Lebergewebe drinnen ist – so wie in einem Labor. Der riesengroße Unterschied zur histologischen Untersuchung ist, dass die Beurteilung aus einer MRT-Aufnahmen nicht invasiv und

ohne Strahlung erfolgt. Eine Leberbiopsie ist doch ein relativ schmerzhafter invasiver Eingriff.

Zusätzlich sieht man noch etwas in solchen Bildern: Der Bereich der Organe ist eingezeichnet beziehungsweise segmentiert. Um magnetische Parameter zum Beispiel in der Leber bestimmen zu können, muss man zunächst wissen, wo in den digitalen Bildern die Leber ist. Es ist prinzipiell – sobald man sich in den Bildern ein wenig orientiert hat – relativ leicht, eine Kontur um das Organ zu setzen, das kostet aber Zeit. Normalerweise sind unsere Organe nicht nur in einer Schicht, sondern in vielen Schichten dargestellt, und es würde noch viel mehr Zeit benötigen, sie in allen Schichten zu segmentieren. Es kann noch schlimmer werden: Unser Herz zum Beispiel pumpt und bewegt sich dabei, sodass man es eventuell auch in unterschiedlichen Zeiten segmentieren muss. Das ist manuell in der Routine-MRT kaum möglich.

Man hat lange versucht, einfache Algorithmen zu finden, die Segmentierungen in MRT-Bildern automatisch durchführen, ist aber schlussendlich mit einfachen Algorithmen kläglich gescheitert. Einen neuen Aspekt für die automatische Segmentierung bringt maschinelles

Lernen: Dabei wird eine Software mit Beispielen manuell segmentierter Organe trainiert, betreibt also „Supervised Learning“. Automatische Segmentier-Algorithmen müssen natürlich wiederum validiert werden, funktionieren aber schon hervorragend. Durch Segmentierung endet man – ähnlich wie vorhin – wieder bei quantitativen Zahlen. Wie groß ist das Organ? Zusätzlich kann man über die Differenz von Innen und Außenkonturen auch zum Beispiel das Myokard wiegen. Über die Zeitveränderung der Konturen im Herzschlag kann man auch funktionelle Parameter automatisch gewinnen, und so ist maschinelles Lernen immer mehr und mehr in die klinische Routine integriert.

Ja, wo führt der Weg also hin? Zusammengefasst in Richtung maschinelles Lernen und Artificial Intelligence. Normalerweise beinhalten MRT-Untersuchungen nicht nur eine MRT-Sequenz, sondern zur Differenzierung von Pathologien mehrere unterschiedliche. Das ist insbesondere in der onkologischen Bildgebung wichtig. Wenn man also Tumore beurteilt, macht man das basierend auf verschiedensten MRT-Aufnahmen. Die Diagnostik erfolgt heutzutage weitestgehend standardisiert. Man

sucht die Läsionen, ordnet sie ein und erhält über die unterschiedlichen MRT-Sequenzen ein gewisses Graduierungsschema dazu, wie schwer und wie schlecht das Karzinom ist. Man kann eine derartige Befundung insbesondere auch ein zweites oder ein drittes Mal vergleichend machen. Da ist man aktuell ebenfalls dabei, das zu lernen, nämlich bei verschiedenen Organen zu suchen, wo die Läsionen sind, und zugleich eine standardisierte Graduierung durchzuführen. Das System macht zwar einen Vorschlag, aber die Ärztin oder der Arzt sollte dann prüfen, ob der Vorschlag passt. Das spart Befundungszeit und hilft bei der Standardisierung.

Also auch künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen ziehen schon seit mehreren Jahren in die MRT-Technik ein, wodurch sich insbesondere viele der quantitativen Parameter leichter gewinnen lassen. Und so kann man das auch relativ einfach zusammenfassen. MRT kann ganz allgemein sehr viel und ist ganz sicher auf dem Weg schneller zu werden. Die MRT bietet den großen Vorteil, dass man Normalwerte sehr leicht akquirieren kann, da sie nicht invasiv ist und keine ionisierende Strahlung verwendet. Das kommt der quantitativen Beurteilung von MRT-Parametern

sehr entgegen. MRT wird auch intelligenter und zugleich immer mehr zu einem Bildgebungsbiomarker-Labor. Das heißt Zahlen, Zahlen, Zahlen – viel mehr als rein die MRT-Bilder, die man natürlich auch anschauen muss. In diesem Sinne bedanke ich mich herzlich bei Ihnen und insbesondere auch bei dem ganzen Team der Radiologie aus Graz. Danke schön.

HERBERT MATIS

Vielen Dank. Gibt es Fragen zum Vortrag?

PUBLIKUMSGAST

Danke, Herr Reiter, für den interessanten Vortrag. Sie haben ja erwähnt, dass das Beschleunigen der Messsequenzen ein Thema ist. Jetzt scheint das eher limitiert durch die Umschaltzeit der Gradientenspulen, weil da relativ viel Energie gespeichert ist. Bis man da eine andere Energie hineinkriegt, dauert das eine Zeit. Worin genau liegt die Limitation bei der Beschleunigung? Sind es die AD-Umsetzer, ist es die Rechenleistung?

GERT REITER

Die Limitierung liegt meistens in den Sequenzen als solche, und typisch nicht im Umschalten der Gradienten. Letztere können das sehr schnell, da ist man im Mikrosekundenbereich. Sagen wir einmal, das ist nicht das Problem. Sehr häufig muss man bei MRT-Sequenzen eine oder zwei Sekunden warten, damit die Magnetisierung wieder relaxiert und man entsprechend wieder ein Signal erhält.

Auf der anderen Seite gibt es sogenannte „Steady-State-Sequenzen“. Dort versucht man sehr schnell wiederholt, die Magnetisierungen im Gleichgewicht haltend, Signale zu akquirieren. Dabei hat man dann zwei Probleme: Wenn die Gradienten zu schnell geschaltet werden, erzeugt man Nervenstimulationen. Um das zu verhindern, gibt es gesetzliche Richtlinien, die man einhalten muss. Die zweite Schwierigkeit ist eine weitere physiologische Limitierung, die insbesondere beim 7-Tesla MR – wie es am Exzellenzzentrum steht, auftritt. Man verwendet in der MRT Radiowellen. Auch wenn diese keine ionisierende Strahlung darstellen, wird ihre Energie zum Teil absorbiert. Und je schneller man

vor allem die Steady-State-Sequenzen macht, desto eher bekommt man ein Problem, dass die absorbierte Energie zu groß wird. Man kennt es vom Handy, dass die sogenannten SAR-Werte nicht überstiegen werden dürfen. Mit steigenden Magnetfeldstärken geht leider die SAR quadratisch nach oben: Die im Vergleich zu 1,5 Tesla oder sagen wir 3 Tesla bei einer bestimmten Sequenz im Körper absorbierte Energie ist bei 7 Tesla fünf- bis sechsmal so groß. Das sind wohl die wesentlichen limitierenden Faktoren für die Messzeit.

PUBLIKUMSGAST

Wie wird bei den quantitativen Werten kalibriert?

GERT REITER

Das ist eine gute Frage. Real gesehen gibt es dazu typischerweise Phantome. Der Bau dieser Phantome ist komplex, weil man praktisch die gesamte Elektrodynamik in einem Phantom repräsentieren muss, wie gewisse Transfereffekte, also auch solche, wie sie bei Diffusionen und dergleichen stattfinden. Als Beispiel

zu T1-Mapping: Beim Herz weiß man, dass man T1-Zeiten in einem Phantom sehr schlecht kalibrieren kann, weil physiologische Herzeigenschaften dazu führen, dass sie gewisse Fehler in die Messung hineinbringen. Gut ist – was man auch weiß –, dass die Fehler eher so sind, dass sie Pathologien besser sichtbar machen. Es ist jedoch ein Riesenthema, die quantitativen Werte zu kalibrieren. So etwas geht mit dem Röntgen typischerweise einfacher, weil normalerweise viel weniger Einflussfaktoren zum Signal mitspielen.

PUBLIKUMSGAST

Wir haben das Problem bei Weltraumteleskopen, dass wir oft nur einen Bruchteil der Datenmenge übertragen können. Wir hatten ein ERA-NET-Projekt für ein Herschel-Weltraumteleskop, bei dem wir nur ein Fünfzigstel der Daten übertragen konnten. Aufgrund der Entfernung von 1,5 Millionen Kilometern können wir quasi nur jedes fünfzigste Bild übertragen. Das ist natürlich inakzeptabel, nur jedes fünfzigste Bild zu senden. Es war genau das, was wir gemacht haben – das Compressed Sensing anzuwen-

den, indem wir von allen Bildern die zufällig ausgewählten Dinge übertragen haben und so diese Datenkompressionsrate damit erreicht haben, ohne so etwas wie JPG zu machen. Das ist genau die gleiche Anwendung und passt gut zusammen.

GERT REITER

Ja, stimmt vollkommen, das ist haarscharf dasselbe. Das JPG Bild war nur als Beispiel gemeint.

PUBLIKUMSGAST

Beim Compressed Sensing nimmt das Rauschen zu, haben Sie gesagt. Könnte ich da iterative Methoden benutzen?

GERT REITER

Primär nimmt bei Parallelakquisition Rauschen direkt mit den eingesparten Daten zu. Compressed Sensing ist so eine Geschichte. Einerseits ja, sie ist a priori iterativ, diese Annäherung an etwas. Das Gemeine ist aus meiner Sicht, dass man in diesen Rekonstruktionen typischerweise einen

Regularisierungsfaktor hat. Man kann damit das Bild beliebig glätten, sodass es wunderwunderschön aussieht. Man weiß dann aber nicht, ob bei diesem ganzen Glätten nicht irgendetwas Wesentliches weggeglättet wird. Glätten ist medizinisch immer etwas kritisch. Bei quantitativen Daten, wo man auch versucht, Compressed Sensing einzusetzen, hat man natürlich auch das Problem. Man hat Parameter, die man durch die Regularisierung verändern kann, und muss darauf achten, dass der Parameter so ist, dass die quantitativen Werte noch stimmen.

PUBLIKUMSGAST

Kann man die Informationen verschiedener Sequenzen miteinander korrelieren und dadurch vielleicht das Rauschen vermindern?

GERT REITER

Es ist alles denkbar. Eigentlich ist bei Compressed Sensing das Rauschen per se, zumindest immer mehr, gar nicht so sehr das Problem, weil ich das gut glätten kann. Das Problem dabei ist wohl eher die Rechenzeit,

die man hat. Stellen wir uns vor, dass man drei Minuten auf eine Rechnung beziehungsweise das MRT-Bild wartet. Das ist ja manchmal okay. Bei einer Herzuntersuchung muss man sich das so vorstellen: Man misst die erste Ebene und macht ein Schnittbild durch das Herz. Dieses verwendet man unmittelbar dazu, den nächsten Schnitt zu planen. Wenn man bereits bei dem erst drei Minuten warten muss, dann ist die Methode unbrauchbar. Oder es gibt Untersuchungen, wo man wirklich in Realtime sehen will, was sich bewegt. Wenn man drei Minuten auf das MRT-Bild warten muss, geht das irgendwie nicht. Deswegen ist für viele Anwendungen und Rekonstruktionsverfahren die Rechenzeit der limitierende Faktor. Es gibt schon die Überlegung, die Daten irgendwo vom Scanner über einen Supercomputer zu schieben, sodass die Rechnung schnell geht. Das funktioniert mit medizinischen Daten wiederum nicht so einfach. Daneben – dazu gibt es allererste Publikationen – könnte man manche Dinge vorab maschinell lernen. Ich habe Ihnen gezeigt, wie man segmentieren lernen kann, aber man kann natürlich auch probieren, manche der Parameter, die in so einer Compressed-Sensing-Rekon-

struktion zum Einsatz kommen, anhand mancher Beispiele schon vorher zu optimieren, sodass die Rechnung danach um einiges schneller vonstattengeht. Aber das ist noch in den Kinderschuhen.

PUBLIKUMSGAST

Inwieweit ergeben sich Möglichkeiten, mit Kontrastmitteln zu arbeiten?

GERT REITER

Das passiert praktisch immer. Ich habe es nicht explizit erwähnt. MR-Kontrastmittel haben den riesengroßen Vorteil, dass man relativ wenig davon braucht und dass sie grundsätzlich eher unschädlich sind; dazu gibt es immer wieder Diskussionen. Jede zweite MRT-Untersuchung verwendet Kontrastmittel. Typischerweise enthält MRT-Kontrastmittel Gadolinium. Gadolinium ist giftig, wird aber im Kontrastmittel in sogenannte Chelate eingebunden. Das heißt, das Gadolinium hat rundherum eine Hülle, sodass es gut verschlossen ist. Zwischenzeitlich gab es die Diskussion, dass sich Gadolinium aus MRT-Kontrastmittel, das

lange genug im Körper ist, freisetzen kann. Zumindest bestimmte Kontrastmittel tun das. Das ist typisch aber eher eine politische Diskussion, weil verschiedene Hersteller mit den diversen Kontrastmitteln verbunden sind. Es gibt eine Krankheit, sie heißt nephrogene systemische Fibrose, bei der man einen ganz leichten statistischen Zusammenhang zwischen Gadolinium-haltiger Kontrastmittelapplikation und dieser Krankheit bei Patientinnen und Patienten mit schwerer Nierenerkrankung nachweisen konnte. Das ist inzwischen wieder vom Tapet. Kürzlich gab es eine ähnliche Debatte rund um die Bluthirnschranke. Aber im Prinzip ist MR-Kontrastmittel im Vergleich zum CT-Kontrastmittel viel tolerabler und wird auch viel eingesetzt.

PUBLIKUMSGAST

Herr Reiter, vielen Dank für Ihren Vortrag. Ich hätte gerne zwei Auskünfte. Die erste Frage bezieht sich auf eine recht umfangreiche Zeitschrift von Siemens, die mir von Stuttgart aus zugesandt worden ist, jahrelang. „Imaging“ hieß sie, glaube ich. Gibt es sie noch? Zweitens, Sie haben das Tesla-Gerät an-

gesprochen. Es ist zwar jetzt schon einige Zeit her – Sie wissen, es gibt auch ein Tesla-Zentrum hier im AKH in Wien –, als ich damals eine Aufnahme machen wollte, da hat man mir gesagt, man könne zwar die Aufnahme des Herzens machen – ich erwähne das, zumal Sie ein Buch darüber geschrieben haben –, aber man habe keinen Röntgenologen, der eine Herz-MRT Untersuchung befunden kann. Ist das inzwischen behoben? Und überdies gibt es ja eine große Skepsis der Kardiologen gegenüber diesen Aufnahmen generell, weil sie immer noch davon ausgehen, dass die State-of-the-Art Untersuchung der Katheter ist, auch wenn dieser vielleicht einen Mikroinfarkt auslösen kann. Können Sie etwas dazu sagen? Danke.

GERT REITER

Jede Menge. Das eine, ja, es gibt eine eigene MR-Zeitschrift, sie heißt „MAGNETOM Flash“. Bei der anderen müsste ich selbst nachschauen. Aber ich gehe davon aus, dass die Zeitschrift weitergeführt wurde. Wie gesagt, das kann ich instantan nicht beantworten.

Dann zu Herz-MRT und Hochfeld MRT. Dass man hier Untersuchungen bis jetzt, etwa am Exzellenzzentrum, nicht macht, hat zwei Gründe. Um medizinische Untersuchungen in normaler Routine durchführen zu können, muss das Gerät vor allem zunächst einmal so etwas wie ein CE-Label haben. Und bis vor Kurzem war es so, dass 7-Tesla kein CE-Label bekommen konnte, einfach aufgrund europäischer Regularien. Das ging in Amerika, aber nicht in Europa. Das hat sich geändert. Inzwischen haben neue 7-Tesla Geräte – noch nicht das Gerät in Wien – ein CE-Label für spezielle Untersuchungen, primär für den Kopf und das Knie. Warum keine Herzuntersuchungen bei 7-Tesla? Mehr Feldstärke ist nicht für jede Untersuchung gut. Würden Sie versuchen, ein Herz mit 7-Tesla MRT aufzunehmen, bekämen Sie ein schwarzes Loch. Der Grund ist, dass man mit resonanten Radiowellen anregt, und Radiowellen dieser Frequenz können nicht mit genügend Stärke zum Herz vordringen. Dadurch schafft man es nicht, den Herzbereich homogen anzuregen. Also für Herz-MRT ist 7-Tesla sicher noch für längere Zeit kein gutes Gerät. Was jetzt ganz allgemein die Kardiologinnen und Kardiologen be-

trifft, hätte ich Ihnen zugestimmt. Herz-MR war vielleicht bis 2012 die Methode der Wissenschaftler und Freaks. Dann hat sich das aber dramatisch geändert, auch in der Kardiologie. Es gibt in kardiologischen Leitlinien Rankings, welche Untersuchungsmodalität wofür die beste ist. Und wenn man heute fragt, wie sieht es für akutes und chronisches Herzversagen aus, und sich diese Rankings anschaut, ist es so, dass bei 77 Prozent aller Fragestellungen das Herz-MRT die Nummer eins ist. Es mag jetzt schon sein, dass ein Kardiologe irgendwo sagt, dass das nicht so toll ist. Aber zumindest nach internationaler Meinung ist in diesen Guidelines definiert, dass für die meisten Fragestellungen das Herz-MRT vergleichsweise zumindest eine gleich gute oder gar die beste Option ist. Sie haben speziell den Katheter angesprochen. Dieser klärt typisch eine Frage, nämlich: Gibt es Engstellen in den Koronargefäßen, die den Herzmuskel versorgen? Man spricht von koronarer Herzkrankheit. Der Katheter hat da natürlich den Vorteil, dass er mit der Diagnose erstens schnell ist und man auch gleich die Therapie vornehmen kann. Stellt der Kardiologe mit dem Katheter fest, dass da eine Engstelle vorhanden ist,

beispielsweise also beim Herzinfarkt, sieht er das und setzt dort auch gleich einen Stent. Das kann man natürlich im MRT nicht. Es gab Versuche, vor dem Katheter ein Herz-CT oder ein Herz-MRT durchzuführen. Man hätte hier den Vorteil, vor dem Katheter zu wissen, wo das Problem liegt. Man sieht sofort, wenn ein Infarkt vorliegt und kann genau sagen, welches Koronargefäß das Problem macht. Aber ich kann im MRT der Patientin, dem Patienten keinen Stent einsetzen. Also bei dieser Fragestellung wird sicher in der Akutversorgung weiterhin der Katheter die Methode der Wahl sein, diese ist eben schnell und die Therapie ist auch gleich damit verbunden. Große Konkurrenz bei der Untersuchung der koronaren Herzkrankheit ist derzeit eher das CT, weil man mittels Herz-CT über die anatomischen Informationen hinaus – auch Artificial Intelligence nützend – die Wirksamkeit von Stenosen beurteilen kann.

HERBERT MATIS

Eine Frage noch: Ab einem gewissen Alter sind ja sehr viele Menschen eine Art „Cyborg“, nämlich Ersatzteilträger, das heißt, sie haben

künstliche Gelenke wie Knie, Schulter, Hüfte oder haben einen Schrittmacher. Schließt das eigentlich von einer MR-Untersuchung aus?

GERT REITER

Heutzutage baut man, wenn man diese „Ersatzteile“ verwendet, praktisch fast nur noch MR-taugliche Implantate und Devices ein. Inzwischen sind sogar Herzschrittmacher mit allen Kabeln MR-tauglich. Der wichtigste Punkt ist dort eher etwas, was von biomedizinischen Technikern, Physikern und dann schlussendlich natürlich von Gremien untersucht wird: Es ist nicht so leicht festzustellen, ob ein Implantat MR-sicher ist. Klarerweise muss irgendwann der erste Mensch damit untersucht werden. Im Normalfall ist das zuvor untersucht und man kann zumeist die MRT-Untersuchung durchführen. Das Problem ist eher das: Die Implantate sind häufig aus Metall und verursachen in ihrer Umgebung Bildartefakte. Aber auch selbst da werden die MRT-Techniken zur Unterdrückung der Artefakte immer besser.

HERBERT MATIS

Nachdem wir auch diese alltagspraktische Erfahrung gemacht haben, herzlichen Dank für den Vortrag und Dank auch den Diskussionsteilnehmern.

Ich darf Ihnen Frau Kollegin Notburga Gierlinger ankündigen, die aus einem ganz anderen Fachgebiet kommt und uns auch mit einer ganz anderen Technik vertraut machen wird. Vielleicht noch ein paar Daten zu ihr. Sie ist Professorin am Institut für Biophysik der Universität für Bodenkultur in Wien. Sie arbeitete nach dem Studium der Biologie an der Universität Salzburg als Chemikerin in der Umweltanalytik und absolvierte anschließend das Aufbaustudium „Technischer Umweltschutz“ – ein sehr aktuelles Thema – an der Universität für Bodenkultur und an der Technischen Universität Wien. Es ist eine Kombination, die per se sehr zukunftsorientiert ist. Und sie bekleidete in der Folge eine Postdoc-Stelle am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam und ging dann an die Johannes Kepler Universität in Linz, wo sie eine Assistentenstelle bekleidete. Nach einem Wechsel an die Universität für Bodenkultur wurde sie

als Oberassistentin an das Institut für Baustoffe an der ETH Zürich geholt. Sie hat zahlreiche Auszeichnungen erhalten, unter anderem auch einen ERC-Grant von der Europäischen Union und den START-Preis in Österreich vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Beides gilt als Entree für höhere Weihen. In ihrem Vortrag beschreitet sie ein Feld, das Sie vielleicht noch nicht kennen, nämlich die Raman-Mikroskopie an Pflanzenzellen, die Erzeugung chemischer Bilder, basierend auf Molekülschwingungen.

RAMAN- MIKROSKOPIE AN PFLANZENZELLEN

CHEMISCHE BILDER BASIEREND AUF MOLEKÜLSCHWINGUNGEN

NOTBURGA GIERLINGER

Vielen, vielen herzlichen Dank für die Einleitung. Und ja, ich kann mich gar nicht genug bedanken, dass ich hier als Exotin eingeladen bin, über Pflanzen und über Raman-Mikroskopie zu sprechen. Ich habe gestern bei der Vorbereitung festgestellt, es ist auch eine Premiere. Es ist mein erster Vortrag in Deutsch. Ich habe mich schon beim Übersetzen schwergetan, die Worte zu finden. Verzeihen Sie mir, wenn ich hin und wieder eine englische Floskel einbringen werde. Ich werde mich aber bemühen, so weit

wie möglich im Deutschen zu bleiben.

Mein erstes Ziel ist jetzt, Sie ein bisschen für Pflanzen zu begeistern, weil ich ja weiß, dass Sie eigentlich damit nichts am Hut haben. Ich möchte Sie erinnern, dass sie wirklich fast bei jeder und jedem von Ihnen im Alltag eine Rolle spielen, sei es als Material, sei es als Energie, sei es als Nahrung oder auch als Medizin. Für viele ist das ein einfaches Material. Natürlich, der menschliche Körper kann noch einiges mehr. Aber selbst bei Pflanzen ist es so, dass sie sehr, sehr



Notburga Gierlinger ist assoziierte Professorin am Institut für Biophysik der Universität für Bodenkultur in Wien. Sie erhielt unter anderem 2013 den START-Preis des FWF und 2015 einen ERC Consolidator Grant. In ihrer Forschungsarbeit beschäftigt sie sich eingehend mit der spektroskopischen Untersuchung von Pflanzen.

viele Funktionen ausüben, und das mit einem sehr einfachen Aufbau. Sie verwenden nicht viel außer Kohlenstoff, Sauerstoff, ein paar Mineralien manchmal und Stickstoff natürlich etc.

Wir haben ein großes Projekt mit Nussschalen. Es war wirklich auch für mich eine große Überraschung, dass wir in den Walnusschalen eine neue Zellform entdeckt haben. Eigentlich wollten wir nur auf Mikro- und Nanoebene schauen, was passiert, und plötzlich finden wir da Zellen, die eigentlich so noch nie beschrieben worden sind. Wir kennen nicht alles. Es ist eine normale Walnusschale und trotzdem hat sie Überraschungen für uns bereit.

Was ist jetzt wichtig, um Pflanzen zu verstehen? Unser Auge sieht einmal, sie sind sehr verschieden. Eine Nussschale unterscheidet sich natürlich komplett von einem Blatt. Ein Stamm im Baum unterscheidet sich von einer Nussschale. Was macht sie am Ende aus? Ist es die Geometrie der Organe, sind es die Gewebe, wie sie angeordnet sind? Und am Ende ganz wichtig sind die Zellen und die Frage, welche Form sie haben, wie sie angeordnet sind. Und wenn wir dann noch weiter hineingehen, von der Mikro- in die Nanoebene, ist es

natürlich das, woraus sie aufgebaut sind, die Moleküle. Und genau dort siedelt meine Forschung an.

Wir wollen wirklich verstehen, wie unterschiedliche Organe und Gewebe aufgebaut sind, um verschiedene Funktionen zu erfüllen. Bei der Raman-Mikroskopie ist es so, dass wir wirklich die Moleküle erfassen, durch Molekülschwingungen, und das im Kontext mit der Mikrostruktur. Wenn ich jetzt chemische Analysen mache und das Ganze wieder zermahlen muss, dann kann es sein, dass ich zwar weiß, okay, ich habe so und so viel Prozent Lignin, so und so viel Prozent Zellulose, aber ich weiß beispielsweise nicht, wie die Zellen zusammengeklebt werden und wie eigentlich die Faser aufgebaut ist. Und das ist im Endeffekt das Wichtige dafür, das Material zu verstehen. Was finden wir also in der Pflanze? Wir finden in erster Linie Pflanzenzellen, das ist das Material. Die sind aufgebaut aus verschiedenen Zuckern und einem aromatischen Baustoff, der uns besonders interessiert. Das Lignin macht das Holz zum Beispiel dauerhaft, macht es steif. Und wir wollen auch verstehen, wie es kommt, dass aus einfachen Alkoholen ein riesiges Polymer in dieser Zellwand imprägniert wird, diese

wirklich dauerhaft macht, es auch erlaubt, unterschiedliche Funktionen möglich zu machen – um etwa ein Druckholz zu bilden, das einen Ast nach oben hebt.

Auch nicht unwichtig ist natürlich alles, was wir da noch in den Zellen drinnen haben, seien es Proteine, Fette, Stärke, Extraktstoffe, Mineralien und Wasser. Sie sehen, das ist jetzt nur in Gruppen geteilt. Aber es ist eine ganze Menge, was wir finden. Und das Tolle – wie ich Ihnen in den nächsten 30 Minuten zeigen werde – ist, dass wir mit Raman eigentlich überall Zugang haben. Wir können uns die Zucker anschauen, wir können uns die Aromaten anschauen, gleichzeitig die Extraktstoffe verfolgen und auch die Mineralien und wie bei allen Lebewesen natürlich das Wasser. Das Wasser spielt eine große Rolle. Und auch das können wir mit der Raman-Mikroskopie erfassen.

Wir arbeiten immer mit Falschfarben-Bildern, die unterschiedliche Komponenten darstellen. Auf einem Raman-Bild von Holz sieht man zum Beispiel die Zellen in der Wachstumszone, das Kambium. Am Anfang sehen Sie in Grün das Pektin. Und im Zuge der Holzbildung wird dann das Lignin, in Rot, eingelagert. Neben den Pflanzen, die wir untersuchen,

ist es auch eine super Methode dafür, Materialien zu untersuchen – alles, was aus Pflanzenmaterial hergestellt wird. Etwa Papier, wo Sie in Grün die Zellulosefasern sehen und dazwischen genau die Verteilung von dem Klebstoff, mit dem die Fasern zusammengeklebt sind.

Wie kommen wir jetzt zu den Raman-Bildern? Dazu möchte ich ein paar Grundlagen in Erinnerung rufen. Warum heißt es überhaupt Raman-Mikroskopie? Die meisten von Ihnen kennen ihn, den indischen Physiker Raman, der 1928 erstmals diese inelastische Streuung an Molekülen nachgewiesen hat. Hier als kurzer Exkurs: Auch da waren die Wiener Theoretiker sehr gut. Es war nämlich, wenn ich mich richtig erinnere, 1923, als der österreichische Physiker Smekal bereits die inelastische Streuung an Molekülen voraussagte. Und es hat, weil es ein sehr schwacher Effekt ist, einige Jahre gedauert, bis Raman diesen Effekt nachgewiesen hat. Es war wirklich ein Wettrennen mit der Zeit. Ich glaube, es waren zwei Monate, dann haben zwei Russen, Landsberg und Mandelstam, den Effekt auch nachgewiesen. Raman ist berühmt geworden, weil er die Universalität gezeigt hat, und zwar an Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern.

Was hat er gezeigt? Er hat demonstriert, dass neben der Rayleigh-Streustrahlung, die mit genau der gleichen Energie und Frequenz zurückgeht, ein kleiner Teil mit veränderter Energie, mit weniger Energie zurückgeht: als inelastische Raman Streuung. Damit das passiert, werden unsere Moleküle mit einer sehr starken Lichtquelle bestrahlt und somit in einen virtuellen Erregungszustand angeregt. Heute ist es ein Laser, damals war es eine Quecksilberdampfampe.

Von diesem angeregten virtuellen Energiezustand kann die Strahlung mit einer geringeren Energie zurück gehen in den ersten angeregten Schwingungszustand, die sogenannte Stokes-Streuung. Ein noch kleinerer Teil ist bereits im ersten angeregten Schwingungslevel und wird durch unsere monochromatische Lichtquelle jetzt auch auf ein noch höheres Level angeregt und fällt dann mit mehr Energie zurück in den Schwingungsgrundzustand, die sogenannte Anti-Stokes Streuung. Weil der Abstand der gleiche ist, entspricht es auch wieder genau der Energie, die für die Schwingung des Moleküls notwendig ist. Und das ist auch schon die Erklärung, warum das für unsere Moleküle charakte-

ristisch ist. Jede Molekülschwingung braucht eine ganz charakteristische Energiemenge, um diese Schwingung durchzuführen.

Die gemessene Raman-Streuung wird in einem sogenannten Raman-Spektrum abgebildet, die dort auftretenden Linien werden auch als Stokes-Linien bezeichnet. Die Intensität wird aufgetragen im Verhältnis zur Änderung der Frequenz. In unserem Fall geben wir es in Wellenzahlen an. Als Auswahlregel für Raman gilt, dass wir nur jene Schwingungen sehen, die zu einer Änderung der Polarisierbarkeit der Elektronenhülle führen. Manche von Ihnen haben vielleicht mit Infrarot zu tun. Da ist die Auswahlregel, dass es eine Änderung vom Dipolmoment gibt. Das heißt, unser Raman-Spektrum ist nichts anderes als die Frequenzunterschiede der Stokes-Linien, die durch die Molekülschwingungen und Molekülrotationen hervorgerufen werden.

Wie schauen solche Molekülschwingungen aus? Ein Molekül kann (a)symmetrische Streckerschwingungen vollführen, wobei sich die Bindungslänge ändert. Es kann sich aber auch der Bindungswinkel ändern, wie bei Beugeschwingungen. Das heißt, schon ein einfaches Molekül hat

mehrere Möglichkeiten zu schwingen. Und für jede Schwingung ist eine andere Energie notwendig. Deswegen werden Sie im Raman-Spektrum für jede dieser Schwingungen eine eigene Raman-Bande sehen: Zum Beispiel im Raman-Spektrum von Lignin sieht man eine große Bande der Ringschwingung von unserem aromatischen Molekül und die normale C-C-Schwingung von den Aldehyden. Also jede Bande, die wir messen, korrespondiert mit einer Molekülschwingung.

Am Raman-Spektrum von Lignin kann man auch schon erkennen, dass die Banden nicht so scharf sind, sondern Sie sehen überlappend und rund aus. Der Grund ist, dass es ein Riesenpolymer ist und sehr, sehr viele ähnliche Moleküle drinnen sind, die dann überlappen.

Was sind die Probleme? Zum Beispiel, dass dieses Streulicht intensitätsschwach ist. Von dem eingestreu- ten Licht wird 0,1–0,01% elastisch gestreut und nur 1 von 1 Billion inelastisch als Raman Streuung. Das ist auch der Grund, warum es recht lange gedauert hat, bis die Raman-Spektroskopie und -Mikroskopie wirklich populär wurden. Ein großer Aufschwung kam natürlich mit der Entwicklung der Laser. Die Streu-

intensität hat mit der eingestrahlten Laserfrequenz zu tun. Deswegen wird heute hauptsächlich sichtbares und ultraviolettes Licht verwendet. Es geht noch leicht ins nahe Infrarot hinein, auch Laser mit 785 und 1.045 Nanometern werden in der Raman-Mikroskopie verwendet.

Was wir uns zunutze machen, ist natürlich, dass die Raman-Intensität von der Menge an Molekülen abhängt. Dadurch können wir sagen, wie viel von einer Substanz in unserer Probe ist. Aber gleichzeitig muss uns immer bewusst sein, dass die Intensität auch stark von der Polarisierbarkeit abhängt. Das bedeutet, dass nicht jedes Molekül die gleiche Raman-Intensität ergibt. Wenn wir zum Beispiel konjugierte Pi-Systeme mit verstärkter Polarisierbarkeit darin haben, wird auch das Signal stark verstärkt. Und wir werden diese Moleküle viel leichter sehen als etwa irgendeinen Zucker.

Was können wir messen? Ich habe schon die Zusammensetzung erwähnt. Wir sind außerdem sensitiv für die Kristallinität oder für die Orientierung von Molekülen und Kristallen. Und man kann auch Verspannungen messen; wenn man die Stokes und die Anti-Stokes-Linien vergleicht, auch die Temperatur.

Einen Riesenvorteil habe ich schon kurz erwähnt: Man kann es in allen Aggregatzuständen anwenden. Es sind In-situ-Messungen möglich. Man kann prinzipiell einfach ein Holzstück nehmen und ein Raman-Spektrum aufnehmen, dazu ist keine Probenpräparation notwendig; außer man koppelt es mit einem Mikroskop und man will wirklich dieses Raman-Imaging, diese Bildgebung machen, dann ist es von großem Vorteil, wenn ich eine flache Oberfläche habe. Dann kann eine Probenpräparation, wie wir sie oft machen mit Einbetten oder Schneiden von Mikroschnitten oder planen Oberflächen, sehr, sehr hilfreich sein und vor allem die Qualität sehr erhöhen, im Gegensatz dazu, wenn ich einfach nur darauf messe. Aber prinzipiell – und mit meinen Studentinnen und Studenten habe ich auch schon die E-Card gemessen – kann man alles einfach messen und z.B. genau sagen, welches Plastik drinnen ist.

Die Kopplung mit dem Mikroskop ist sehr wichtig für uns, weil uns ja auf Mikro/Nano-Ebene interessiert, was passiert. Ein großer Vorteil von Raman ist, dass Glas unproblematisch ist. Das heißt, man kann eigentlich genau die gleiche Probenpräparation vornehmen, wie man sie

für jedes andere Mikroskop verwendet.

Der wichtigste Teil eines solchen Raman-Mikroskops ist natürlich der Laser. Ich habe schon kurz erwähnt, er kann mit UV-Licht sein. Ein Laser, der sehr oft verwendet wird, ist der 532-Nanometer-Laser. Er hat noch eine sehr hohe Intensität und gleichzeitig eine sehr gute räumliche Auflösung. Ein Spektrometer ist notwendig, um unseren Laserstrahl aufzuteilen. Und am Ende steht eine CCD-Kamera, die das Signal aufnimmt. Was für die Bildgebung noch wichtig ist, ist bei uns ein motorisierter Tisch, auf dem die Probe liegt.

Für die Bilder wird jetzt unsere Probe abgerastert. Und wir messen an jedem Pixel. An jedem Punkt wird ein komplettes Raman-Spektrum aufgenommen. Das heißt, wir bekommen wirklich hyperspektrale Datensätze, bei denen wir in XY jeweils ein ganzes Spektrum über den gesamten Wellenzahlenbereich haben. Das bedeutet also: Im Unterschied zu vielen Methoden, die wir heute gesehen haben, ist unsere primäre Messung nicht ein Bild, sondern 100.000 Spektren. Basierend auf diesen 100.000 Spektren berechnen wir unsere Bilder. Und das ist meiner Meinung nach ein Riesenvorteil, weil

wir zu jedem Pixel immer ein Raman-Spektrum haben, das nichts anderes ist als ein molekularer Fingerprint. Ich kann jedes Bild und jede Position jederzeit darauf hin überprüfen, auf welchem Raman-Spektrum es beruht.

Wie kann ich jetzt aus meinen Hyperspektraldaten Bilder erzeugen? Die einfachste Methode ist natürlich, dass ich mir die Intensität bei verschiedenen Wellenzahlen anschau. Ich kann mir etwa die Aromaten-Bande anschauen und als zweite Bande die der Karbohydrate. Und wenn ich sie dann herausnehme, bekomme ich ein Bild. Rot wird in dem Fall die Aromaten darstellen, Grün die Fette, die andere Bande.

Was ist jetzt meine räumliche Auflösung, die ich erreichen kann? Ich kann natürlich meine Messpunkte sehr eng setzen. Aber es macht nur Sinn, was ich auch wirklich auflösen kann, wo ich wirklich reine Spektren von meinem Pixel bekomme. Und das hängt jetzt von der Wellenlänge des Lasers ab und von der numerischen Apertur des Objektivs. Es ist grob gesagt immer die halbe Wellenlänge der eingestrahlten Laser-Wellenlänge. Das heißt, wenn wir ein Immersionsöl-Objektiv verwenden, was wir standardmäßig auch tun, ist unsere

beste Auflösung, die wir erzielen, ungefähr 250 Nanometer. Das heißt, wir haben unser Experiment üblicherweise so aufgestellt, dass wir alle 250 Nanometer ein Spektrum aufnehmen, und das bedeutet beispielsweise über eine Messfläche von 100 mal 100 Mikrometer 160.000 Spektren.

Pro Spektrum müssen wir dann natürlich sehr schnell sein, denn wir wollen ja nicht tagelang messen. In den letzten Jahren ist es im Bereich Raman-Imaging massiv bergauf gegangen, weil neben der zunehmenden Raman-Intensität durch leistungsstarke Laser auch die Rechenleistung der Computer stark zugenommen hat. Wir messen normalerweise im Schnitt mit 40 Millisekunden bis zu einer Sekunde pro Spektrum, und je nachdem ist die Scanzeit kürzer oder länger. Für schöne Messungen starten wir oft auch einen sogenannten Nightrun, wo wir dann wirklich ganz schöne große Bilder aufnehmen. Aber zum Beispiel kann man in eineinhalb Stunden 100 mal 100 Mikrometer mit größter Auflösung abrastern.

Wenn ich mir in einem Raman-Spektrum jetzt an verschiedenen Punkten entlang der Wellenzahl anschau, wie die Intensität ist, bekomme ich 200 verschiedene Bilder, die immer

die Intensität an unterschiedlichen Wellenzahlen zeigen. Und währenddessen ändert sich das Bild ständig. Je nachdem, an welcher Position im Spektrum man ist, ist das Bild ein ganz anderes und zeigt ganz andere Komponenten. Sie können jetzt schon erahnen, was das für eine Spielwiese ist, wenn ich einfach durch dieses Durchgehen durch mein Spektrum und durch die Intensitäten so viele verschiedene Bilder bekomme. Und das ist jetzt nur die Intensität. Ich kann natürlich viel mehr mit diesen Spektren machen, wie ich Ihnen später zeigen werde.

Man sieht also einmal die Zucker, das Lignin, in einem Bereich ist nichts, dann kommen die CH-Streckschwingungen. Und das Bild ändert sich eigentlich mit jeder Position: einmal die Fette, einmal die Aromaten, einmal die Zucker und: Wasser. Und diese Bande kann ich genauso nutzen, um mir genauer anzuschauen, wo in meiner Probe Wasser enthalten ist. Wo kann viel Wasser aufgenommen werden?

Wie am Beispiel der Arabidopsis-Pflanze. Arabidopsis ist eine ganz kleine, unscheinbare Pflanze. Sie ist eine Modellpflanze der Botaniker. Deswegen machen wir auch ein bisschen Forschung an denen, obwohl

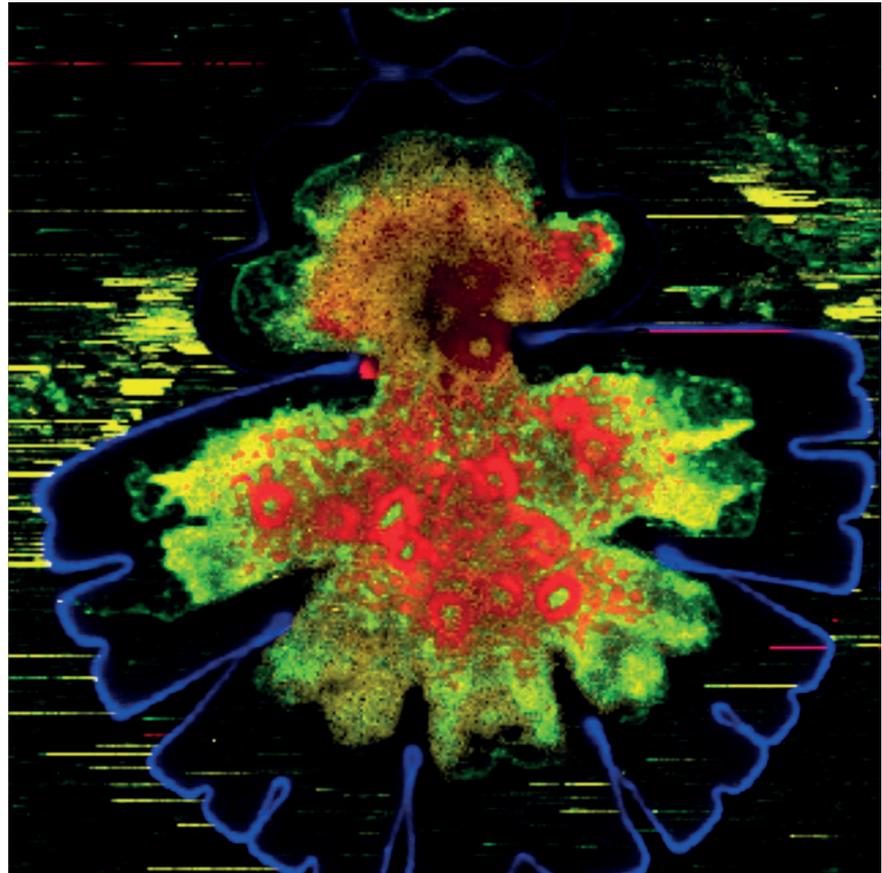


Abb.: Raman Bild von der Alge *Micrasterias denticulata*: Cellulose wird blau dargestellt, Stärke rot und Proteine und Fette grün und gelb. (© Notburga Gierlinger)

mein Schwerpunkt eher bei Massive-rem wie Holz und Nussschalen liegt. Man kann die Wasserverteilung in so einem Arabidopsis-Stängel zeigen, die Intensität wird in Grautönen dargestellt. Alles, was weiß ist, ist vollgefüllt mit Wasser, weil wir den Schnitt in Wasser eingebettet haben. Alles was schwarz ist, besagt, dass dort kaum Wasser in die Zellwand hineinkommt. Nun können wir natürlich genau schauen: Was macht das aus? Wie schauen die Raman-Spektren genau in den Bereichen aus, wo ich kein Wasser hineinkriege? Und ich kann mit unterschiedlichen Integrationen etwa die Aromaten integrieren und rot darstellen. Dort überall habe ich Imprägnation mit Lignin. Und grün dargestellt eine typische Wellenzahl für die Fette, für Cutin und für die Wachse. Das heißt, ich kann, indem ich mich auf die charakteristische Wellenzahl für die Aromaten oder für die Fette setze, auch diese Bereiche selektiv darstellen. Man sieht dabei sehr schön, es ist genau die Erklärung für die Hydrophobizität dieser zwei Gewebeschichten. Genau dort, wo ich die Aromaten und das Cutin eingelagert habe, bekomme ich kein Wasser hinein. Ich habe schon erwähnt, das Schöne und Wichtige für mich ist, dass ich

das immer kontrollieren kann. Ich kann mir nun genau Spektren von dem grünen Bereich ausgeben lassen, kann sie analysieren, kann genau sagen: Hier ist nur Cutin, es ist ein bisschen Fett darin, es sind auch etwas Aromaten darin. Genauso beim roten Bereich. Man sieht so, wie verschieden die Bereiche sind. Beide haben die gleiche Funktion, sie machen das Gewebe hydrophob, aber durch eine andere Strategie. Einmal sind es die Aromaten, einmal sind es mehr die Wachse.

Das sind jetzt unsere Raman-Spektren. Sie zeigen ein gutes Signal-Rausch Verhältnis, weil sie ein Mittelwert der gezeigten Bereiche sind. Wenn wir jetzt diese Riesenscans haben und diese Hunderttausenden Spektren aufnehmen, ist die Realität eher so, dass wir sehr verrauschte Spektren haben. Und es ist klar, wenn ich jetzt ganz kleine Bande integriere, wie die der Zellulose, dann werden die Bilder verpixelt und kleine Änderungen kann ich gar nicht mehr darstellen. Das sind aber zwei typische Integrationen, einmal für Zellulose, einmal für Lignin. Und genau das ist der Grund, warum wir sehr viel mit multivariaten Datenanalysemethoden arbeiten: um einfach noch mehr aus den Daten herauszuholen,

noch genauer analysieren zu können, als es der Fall ist, wenn wir nur die Integrationen verwenden.

Natürlich kann man jetzt auch Smoothing-Funktionen anwenden. Man hat eine Unzahl an Möglichkeiten, mit diesen Daten weiterzuarbeiten.

Ein Algorithmus, der für uns sehr erfolgreich war, gehört zu den sogenannten Unmixing-Methoden, Entmischungsmethoden, bei denen ein Algorithmus aus den 100.000 Spektren jene Spektren sucht, die am meisten verschieden sind. Diese werden als sogenannte Basisspektren oder Endmember-Spektren definiert und nun für ein Fitting an jedem Pixel herangezogen, um so die Anteile der einzelnen Komponenten (Endmember) in dem Scan (Bild) darzustellen. Somit werden alle anderen Spektren auf Basis dieser errechneten Endmember- oder Extremspektren erklärt.

Was ich eingeben muss, bevor ich die Analyse mache, ist die Anzahl dieser Komponenten. Ich kann es über Vorwissen machen, wie viele Komponenten ich erwarte, aber ich kann natürlich noch durchprobieren und die Analyse mit den unterschiedlichen Komponenten laufen lassen und vergleichen.

Das Ergebnis sind die sogenannten Reinkomponenten-Spektren oder

Endmember-Spektren und ihre Verteilung im Bild. Und wenn wir jetzt so ein pixeliges Bild mit vier Endmember berechnen, dann ist die Bildqualität sehr, sehr gut und ich habe nicht nur die Lignin- und Zelluloseverteilung, sondern auch zusätzliche Informationen. Jedes dieser vier Bilder entspricht einer Reinkomponente. Man sieht nun, dass die innere Schicht, die die Abgrenzung zum Lumen bedeutet und auch dort, wo die Zellen verbunden sind, wir eine andere chemische Zusammensetzung haben als im Rest der Zellwand. Und auch hier ist es so, dass man diese Endmember-Spektren genau anschauen kann. Und ich kann genau erklären, diese eine innere Schicht ist anders, weil sich die aromatische Zusammensetzung hier ändert. Nehme ich im Vergleich jetzt das Bild von der Integration, das mir eigentlich nur Zellulose und Lignin ausgesagt hat, ist es mehr verpixelt, und ich habe viel weniger Information als durch diese multivariate Datenanalyse.

Nehme ich einen Endmember mehr, sage ich also, ich habe fünf Komponenten, dann sieht man, dass ich sofort noch eine zusätzliche Zellschicht bekomme. Und wenn ich hier das Spektrum ansehe, stelle ich fest,

diese Zellschicht ist aufgrund der Zelluloseorientierung anders. Das heißt, ich kann iterativ probieren, wie viele verschiedene Endmember ich bekomme. Solange ich anhand der Spektren erklären kann, warum sie verschieden sind, habe ich natürlich einen enormen Erkenntnisgewinn.

Wichtig ist für mich immer, dass ich nicht nur die Bilder generiere, sondern die Bilder auch anhand der Spektren erklären kann. Es macht keinen Sinn für mich, jetzt zehn Endmember zu nehmen – was viele Leute machen –, zehn Bilder zu generieren, aber eigentlich die Spektren nicht zeigen zu können und auch nicht erklären zu können, was eigentlich Sache ist. Für mich sind die Spektren dahinter immer enorm wichtig.

Natürlich ändert sich meine Analyse auch durch den Bereich, den ich auswähle. Wenn ich alles, was ich schon als verschieden detektiert habe, nicht mehr inkludiere und die Analyse auf die Zellwand beschränke, dann entdecke ich zusätzlich eine Lamellenstruktur. Anhand der Spektren kann ich erklären, dass diese Lamellenstruktur durch eine Änderung in der aromatischen Zusammensetzung zustande kommt.

Das war einmal ein erster Einblick, um zu erklären, was wir so machen.

Als Nächstes möchte ich noch etwas zum Thema „Kernholzbildung“ erläutern, weil das ein sehr schönes Beispiel dafür ist, dass man genau verfolgen kann, wo und wie einzelne Komponenten in das Holz eingelagert werden. Kernholzbildung passiert dann, wenn der Baum im Inneren kein Wasser mehr leitet und trockenfällt. Es werden im Zuge der Kernholzbildung zusätzliche Extraktstoffe eingelagert, um das Holz widerstandsfähig zu machen, zum Beispiel gegen Pilzabbau. Bei Kiefer ist es Pinosylvin, und da es aufgrund konjugierter Pi-Systeme ein sehr starkes Raman-Signal gibt, kann es detektiert werden, obwohl es nur zu einem geringen Prozentsatz drinnen ist. Auf normalen lichtmikroskopischen Bildern erkennen Sie mit Mühe und Not gerade die Zellen. Wenn wir hier Raman-Mikroskopie machen, können wir genau den Start der Einlagerung dieser Substanz verfolgen. Die Integration von einer spezifischen Bande für dieses Pinosylvin zeigt genau, es wird zunächst zwischen den Zellen eingelagert. Genau dort, wo das Lignin drinnen ist, dieser Kleber für die Zellen, genau dort wird auch diese zusätzliche phenolische Komponente eingelagert. Wir sehen außerdem nicht nur die Zellwand,

sondern auch so Kügelchen. Und hier war natürlich sofort die Frage, ob das eventuell auch etwas zu tun hat mit dem Transport dieser Extraktstoffe.

Wenn ich auch hier eine multivariate Methode anwende, wird das von vorher bestätigt: Wir haben sehr viel Pinosylvin zwischen den Zellen, aber auch als innere Schicht, in der so bezeichneten S3-Schicht. Und das macht durchaus Sinn, dass der Baum vor allem diese innere Schicht noch einmal „mit Bedacht“ auskleidet, um geschützt zu sein.

Von diesen kleinen Tropfen kann ich auch gezielt Spektren extrahieren. Wenn ich das mit Lipiden vergleiche, sehe ich, dass diese Tropfen, bevor das Kernholz gebildet wird, wirklich reine Lipide sind. Komme ich dann in die Zone, wo die Kernholzbildung beginnt, wo der Baum trockenfällt, ändern sich die Spektren massiv. Wir haben zusätzlich jetzt die Aromaten, die hereinkommen. Das heißt, ich kann auf kleinster Ebene diese Veränderungen in der Chemie nachverfolgen. Und mit diesem Ergebnis war klar, dass zunächst Fette genau in diese Übergangszone kommen und dann das Pinosylvin und diese lipidschen Ablagerungen in der Kernholzbildung eine Rolle spielen.

Ein anderes sehr spannendes Beispiel ist vom Schachtelhalm, weil er sehr große Ablagerungen von Silikaten hat und weil sich dabei immer die Frage stellt: Ist das Lignin-Ersatz, ist das Abwehr oder warum macht er das? Und vor allem ist auch von Interesse, wo genau in der Pflanze es abgelagert wird.

Wir haben ohne Schnitte wirklich in situ, durch eine Auflagerung, durch einen Knob, einen Tiefenscan gemacht. Also ich kann nicht nur in der Fläche scannen, ich kann, wenn ich transparente Sachen wie diese Knobs habe, auch in die Tiefe scannen. Durch den Vergleich vom normalen Silikagel mit dieser Auflagerung war es ganz klar, dass die Auflagerung fast reines Kieselgel ist und sich zwar weiter unten auch noch Silizium befindet, aber in einer anderen Form. Das heißt, man kann nicht nur sehen, wo es ist, sondern auch in welcher Form. Wir haben uns dann noch zusätzlich die Karbohydrate angeschaut. Es ist ein Riesenvorteil, dass ich in diesem Fall nicht nur die Mineralien verfolgen kann, sondern zusätzlich auch noch die Zucker.

Als letztes Beispiel noch ganz kurz Raman-Imaging an Algen. Bei diesen ist es wirklich so, dass man gar keine Probenvorbereitung braucht. Das

Problem ist hier die Autofluoreszenz durch das Chlorophyll. Wenn ich das aber einmal „weggebleicht“ habe, kann ich ganz normale Messungen machen und sehr schön zeigen, wie die Zellwand aufgebaut ist, wo die Stärke ist oder die Proteine sind. Bei einem Beispiel ging es um Formbildung der Zieralge *Micrasterias*: Wie macht es die Alge, um zu diesen Formen zu kommen? Man erkennt hier Anlagerungen in den Lappen, und das ist eine Anlagerung von Zellulose, die für diese Formbildung verantwortlich ist.

Durch die Möglichkeit, In-situ-Studien zu machen, kann man bei solchen Algen auch schauen, wie sie mit Barium und Strontium umgehen. Hier haben wir gesehen, dass Barium als Bariumsulfat eingelagert wird, während das Strontium überraschenderweise als Strontiumcitrat ausfällt. Das bedeutet, man kann hier nicht nur sehen, wo die Mineralien sind, sondern auch genau feststellen, in welcher Form die Zelle die Mineralien sequestriert.

Was wir sehr gerne machen, ist, dass wir nicht nur eine Methode anwenden, sondern mit Rasterkraftmikroskopie kombinieren, um Mikrochemie und Nanomechanik zu haben. Wir glauben, dass wir dadurch wirklich

ein umfassendes Materialverständnis bekommen und Struktur-Funktionsbeziehungen verstehen können.

Damit komme ich zum Ende und Sie werden hoffentlich mitnehmen, dass jedes Pixel meiner Methode wirklich einen molekularen Fingerprint im Kontext mit der Mikrostruktur liefert. Wir haben immer eine Unzahl an Spektren, was bedeutet, dass die Auswertung nicht leicht ist. Aber es gibt eine Unzahl an Möglichkeiten univariater und auch multivariater Natur. Wir sind erst am Anfang, die Spektren zu verstehen, und auch am Beginn der Methodenentwicklung.

Die Kombination mit anderen Methoden ist immer wichtig. Großes Potenzial sehe ich wie gesagt mit Rasterkraftmikroskopie, weil wir noch weiter auf die Nanoebene kommen und auch die mechanischen Eigenschaften bildlich darstellen können.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit. Danke auch an meine Gruppe, an meine Financiers und an meine Kooperationspartner.

HERBERT MATIS

Arbeiten Sie auch mit dem Gregor-Mendel-Institut der ÖAW zusammen? Das GMI benutzt die Kreuz-

blütlerpflanze *Arabidopsis thaliana* ja als Modellpflanze. Es wäre vielleicht ganz interessant, da einmal eine Verbindung herzustellen.

NOTBURGA GIERLINGER

Wir haben nur ganz wenig Sachen an *Arabidopsis* gemacht und hier vor allem zusammen mit der ETH Zürich und mit belgischen Kollegen, die sehr interessante Lignin-Mutanten hatten.

HERBERT MATIS

Danke schön jedenfalls für den Vortrag. Gibt es dazu Wortmeldungen, Fragen? Ich glaube, es hat für viele von uns eigentlich ein ganz neues Spektrum eröffnet, wie man also auch in der Botanik mit nichtinvasiven Methoden oder nur zum Teil invasiven Methoden zu ganz neuen Darstellungsmöglichkeiten kommt. Bitte Herr Kerschbaum.

FRANZ KERSCHBAUM

Ganz kurz: Wie weit ins Infrarote können Sie da schon messen, ins Nahinfrarote?

NOTBURGA GIERLINGER

Wir gehen nur bis 785 Nanometer. Aus dem Grund, weil nachher die Intensität einfach stark abnimmt, einen komplett anderen Aufbau erfordert und auch die räumliche Auflösung für uns zu schlecht wird. 785 nm ist gerade an der Grenze, wo wir noch diese unterschiedlichen Zellschichten auflösen können. Alles andere ist uns schon wieder zu groß und zu langsam, vor allem für das Imaging.

PUBLIKUMSGAST

Vielen Dank, Frau Professorin Gierlinger, für Ihren großartigen Vortrag. Ich möchte vielleicht eine Anregung geben. Mendel ist, wenn ich richtig informiert bin, ja in Brunn gewesen. So weit brauchen Sie gar nicht gehen. Aber vielleicht können Sie Ihren Kreis der Financiers und Sponsoren erweitern. Der Präsident der österreichischen Forst- und Waldwirtschaft, Herr Montecuccoli, würde sich sicherlich dafür interessieren. Er hat zwei große Probleme, einmal das des Borkenkäfers und zweitens das des Klimawandels, wo die Bäume immer mehr absterben

und die Forstwirtschaft vor der riesigen Aufgabe steht, die Nutzung der Wälder umzustellen, jetzt schon in der Alpenregion. Vielleicht können Sie ihm mit Ihren Forschungen bezüglich des Holzes behilflich sein. Danke.

NOTBURGA GIERLINGER

Danke für diesen Hinweis. Hier sind wir bereits bestrebt, zukünftige Forschungsprojekte in diese Richtungen auszudehnen. Was ich schon ehrlicherweise zugeben muss, ist, dass unsere Forschung teilweise noch sehr kompliziert ist und vergleichende Analysen oft schwierig sind. Aber was wir schon machen, sind Untersuchungen, wie sich die Holzstruktur bei Trockenstress ändert oder warum Fichtennadeln von einem Baum resistenter sind gegen Pilzbefall als jene von anderen.

GEORG BRASSEUR

Danke für den Einblick in diese spannende Welt. Womit färben Sie ein? Was für Substanzen sind das, die wissen, an welcher Chemie sie andocken sollen?

NOTBURGA GIERLINGER

Wir färben gar nichts ein – das ist das Tolle an der Methode. Wir erzeugen Falschfarbenbilder, die einerseits auf den unterschiedlichen Bandenintegrationen der Spektren basieren oder das Ergebnis multivariater Analysemethoden sind. Die Grundlage sind immer die Raman-Spektren und das ist der Riesenvorteil gegenüber Färbungen. Bei Färbungen ist man nicht sicher, ob es nur das Lignin ist, wo der Farbstoff andockt, oder ob er auch an chemisch ähnlichen Komponenten wie zum Beispiel den Extraktstoffen andockt. Oder ich habe ein Protein, das meine Färbung stört etc. Bei Raman-Imaging habe ich wirklich an jedem Pixel ein Spektrum mit einem molekularen Fingerprint, den ich jederzeit überprüfen und analysieren kann.

PUBLIKUMSGAST

Es gibt ja im Geigenbau die große Frage, wie sich eine Stradivari von anderen Geigen unterscheidet. Haben Sie schon einmal versucht, die Holzstruktur einer Stradivari zum Beispiel mit einer normalen Geige zu vergleichen?

NOTBURGA GIERLINGER

Das haben wir nicht gemacht. Aber an der ETH Zürich war einmal Kontakt in diese Richtung da.

PUBLIKUMSGAST

Eine ganz kurze Frage, ich glaube, sie ist extrem fantastisch. Obwohl nur mit einem Baum charakterisiert – ich formuliere es jetzt einmal ganz plagiathaft: Wie schafft man es, wenn ich jetzt nur rein optisch an einen Baum denke oder eine Rinde, hier aus dieser Vielzahl an Informationen wieder zurück zu reduzieren, was mit dem Baum nicht stimmt? In welche Richtungen geht man da?

NOTBURGA GIERLINGER

Das ist ein ganz wichtiger Hinweis, der auch in der Forschung sehr oft vernachlässigt wird. Man muss diese Variabilität immer berücksichtigen. Nehmen wir die vergleichenden Untersuchungen: Wir haben beispielsweise ein Projekt, bei dem es um den Pilzbefall von Fichten in Tirol geht, da werden die Nadeln befallen. Hier ist natürlich der erste Schritt,

dass wir alles separat anschauen müssen, von außen bis nach innen, bei der ganzen Nadel. Und das ist einmal nur die Nadel, da bin ich noch nicht beim Holz. Das Wichtige bei den vergleichenden Untersuchungen ist, dass man immer genau den gleichen Teil ansieht. Aber Sie haben vollkommen recht, die Variabilität, die wir immer haben – in der Biologie generell, glaube ich, das ist bei Tieren und bei Menschen nicht anders –, ist bei Pflanzen auch der Fall. Für mich ist das Wichtigste, dass mir das immer bewusst ist und dass ich es sowohl in der Probennahme als auch dort, wo ich meinen Mess-Check ansetze, so mache, dass es vergleichbar ist. Wenn ich Holz nehme und der Baum steht schief oder ich vergleiche einen Ast mit einem Stamm, dann ist es so, als würde ich Äpfel mit Kartoffeln vergleichen – das ist ganz verschieden. Wenn ich vergleichen will, muss ich zum Beispiel immer gleichaltrige Bäume und die Holzprobe aus der gleichen Position im Stamm nehmen. Vergleichende Untersuchungen sind immer schwierig, denn man muss sehr viel messen, um die natürliche Variabilität zu erfassen, wenn man wirklich gesicherte Aussagen über Unterschiede machen und publizieren will.

HERBERT MATIS

Frau Gierlinger, vielen herzlichen Dank. Ich glaube, wir waren alle sehr angetan von Ihren Ausführungen. Wir haben nun noch zwei Vorträge, die, so denke ich, auch großes Interesse finden werden.

Es ist mir eine große Freude, als nächsten Vortragenden Herrn Kollegen Wolfgang Neubauer vorstellen zu dürfen, der auch korrespondierendes Mitglied unserer Akademie ist. Er ist aber vor allem Leiter des Ludwig-Boltzmann-Instituts für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie. Wir nähern uns damit also einer anderen Dimension. Der Boden wurde schon im letzten Referat angesprochen, wo er natürlich im Zusammenhang mit der Botanik eine wichtige Rolle spielt, aber wir gehen jetzt auch in den Boden hinein, nämlich in Form des nicht invasiven Blicks in den Boden, der ja für die Archäologie eine ganz neue Dimension eröffnet hat. Herr Neubauer hat, kann man sagen, ein Doppelstudium, er ist gebürtiger Schweizer, ist jedoch in Österreich wunderbar akklimatisiert. Er hat ein Studium zunächst in Mathematik und Computerwissenschaft an der Technischen Universität in Wien begonnen, sich dann wäh-

rend seiner Tätigkeit als Assistent am Institut für Computergrafik und Algorithmen auch für die Interpretation von Luftbildaufnahmen und Bodenlaseranwendungen interessiert. Und das hat ihn so sehr fasziniert, dass er sich dann überhaupt in die Archäologie hineinbewegt hat. Ich darf sagen, dass es ein großer Vorteil für die Archäologie in Österreich war, dass er diesen Schritt getan hat. Er hat sich nach dem Studium der Ur- und Frühgeschichte und Archäometrie an der Universität Wien 2008 auch für dieses Fach habilitiert. Durch seine Erkundungsarbeiten ist er international bekannt, etwa durch die in Stonehenge, wo er quasi ein „zweites Stonehenge“ als Holzkonstruktion entdeckt hat, oder durch Prospektionen von Wikingersiedlungen in Norwegen und Schweden. Herr Neubauer war auch in Ägypten tätig und natürlich auch in Deutschland, der Schweiz und in Österreich, wo er unter anderem auch im Bereich von Carnuntum eine Gladiatorenschule und ein weiteres Amphitheater entdeckte. Er setzte dabei wiederholt nicht invasive Methoden ein, wie flugzeuggestützte Laser- und Hyperspektral-Scanner, die terrestrisch dann noch durch Magnetfeldmessungen und Bodenradar ergänzt und

abgeglichen wurden. Er hat auf dieser Basis wirklich zum Teil sensationelle Entdeckungen gemacht. In seinem Vortrag, der vielleicht vom Titel her zunächst überraschen mag, „Forensik trifft Archäologie. Bildgebende Verfahren für den nicht-invasiven Blick in den Boden“, demonstriert er, dass die Adaptierung von neuen Visualisierungswerkzeugen, wie wir sie aus der Medizin kennen, wo sie etwa für multimodale Datensätze in der Medizin verwendet werden, auch für die archäologischen Überreste im Boden höchst interessant ist. Ich darf Herrn Neubauer bitten, seine Ausführungen zu beginnen, und bin sehr froh, dass er uns für diesen Vortrag zugesagt hat.

FORENSIK TRIFFT ARCHÄOLOGIE

BILDGEBENDE VERFAHREN FÜR DEN NICHT INVASIVEN BLICK IN DEN BODEN

WOLFGANG NEUBAUER

Besten Dank für die Einladung, danke für die einleitenden Worte. Ich muss nur ergänzen, ich bin Österreicher, ich bin nur in der Schweiz geboren, ich habe also Migrationshintergrund.

Ja, meine sehr verehrten Damen und Herren, Forensik trifft Archäologie. Wenn man Dokumentationen im Fernsehen über Archäologie anschaut, kommt immer irgendwann der Punkt, wo es heißt: „Die Archäologen verwenden kriminalistische Methoden.“ Also lag es eigentlich ziemlich nahe, gemeinsam mit dem Ludwig-Boltzmann-Institut für

Klinisch-Forensische Bildgebung einmal zu überlegen, bei einem Backendl in Graz und bei einem guten Bier, ob wir nicht gemeinsam Dinge entwickeln können, die uns in der Archäologie weiterbringen, aber auch Rückwirkungen auf die forensische Forschung haben. Und das habe ich gemeinsam mit Herrn Alexander Bornik gemacht, der auch hier als Co-Autor für diesen Vortrag aufscheint. Und er ist auch hier; also, wenn wir dann später noch konkrete Fragen zu den computertechnischen Details haben, steht er auch zur Beantwortung zur Verfügung.



Wolfgang Neubauer ist Direktor des Ludwig-Boltzmann-Instituts für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (LBI ArchPro). Er ist Mathematiker und (prähistorischer) Archäologe. 2008 habilitierte er sich an der Universität Wien für das Fach „Interdisziplinäre Archäologie“. Unter anderem leitete er zahlreiche Projekte zur Prospektion archäologischer Landschaften in ganz Europa.

Worum geht es dem Ludwig-Boltzmann-Institut für Archäologische Prospektion? Wir haben hier eine wesentliche gesellschaftliche Herausforderung, nämlich unser archäologisches Erbe im Boden zu bewahren. Das können wir nur tun, wenn wir es kennen, wenn wir wissen, wo es liegt, in welcher Form es erhalten ist und wie es in seiner Bedeutung geartet ist. Und dazu kann man keine archäologischen Ausgrabungen verwenden, weil die archäologische Ausgrabung per se ein zerstörendes Experiment ist, von dem am Ende gar nichts überbleibt. Es ist auch nicht wiederholbar, weil die Quelle bei der Untersuchung direkt zerstört wird, und die Quelle ist immer einzigartig. Das heißt, es gibt keine römische Villa, die mit einer anderen römischen Villa zu vergleichen wäre. Das bedeutet also, es gibt nur die nicht invasive Möglichkeit, diese archäologischen Fundstellen zu untersuchen. Das ist auch Teil des Malta-Treaty, wo es um Denkmalpflege, Denkmalschutz und Management von Heritage geht. Und in den Malta-Treaties wurde die sogenannte „Valletta Convention“ schlagend, die 2015 sogar auch von Österreich ratifiziert wurde. Nachdem sie aus dem Jahr 1992 stammt, hat es also ein

paar Jahre gedauert, wir haben aber eine ganze Reihe von Partnern in ganz Europa, die hier schon früher an diesem Valletta-Treaty, also an dieser „Valletta Convention“, dran waren – und es umsetzen mussten. Die Convention sagt: „Man soll zerstörungsfreie Methoden nützen, soweit möglich, bevor man irgendwann wo hineingräbt.“

Dazu verwenden wir verschiedene Methoden, wir haben schon von Flugzeugen gehört mit speziellen Kameras, mit speziellen Scannern, die unten eingebaut sind. Wir haben natürlich ganz normale RGB-Luftbilder, aber auch Airborne-Laserscans, mit denen wir topografische Details in allen Einzelheiten herausbringen. Z.B. auf einer Luftaufnahme des Amphitheaters in Carnuntum, es wird uns nachher noch beschäftigen, sieht man die Altarme der Donau, da ist normalerweise ein dichter Auwald. Das heißt, eine unserer Spezialitäten ist das digitale Holzfällen. Wir schauen, dass wir diese ganzen Sachen wegbringen. Die Laserscanner, die hier hineingebaut sind, sind sogenannte Full-Waveform-Scanner. Wir haben also ein spektroskopisches Bild, wir bekommen, was wir heute schon mehrfach gehört haben, quasi Fingerprints. Wir messen am Boden,

mit terrestrischen Laserscannern, und zur gleichen Zeit aus der Luft. Und wir schauen uns die Bäume an, was sind Äste, was sind Stämme, was sind Blätter, was ist Unterholz, das herumliegt, was sind Holzhaufen? Das können wir dann ganz spezifisch aus unseren Daten herausfiltern.

Ein anderes Beispiel ist eine Luftaufnahme aus Schweden, aus Birka, ein Gräberfeld der Wikingerzeit. Tausende Gräberfelder, die eigentlich alle unter Birken verborgen liegen. Auf dem Boden werden diese Informationen dann mit einem Cäsium-Magnetometer verdichtet. Es misst mit einer Auflösung von ungefähr zehn Zentimetern, einmal 15 Zentimetern, das Erdmagnetfeld mit einer Genauigkeit von fünf Picotesla. Die archäologischen Störungen, die wir hier messen, spielen sich im Bereich von unter einem zehntel Nanotesla ab. Das ist der Grund, warum wir so hochauflösende Magnetometer verwenden müssen, um diese Dinge auch entsprechend abzubilden. Wir verwenden auch andere Sensoren – die wie hier, bei diesem Beispiel, motorisiert sind –, auf unmagnetischen Geräteträgern. Mit ihnen können wir also sehr rasch über die Felder flitzen. Hier erreichen wir nicht diese Genauigkeiten, wir sind hier

bei ungefähr 0,1 Nanotesla, aber was hinten herauskommt, sind Magnetbilder der archäologischen Fundstellen. Auf Aufnahmen von Carnuntum sehen Sie so den Graben, der die Stadt begrenzt, oder wir gehen hinein, in die einzelnen Bereiche, die einzelnen Insulae, und können Hausgrundrisse erkennen.

Der nächste Schritt ist, ein Bodenradar zu verwenden, elektromagnetische Wellen. Bei unserer großen Maschine, sie hat einen Durchsatz von ungefähr sieben Hektar an einem Tag, mit einer Auflösung von zehnmal vier Zentimetern, sind das 17 Antennen, die in einer Box eingebaut sind und die dann quasi im Untergrund diese Dinge untersuchen. Die Tiefenauflösung ist normalerweise bei ungefähr zwei Zentimetern. Das hängt natürlich von den jeweiligen spezifischen Begebenheiten des Bodens ab. Und damit können wir quasi in den Untergrund hineinklicken und können mehr oder weniger ein dreidimensionales Bild des Untergrundes aufnehmen. Die Magnetik ist nur zweidimensional, quasi ein latentes Bild des herrschenden Magnetfeldes, aber hier, mit dieser aktiven Methode, können wir tatsächlich ein dreidimensionales Bild messen, indem wir in diesem Fall

etwa die Reflexionsintensitäten in bestimmten Tiefen aufsummieren und dann als Graustufenbild darstellen.

Wir verwenden aber alle diese Methoden mehr oder weniger in Kombination: Luftbild, Magnetik, Bodenradar und natürlich dann auch die weiteren Informationen aus Grabungen oder aus vergleichenden Quellen, wie zum Beispiel auch römische Architekturvorschriften, um die römischen Städte genau in ihren Details zu analysieren und am Ende klarerweise auch wieder zu rekonstruieren. Denn die Rekonstruktion der Geschichte aus den materiellen Quellen oder aus den materiellen Hinterlassenschaften, das ist das primäre Ziel der Archäologie.

Gehen wir jetzt ein bisschen ins Detail mit dem Bodenradar, anhand einer weiteren Konfiguration, die wir alle selbst bauen. Das Gerät ist sehr schnell, wir können hier mit mehr als 50 Kilometern pro Stunde flitzen. Das Gerät hat fünf Antennen, das sind 500-Megahertz-Antennen, die normalerweise mit einem Abstand von 25 Zentimetern montiert werden. Inline, also in Fahrtrichtung, haben wir eine Auflösung von durchschnittlich circa zehn Zentimetern. Wir können auch auf fünf Zentimeter hinuntergehen, aber wir

resampeln normalerweise auf zehn Zentimeter, sodass wir hier klarere Daten bekommen. Was kommt hinten heraus? Hinten heraus kommen wieder Graustufenbilder der Reflexionsintensitäten. Das heißt, diese elektromagnetischen Wellen werden an Schichtgrenzen, überall dort, wo sich die Materialparameter ändern, reflektiert und refraktiert, die reflektierten Signale werden von den Empfängerantennen aufgenommen. Die Zeit wird aufgeschrieben, quasi registriert, und daraus können wir dann die Tiefenbilder erstellen.

In der Forensik, in der klinisch-forensischen Bildgebung, haben wir das Äquivalent eines Computertomografen. Auch hier haben wir ein Graustufenbild, das mehr oder weniger aus einem dreidimensionalen Datenvolumen ein Abbild in einer bestimmten Tiefe zeigt. Das bedeutet also, die beiden Quellen sind direkt miteinander vergleichbar; wir haben daraus geschlossen, dass eigentlich auch die Prozessierungsmöglichkeiten ähnlich sein müssten. Das war also unsere Ausgangsposition. Beide Verfahren liefern mehr oder weniger ein 3-D-Volumen. Diese Voxel sind mit unterschiedlichen Informationen besetzt. Uns geht es also darum, mehr Visualisierungsmög-

lichkeiten zu schaffen und nicht nur einzelne Schnittbilder anzuschauen. Die Schnittbilder haben in der medizinischen Anwendung oder in der Forensik den Zweck der Diagnostik, in der Archäologie das Erkennen spezifischer archäologischer Strukturen, wie zum Beispiel der Mauerzüge von römischen Gebäuden oder eines Abwasserkanals.

In der Medizin können wir aus diesen Daten durch die Zuordnung der Farbe und spezifischer Transparenzen schöne Darstellungen zeigen, etwa von einer Leiche, dem Opfer eines Stichattentats. Solche Darstellungen haben in der Medizin selbst einen sehr begrenzten Nutzen. Für unsere Fragestellung sind sie aber sehr interessant, weil wir hier weiterkommen. Ausgehend von einfachen Schnittbildern, wo wir eine Anomalie, wie etwa den Stichkanal, lokalisieren können, können wir durch die Kombination verschiedener Datenquellen, also beispielsweise eines 3-D-Scans des Körpers, eines Computertomogramms des Skeletts oder der Weichteile, weitere Möglichkeiten eröffnen, um zu diesem Tathergang weitere Fakten zu erheben. Wenn wir wie gesagt Daten kombinieren, 2-D-Bilder fotografischer Art, 3-D-Oberflächen gescannter Art – von dem Körper,

aber auch zum Beispiel von Tatwerkzeugen, wie dem Messer – oder dann eben die 3-D-Volumendaten aus dem Computertomogramm, dann bekommen wir ein Modell dieser Leiche, dieses Opfers, dieses Stichattentats, das uns natürlich sehr viele Details und sehr viele Fragen beantworten kann.

Durch Kombination dieser unterschiedlichen Daten kann man im Computertomogramm eine Anomalie erkennen, das ist unsere erste Einstichstelle, und farblich herausheben. Wir können sie also selektiv herausnehmen, segmentieren, weiter untersuchen und versuchen, daraus – und jetzt sind wir wieder beim Zusammenhang mit der Archäologie – die Tathergangsgeschichte zu rekonstruieren. Das heißt, wir können etwa die Richtung des Einstichs feststellen, die Länge, die Tiefe des Einstichs, wir sehen, es geht bis auf die Rippen und dann ist Schluss. Also das war nicht tödlich, wir haben also hier eine weitere Information gewonnen, die aus den normalen Bildern nicht direkt ablesbar ist. Aber man erkennt weitere Anomalien, zum Beispiel im Bereich des Herzens, hier befindet sich Luft. Es ist schon eher nicht mehr ganz zu überleben, wenn das Herz mit so viel Luft gefüllt ist, das

ist wirklich schon eine ganz wesentliche Information. Und es gibt noch weitere Anomalien. Vor allem eine im Schulterbereich, die ist sehr interessant, denn sie ist nicht wie vorher sehr eng, sondern ziemlich breit. Das ist also kein so klares Ding wie vorher bei diesem Stich, sondern es ist eine sehr breite Anomalie. Und es dürfte sich dabei auch eher um ein schwertartiges Mordinstrument gehandelt haben. Man sieht, wo der Schwertstich genau hineinging. Und das ist aus archäologischer Perspektive wieder sehr spannend. Es handelte sich hier zwar um keine archäologische Leiche, aber das ist die typische Art und Weise, wie bei den Römern die Gladiatoren zu Tode gebracht worden sind.

Das führt uns jetzt direkt mit einem Schritt nach Carnuntum. Wir haben schon gehört, Carnuntum ist von uns untersucht worden, wir haben hier sehr große Flächen gemessen. Fast zehn Quadratkilometer, und eine der herausragenden Entdeckungen wurde direkt neben dem Amphitheater gemacht. Das war zu jener Zeit das viertgrößte Amphitheater der römischen Welt. Ungefähr 13.000 oder mehr Besucherinnen und Besucher konnten hier gleichzeitig die Spiele beobachten. Viele davon, die

keinen Sitzplatz hatten, tummelten sich herum. Also hier war sehr viel los, und direkt daneben haben wir die Spuren eines großen Gebäudes mit einem großen Innenhof gefunden, komplett abgeschlossen, mit einer weiteren kleinen Arena. Das ist eine sehr typische Situation für etwas, was bisher in dieser Form noch nirgends gefunden worden ist. Es gibt eine teilweise ausgegrabene ähnliche Anlage in Rom, das ist der Ludus Magnus, die große Gladiatorenschule neben dem Kolosseum. In Carnuntum haben wir quasi das provinzielle Gegenstück, wobei man sagen muss, dass Carnuntum keine kleine Provinzhauptstadt war, sondern es war wirklich ein sehr großes Areal. Zehn Quadratkilometer wie gesagt, es gab mehrere unterschiedliche Stadtteile. Wir haben in Carnuntum drei verschiedene Amphitheater, wir haben das große Legionslager und viele Lager von Hilfstruppen. Allein im Umfeld von Carnuntum haben wir 23 Lager von Truppen gefunden, die bei großen Feldzügen zusammengezogen worden sind.

Alle diese Menschen, sowohl die Einwohnerinnen und Einwohner von Carnuntum als auch diese vielen Truppen, die immer wieder in Carnuntum stationiert waren, woll-

ten unterhalten werden. Die Spiele waren ein wesentliches Element. Jeder, der damals eine Position in der Gesellschaft bekleiden wollte, musste solche Spiele ausrichten, musste hier also investieren, indem er für Gladiatoren gezahlt hat. Und das bedeutet auch, dass ein Gladiator einen hohen Wert hatte. Das Zutodebringen war eher die Ausnahme, aber wenn es geschah, dann durch Niederknien und durch einen Schwertstich in der Form, wie wir ihn vorher bei dieser „modernen“ Leiche gesehen haben. Diese archäologische Rekonstruktion ist etwas, was auf vielen Fakten beruht, aber es ist sicher nicht die Wahrheit. Wir haben heute davon schon kurz gehört: Was ist hier wahr? Ich als Philosoph frage mich, ob es die Wahrheit überhaupt gibt. Das ist ein eigenes Thema, aber wir generieren damit Bilder. Wir garantieren damit, dass wir unsere Erkenntnisse in Visualisierungen umsetzen können, die man versteht.

Ist es richtig oder ist es falsch, dass wir das tun? Das ist eine ganz wesentliche Frage, und sie begleitet uns jetzt auch bei der Visualisierung der Daten. Das heißt, können wir die Daten so visualisieren – in dem Zusammenhang, was wir daraus an hypothetischen Rekonstruktionen

ableiten –, dass es nachvollziehbar wird? Dass verständlich wird, warum wir zu diesen Lösungen kommen? Und wenn wir das können, dann sind wir schon wieder einen Schritt weiter. Wir haben schon gesehen, dass wir verschiedene Datenquellen haben, die wir miteinander kombinieren. Das Ziel ist, dass wir daraus Modelle hypothetischer Art erstellen, die uns dabei helfen, dieses ganze Konstrukt einer römischen Stadt besser zu verstehen, aber auch der interessierten Öffentlichkeit besser zu vermitteln und damit die entsprechende Aufmerksamkeit und das entsprechende Bewusstsein für die Bedeutung der Erhaltung unseres kulturellen Erbes zu schaffen.

Wieder zurück zu den Daten: Wir haben, wenn wir uns ein so generiertes Bild anschauen, den Eindruck, dass dieses Bild sehr verrauscht ist. Ich kann Ihnen mittlerweile sagen, das ist nicht Rauschen, sondern das sind alles Informationen. Wir können sie nur nicht in allen Details verstehen. Auf dem Bild des Gebäudes aus Carnuntum erkennt man etwa kleinste schwarze Punkte in einem regelmäßigen Raster: Das sind die kleinen Fundamentsäulen aus Ziegelplatten für die Fußbodenheizung. Das heißt also, sie sind ungefähr

40 Zentimeter groß, quadratisch, und sie lassen sich mit diesem Radar abbilden. Und nicht nur das: Wir sehen natürlich auch, wo noch Reste der Fußböden erhalten sind, wo noch Estriche sind oder Tonplatten. Wir sehen in Kombination mit den Magnetikdaten, in welchen Bereichen zum Beispiel Steinböden verlegt worden sind und für welche man gebrannte Fliesen verwendet hat. Es sind also ganz viele Informationen, die darin enthalten sind. Die Interpretation des Ganzen scheint auf den ersten Blick sehr einfach. Wir sehen hier die Mauern, wir sehen ein Gebäude, aber in dem Moment, wo es darum geht, das genauer abzugrenzen, um zu sagen, genau hier ist die Grenze dieser Mauer, wird es schwierig. Und das macht es natürlich auch schwierig, automatische Methoden zu finden, mit denen in diesem Bild irgendetwas segmentiert werden kann. Unser Ziel ist es also, in diesen dreidimensionalen Volumina die reflektierenden Grenzflächen der unterschiedlichen Ablagerungen und Strukturen aufzufinden und entsprechend darzustellen: Das sind Gebäudefundamente, das sind Eintiefungen (Abwasserkanäle, auf die ich schon hingewiesen habe. Man sieht sehr schön die beiden Mauern

dieses Abwasserkanals); Es sind Fußbodenheizungen, Fußböden, was auch immer.

Eine Möglichkeit ist, diese Datenvolumina zu animieren. Damit bekommen wir einen dreidimensionalen Zusammenhang. Wir können diese Daten zu „Iso-Surfaces“ zusammenfassen. Es bilden sich quasi dreidimensionale Volumina mit den gleichen Reflexionsintensitäten, aber es ist alles noch immer etwas schwierig. Es bewegt sich alles noch immer dort, wo ich sage, ich verstehe es nicht wirklich. Nun haben wir hier gemeinsam mit unseren Kollegen in Graz eine erste Visualisierung dieser Daten durchgeführt, wir haben also versucht, noch einmal zu schauen, was wir hier erkennen können. Wir sind noch nicht an dem Punkt angelangt, dass wir diese Hypokaustum-Anlage genau verstehen, aber wir sind schon einen großen Schritt weiter. Wir sehen diese Daten dreidimensional und in einer Form, in der wir einzelne Objekte erkennen.

Die Frage ist, ob es tatsächlich die Objekte sind, die wir suchen. Sind das die Abbilder der Mauersteine, die die Römer dort verlegt haben, oder sind das nur spezifische Reflexionen, die aus unterschiedlichsten Gründen so entstehen, dass sie so ausschauen

wie eine Mauer, aber eigentlich nicht wirklich die Steine abbilden? Die Frage ist schwer zu beantworten, das ist eben auch das Forum der Stadt Carnuntum, und da kann man nicht einfach so kurz reingraben und nachschauen. Wie schon gesagt, das wäre zerstörend, destruktiv.

Der nächste Schritt war, herzugehen und zu sagen, wir wollen unsere Daten mehr glätten, wir wollen sie vereinfachen, damit wir das Problem ein wenig reduzieren. Man bekommt, im Gegensatz zu vorher, größere Regionen, die wir gesamthaft dann besser darstellen können.

Im nächsten Schritt wollen wir diese Schnittbilder nicht nur animieren, sondern wir wollen wirklich eine dreidimensionale Visualisierung erzielen. Das war also der Ausgangspunkt, die Animationen dieser einzelnen Schnittbilder. Das haben wir, glaube ich, 1999 das erste Mal gemacht. Auch international waren wir hier die Ersten, die Daten so dargestellt haben. Die Filterung ist doch ein bisschen komplexer, aber die Mauern kommen hier schon als Körper besser zu der Geltung. Das heißt, es ist weniger explorativ für den Betrachter, aber das, was wir wirklich wollen, ist die dreidimensionale Visualisierung. Und wenn wir jetzt da hineinfliegen,

in diesen Datenraum, dann sehen wir Mauern in einer Form, die schon sehr nahe dran ist an dem, wie wir sie sehen würden, wenn sie ausgegraben wären. Es stellt sich noch einmal die Frage, ob das Abgebildete tatsächlich Mauersteine sind. Das kann ich momentan noch nicht beantworten, wir sehen aber nicht nur die Mauern, sondern auch immer wieder solche geschlossenen Flächen, das sind also tatsächlich die Fußböden. Es kommt da jetzt plötzlich einiges an Details hinzu. Oder man erkennt in einem mehr oder weniger offenen Raum zwei große Anomalien. Das könnten zum Beispiel die Fundamente von größeren Statuen sein, die in diesem Raum aufgestellt waren. Ich werde noch darauf zurückkommen, warum man das annehmen darf.

Der nächste Schritt war also, weiterzugehen, diese dreidimensionale Visualisierung weiter zu tunen, weitere Parameter hineinzubringen, durch die Transparenz verschiedener Bereiche Dinge zu sehen, die man nicht sieht, durch die Verstärkung anderer Bereiche den Fokus auf solche zu legen, die vielleicht im ersten Moment übersehen worden sind. Betrachten wir jetzt noch einmal das gleiche Beispiel in dieser Form der Visualisierung, dann erkennen

wir, welcher großer Schritt vorwärts das ist. Was wir vorher als einzelne Objekte verstanden haben, wird jetzt zu einem selektiv wahrnehmbaren Ding, wo Mauern Räume begrenzen. Wo Räume Böden haben, wo unter den Böden wieder Dinge sichtbar werden. Wir bekommen somit einen komplett neuen Einblick in unsere Daten, den wir ohne diese Methoden, die wir gemeinsam mit der Forensik und mit der Bildgebung hier entwickelt haben, niemals haben würden.

Was haben wir bisher für die Interpretation gemacht? Wir haben die einzelnen Scheiben genommen und haben sie quasi in Pläne hochgezeichnet, Tiefenscheibe für Tiefenscheibe. Wir sehen die Hypokaustum-Säulchen, dann den Fußbodenbereich und, und, und. Daraus haben wir dann mehr oder weniger ein kompliziertes 3-D-Modell erstellt. So schaute dann unsere finale Interpretation aus, etwas, was wir seit 2003 so machen.

Jetzt haben wir aber eine neue Möglichkeit, nämlich die Dinge, die wir händisch gezeichnet haben, in die Daten hineinzuprojizieren und zu untersuchen, wie das mit dem zusammenstimmt, was wir jetzt neu erkennen können. Sind unsere Interpretationen vom vorherigen Verfah-

ren gut genug oder gibt es hier noch weiteren Bedarf für Entwicklung? Man kann das dann kombiniert darstellen: so, wie wir das ursprünglich interpretiert haben und mehr oder weniger die Segmentierung aus dem 3-D-Modell, beruhend auf der händischen Experteninterpretation. Aber das ist natürlich nicht der Punkt. Wir wollen ja dazu gelangen, dass wir vom Computer die Mauern automatisch segmentiert bekommen, also die Kombination der verschiedenen Datensätze – die Interpretationszeichnung mit den daraus selektierten Mauerbereichen in der 3-D-Visualisierung, bis hin zu den daraus erstellten 3-D-Modellen der einzelnen Gebäude. So visualisierten wir etwa ein kleines Heiligtum der Feuerwehr, den großen Tempel oder das Modell mit dem Fußboden und dem Hypokaustum, das ist die Curia, der Ratssaal von Carnuntum, wo die Herren getagt haben. Das war quasi das politische Zentrum von Carnuntum. Sie wissen, es kann bei uns leicht einmal unter 20 Grad kalt werden, minus 20 Grad sind bei dem starken Wind in Carnuntum keine Seltenheit. Hier hat man es, zumindest im Ratssaal, durch diese Fußbodenheizung ganz kuschelig gehabt. Es geht jetzt wie gesagt noch einmal darum,

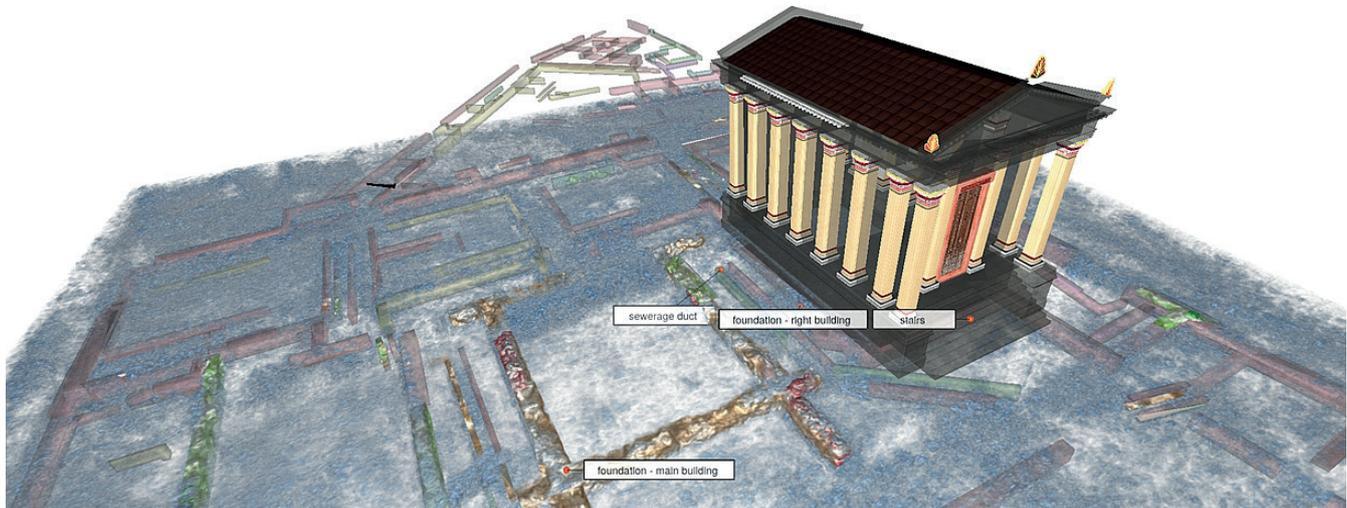


Abb.: Dreidimensionale Darstellung von Bodenradar-daten vom Forum des römischen Carnuntum, kombiniert mit virtuellen Rekonstruktionsmodellen. LBI Klinisch Forensische Bildgebung & LBI Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie.
Grafik: Alexander Bornik / 7reasons.

dass wir die Dinge nachvollziehbar machen. Durch die Visualisierungen der Daten, wo wir zwischen den Gebäuden einen Abwasserkanal haben, können wir in diesen Abwasserkanal quasi wirklich hineinkommen. Wir verwenden hier absichtlich künstliche Farben, um nicht den Anschein zu erwecken, es wären tatsächlich die Steine, die wir hier abbilden, aber vielleicht ist es tatsächlich so, dass wir bis in die Steine hineinkommen.

Kehren wir noch einmal zur Medizin zurück: Ein wesentlicher Bereich ist die Segmentierung, wo man bestimmte Bereiche markiert, dem System sagt: „Das ist jetzt ein Organ.“ Also etwa eine Leber. Und man sagt weiter: „Versuche jetzt, den Rest dieser Leber zu finden.“ Genau das Gleiche machen wir in der Archäologie, wir sagen: „Schau einmal, ob du irgendwelche Mauern findest. Und wenn du welche findest,

dann sagen wir: „Das hier sind typische Mauerstücke, schau, dass du sie jetzt automatisch findest.“ Und der Computer macht das. Er segmentiert quasi die Daten in Bezug auf die jeweilige Anfrage. Am Beispiel vom zentralen Fundament des Tempels bemerkt man, wir haben nicht mehr eine halbtransparente, schummrige Geschichte, sondern wir trauen uns jetzt, wirklich klare Linien zu zeichnen. Das heißt, es sind hier im

Prinzip Höhenschichtlinien in den 3-D-Daten, die eine Visualisierung von diesen Mauerstrukturen geben, die sich hier im Untergrund in ungefähr 1,1 bis 2,5 Meter Tiefe befinden. Und das ist wie gesagt ein Schritt vorwärts, der jetzt erst richtig exploriert werden kann. Wir haben in den letzten Monaten diese Verfahren gemeinsam mit den Kollegen entwickelt. Das Ludwig-Boltzmann-Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung wird trotz hervorragender Erfolge leider mit Ende des Jahres geschlossen. Die Kollegen wechseln nun in die Archäologie, und wir werden fleißig weiterarbeiten.

Die Kombination der Daten mit den virtuellen Rekonstruktionen, das ist das, was ich Ihnen hier näherbringen will. Sie soll helfen, dass die Nachvollziehbarkeit dessen, was wir tun, erhöht wird. Natürlich ist der nächste Schritt dann auch, entsprechende Modelle zu generieren, die interaktiv abfragbar sind, bei denen Datenbanken dahinter aufgerufen werden, die sagen, warum hier eine Säule steht, warum die Dachneigung so ist, warum hier oben Ziegel liegen und kein Stroh etc. Im besten Falle kann zum Beispiel so etwas als interaktives Informationssystem oder als multimediamäßige Informa-

tionsstation, in Carnuntum etwa im Besucherzentrum, aufgestellt werden und den Leuten Einblick geben in das, was eigentlich unsichtbar im Boden verborgen ist und wofür wir unsere nicht invasiven Methoden verwenden, um es wieder sichtbar zu machen. Danke vielmals für die Aufmerksamkeit.

HERBERT MATIS

Vielen herzlichen Dank. Sie sehen, wir decken da heute wirklich ein sehr, sehr breites Spektrum ab. Ich glaube, es war sehr eindrucksvoll für alle von uns zu sehen, welche vielfältigen und auch ganz neuen Zugangsweisen es in der Archäologie gibt. Es haben sich in den letzten 100 Jahren parallel zu den Methoden grundsätzlich auch die Fragestellungen verändert. Während am Anfang gewissermaßen die Schatzgräber, etwa Schliemann, standen, stehen heute Fragen der Rekonstruktion der einstigen Lebensumstände im Vordergrund: Wie lebten, wohnten, ernährten, vergnügten sich die Menschen damals, wie waren ihre Verwandtschaftsverhältnisse, woher kamen sie oder an welchen Krankheiten litten sie? Dies führt auch zu

anderen Ausgrabungsstrategien und zur Anwendung naturwissenschaftlicher Methoden, beispielsweise der C14-Datierung, Thermolumineszenz oder Gensequenzierung. Man sieht das auch in Ephesos, wenn man die beiden Hanghäuser vergleicht, dass heute ganz andere Fragestellungen im Vordergrund stehen als einst. Das heißt, die Fragen, die wir heute an die Archäologie stellen, aber auch die angewandten Methoden sind ganz andere als ehemals. Ich glaube, aus dem Vortrag ist gut hervorgegangen, dass es heute durch moderne Visualisierungsmethoden ermöglicht wird, auch größere Zusammenhänge aufzuzeigen.

PUBLIKUMSGAST

Das Interessante ist immer, dass sich eine beachtliche Schicht über dem befindet, was hier zurückgeblieben ist. Jetzt kann man natürlich sagen, im Laufe der Zeit werden die Steine anders verwertet, es wird Material weggetragen, vielleicht gibt es Verwitterungsprozesse, aber woher kommt diese Erde? Ich meine, sie kann nicht nur angeweht sein. Und plötzlich finde ich unter Metern von Erde diese Strukturen. Das ist ein

wenig so, als würde ich mit einem Rasierapparat hier über den Bart gehen, ein paar Stoppeln schauen halt hier und da heraus, aber der Großteil ist wieder verschwunden.

WOLFGANG NEUBAUER

Also diese Erde wächst nicht über Jahrhunderte immer höher und höher, das ist eine falsche Vorstellung. Hier in Carnuntum und ganz spezifisch hier beim Forum ist es so, dass dieser Bereich bereits bis in 70 Zentimeter Tiefe gepflügt wurde. Man hat aus großen Bereichen tatsächlich die Steine herausgeholt, das können wir aus den Daten ersehen. Man hat sie etwa zum Bau des Schlosses Petronell verwendet. Wir haben eigentlich bei fast allen Fundstellen in Österreich die Situation, dass die Sachen meistens schon im Pflugbereich liegen. Also sie sind einfach schon mittendrin in der Zerstörung, sind nicht abgedeckt von meterhohen Schichten von Erde, das kommt ganz selten vor. Wir haben jetzt eine einzige Fundstelle aus dem Neolithikum gefunden, bei der wir aufgrund des Flurnamens „Schwarze Erde“ gewusst haben, dass hier irgendwas anders ist. Schwarze Erde gibt

es nämlich eigentlich fast nirgends mehr im Weinviertel, da ist überall schon der Löss an der Oberfläche. Die Tschernoseme, Böden, die einmal einen oder 1,5 Meter Mächtigkeit aufwiesen, sind längst erodiert, sie sind verschwunden. An dieser Fundstelle mit bis heute erhaltenen Boden haben wir sofort einen Kreisgraben aus dem mittleren Neolithikum entdeckt.

Es gibt aber dann auch wieder Dinge wie in Haithabu, bei den wikingischen Siedlungen. Dort hat man über 120 Jahre Grabungen durchgeführt, wobei man systematische Sondierungslöcher immer quadrateweise abgeteuft hat, beispielsweise um zu sehen, wo die Grenze der Siedlung ist. Und da gibt es Bereiche, wo man bei den Grabungen gar nichts entdeckt hat, weil tatsächlich über ein Meter Sand vom Strand unten nach oben geblasen worden ist, und dieser Sand hat sich dann vor dem Wall, der als Windblockade wirkt, abgelagert. Die ersten Magnetmessungen haben gezeigt, dass das einer der Schwerpunkte der Siedlung war. Nur war er gut behütet – und das ist gut so, denn sonst hätten ihn die Archäologen vor 100 Jahren wahrscheinlich massiv geplündert.

PUBLIKUMSGAST

Danke. Gehe ich recht in der Annahme, dass diese virtuelle Archäologie in Österreich von Ihnen entwickelt wurde? Meine Frage bezieht sich auch auf Salisbury, also Stonehenge, wo Sie ja gemeinsam mit der University of Warwick, so glaube ich, diese Methoden angewendet haben. Und eine Zusatzfrage habe ich auch noch. Zum Beispiel bei den Londoner Renaissance-Theatern wie dem Globe Theatre, dem Swan und so weiter, da sind jetzt Wohnhäuser darauf und Keller: Besteht theoretisch eine Möglichkeit, mit irgendwelchen Methoden auch unter Keller zu blicken?

WOLFGANG NEUBAUER

Frage zwei zuerst: Das ist schwierig. Wir brauchen natürlich die freie Fläche, damit wir an das Objekt herankommen. Wenn wir nur kleine Ausschnitte messen können, dann ist das so, als würden Sie ein Röntgenbild eines Menschen haben und nur „kleine Adventsfenster“ öffnen. Dann werden sie den Menschen auch erst irgendwann zu Weihnachten erkennen, wenn alle Fenster offen sind. Das heißt, es ist ganz wesentlich,

dass wir hier zum gesamten Objekt Zugang haben. Es ist quasi unser Patient, der einzigartig ist und damit auch komplizierter als der Mensch. Jeder Mensch ist vom Prinzip her gleich aufgebaut. Herr Brasseur hat vielleicht ein bisschen weniger subkutane Fettschicht, als ich jetzt momentan habe, aber im Prinzip sind die Objekte alle gleich. Außer es fehlt Ihnen oder mir etwas. Aber bei der Archäologie ist es ganz anders. Dort ist jede einzelne Fundstelle einzigartig, jedes Theater etwa schaut anders aus. Jede Gladiatorenschule schaut anders aus, jede römische Villa schaut anders aus, jeder Kreisgraben schaut anders aus. Alle sind einzigartig, und das macht es natürlich schwierig, ich kann nicht einfach messen und sagen, das sei es jetzt. Wir haben gerade ein Projekt in Dänemark abgeschlossen. Da gibt es die Burgen von Harald Blauzahn, das ist der Namensgeber von Bluetooth. Er war ein Wikingerkönig, ungefähr um 980 herum, der bis kurz danach solche Burgen gebaut hat; Fyrkat, Trelleborg und so weiter. Die haben wir jetzt untersucht, weil wir eine einzige Burg gehabt haben, und zwar im Stadtgebiet in Odense. Und diese Wikingerburg Nonnebakken ist nur auf ganz kleinen Flächen zugäng-

lich. Ich habe gesagt, dass wir nicht in der Stadtsituation messen und dann sagen können, es sei hier innen bebaut gewesen oder auch nicht – wenn wir nicht wissen, wie es a priori ausschaut in solch einer Siedlung, in solch einer Burganlage. Wir haben alle anderen Burgen gemessen, um schlussendlich die Daten von denen, die zugänglich und klar und ersichtlich sind, zu nehmen und sie mit dem, was wir im Stadtgebiet haben, zu vergleichen. Dadurch konnten wir dann tatsächlich die Frage beantworten. Ja, auch Nonnebakken hatte hinten, im Inneren, die regelmäßige Bebauung, wie sie bei allen anderen Burgen vorkommt. Also es geht, aber es geht auch nicht, es ist schwierig. Zur ersten Frage: Wir haben in Stonehenge gemeinsam mit der University of Birmingham und Bradford und Saint Andrews gemessen. Wir haben 16 Quadratkilometer untersucht und damit also ungefähr den Bereich nördlich von Stonehenge bis zum Militärgelände abgedeckt. Fast die Hälfte des World-Heritage-Gebietes in Stonehenge ist militärisch genutzt. Da kann keiner hin, der Süden ist noch offen; das wäre eines meiner Lieblingsprojekte gewesen, denn der untere Teil, der spannende Teil, gehört Sting, dem Sänger von

„The Police“, wenn Sie die Band kennen. Also ich hätte gerne an die Tür geklopft und zu ihm gesagt: „Entschuldigung, dürfen wir bei Ihnen auf dem Feld messen?“ Und er hätte dann gesagt: „Na, kommen sie rein, trinken wir einen Kaffee.“ Aber es ist nicht so weit gekommen, wir haben früher aufgehört, denn wir haben 2016 noch eine Grabung gemacht, in Durrington Walls, dem Superhenge, ungefähr drei Kilometer nordöstlich von Stonehenge gelegen, fast 500 Meter im Durchmesser und deutlich älter als Stonehenge. Diese Ausgrabungen haben wir gemeinsam mit unseren Partnern und mit dem University College of London gemacht. Der Begriff der virtuellen Archäologie wurde erstmals in einer Publikation 1993 aufgebracht, durch einen Kollegen namens John Riley, der damals bei IBM beschäftigt war. Dort wurde gefordert, dass die Archäologie sich in Richtung einer virtuellen Archäologie entwickeln sollte. Er hat mehrere Projekte mit Archäologen durchgeführt und hat eben das Paper mit dem Titel „Towards a Virtual Archaeology“ geschrieben. Das hat mich damals schon sehr überzeugt. Ich habe auch Archäologie studiert, weil ich bei einer Ausstellung über Pfahlbauten in Zürich war. Da gab

es ein Pfahlfeld, wo sie am Computer einfach die Stecken hochgezogen haben und plötzlich hat man Häuser gesehen. Das ist das, wo man hin muss, das ist die Zukunft, da kann man viel machen.

Erfunden haben wir das in dem Sinne nicht, aber mit einem neuen Inhalt, mit einer neuen Definition belegt. Das heißt, es geht jetzt bei dem, was wir in virtueller Archäologie machen, nicht so sehr darum, dass wir anhand irgendwelcher virtuellen Modelle zeigen, wie etwas ausgeschaut hat, sondern unser Ziel ist, Visualisierungen zu entwickeln, um quasi all das, was im Untergrund ist, in die virtuelle Welt zu bringen – und um in der virtuellen Welt dann Werkzeuge verwenden zu können, die wir ebenfalls entwickeln, um die archäologischen Strukturen virtuell auszugraben. Also stellen Sie sich jetzt vor, wir haben diese Daten in einer virtuellen Brille. Und ich habe jetzt hier meine Special Tools, mit denen ich im Prinzip in das Datenvolumen eindringe. Dann fahre ich so darüber und segmentiere die Mauer. Nur habe ich nicht mehr die Zeit, dass ich mich mit jedem dieser Datensätze auseinandersetze. Wir haben in den letzten zehn Jahren im Ludwig-Boltzmann-Institut 65 Qua-

dratkilometer in ganz Europa gemessen. Das heißt, was wir jetzt tun, ist, Methoden zu entwickeln, damit wir es automatisieren können, damit also diese Daten automatisch segmentiert werden oder vorsegmentiert werden und somit die Arbeit der Archäologin und des Archäologen sich dann wirklich auf die Klassifizierung, auf die Bewertung und auf die Anordnung dieser Informationen beschränken kann und nicht der Vorgang, von den Daten zu Plänen zu kommen, das Wesentliche darstellt.

HERBERT MATIS

Herr Neubauer hat das auf sehr bescheidene Art beantwortet. Wir sprechen heute immer von Kompetenzzentren, und das Institut ist wirklich ein Kompetenzzentrum für die nicht-invasive Archäologie, sonst würde Herr Neubauer nicht überallhin eingeladen werden.

PUBLIKUMSGAST

Herr Neubauer, vielen Dank für Ihren guten Vortrag, es hat mich sehr gefreut. Da Sie wahrscheinlich auch immer an Geldgebern interessiert

sind, abgesehen von dem Herrn aus England, aber in England das Projekt abgeschlossen ist, ein Hinweis: Es handelt sich um das europäische Limes Projekt, Sie wissen, wovon ich rede, es wird von der EU finanziert. Die Universität in Wien ist da eingebunden und das Boltzmann-Institut nicht, soweit ich weiß. Und auf etwas Zweites wollte ich Sie auch noch hinweisen, falls Sie es nicht wissen. Vom Institut für Byzantinistik, auch von der Universität Wien, fand vor circa zwei Jahren in diesem Sitzungssaal ein internationales Symposium statt, und zwar dazu, was auch Sie angesprochen haben, nämlich Unsichtbares sichtbar zu machen. Es ging allerdings um Manuskripte, deren Schrift man mit dem Auge nicht mehr sehen kann, weil sie überschrieben worden sind oder mehrfach überschrieben worden sind. Papier war ja sowohl bei den Griechen als auch bei den Römern sehr kostbar. Und es waren Spezialinstitute, unter anderem aus Italien, die es mit bestimmten Untersuchungsmethoden so weit gebracht haben, Schrift – auch mehrfach überschriebene – sichtbar zu machen, obwohl da keine Farbe mehr war. Es gelang diesen Instituten also, etwas, was man nicht mehr sehen kann oder von dem man glaubte, es nicht mehr

sehen zu können, mit bestimmten Werkzeugen wieder zugänglich zu machen. Vielen Dank.

HERBERT MATIS

Ich danke für die Wortmeldungen und möchte noch einmal herzlich zu Ihrem Vortrag gratulieren. Es war uns bei der Planung dieses Symposiums bewusst, dass man, wenn man über moderne Visualisierungsmethoden und ihre Anwendungsbereiche spricht, wahrscheinlich eine ganze Woche locker bespielen könnte. Wir haben eher versucht, Ausschnitte zu finden, die prototypisch für ganze Bereiche stehen, aber ich danke für den Hinweis. Es ist natürlich ganz wichtig, auch Palimpseste im Nachhinein wieder entschlüsseln zu können, die Schrift, die mehrfach überschrieben und ausgelöscht wurde, wieder sichtbar zu machen, also das ist sicherlich auch ein sehr interessanter Anwendungsbereich.

Wir kommen zum letzten Vortrag. Ich darf Herrn Kollegen Franz Kerschbaum herzlich in unserer Mitte begrüßen. Vom ganz Kleinen bewegen wir uns jetzt sozusagen in das ganz Große, vom nicht invasiven Blick in den Boden in die uner-

messlichen Weiten des Universums. Herr Kerschbaum ist Professor für beobachtende Astrophysik am Institut für Astrophysik der Universität Wien und Begründer der Österreichischen Gesellschaft für Astronomie und Astrophysik. Er ist darüber hinaus als Berater und Experte bei der ESA (European Space Agency), bei der ESO (European Southern Observatory) und der IAU (International Astronomical Union) engagiert. Seine zentralen Forschungsgebiete umfassen vor allem die Spätstadien der Sternenentwicklung. Auch die Entwicklung astronomischer Instrumente ist ihm ein Anliegen. Was mich besonders anspricht, ist, dass er auch wissenschaftshistorische Ambitionen hat. Gerade in seinem Fach ist das ja auch eine sehr spannende Geschichte. Wir haben heute das Glück, dass durch die Entwicklung leistungsfähiger Weltraumteleskope, Hubble und Herschel etwa, raumgestützte Observatorien uns einen neuen Blick in das Universum ermöglichen und damit auch in die Entstehungsgeschichte des Universums. Wir sind schon sehr gespannt auf Ihren Vortrag.

DAS UNSICHTBARE UNIVERSUM

FRANZ KERSCHBAUM

Danke schön für die freundliche Einleitung. Ich schließe fast nahtlos an. Ich war vor circa einem Monat in Oberbozen. Auf dem Ritten hatten wir eine Sommerschule. Und was macht man dort? Man macht mit den Studierenden einen kurzen Ausflug in das Museum des Mannes vom Hauslabjoch, des Similaun-Mannes vulgo Ötzi. Ich war beeindruckt von seinen großartigen Werkzeugen und Instrumenten. Dann sind wir mit der Seilbahn wieder hinaufgefahren. Und nächstens bin ich dann vom Vortragssaal, der da oben auf dem Ritten ist, immer durch eine Waldstraße gegangen, hin zu meinem Quartier. Ich habe mir vorgestellt, was der Ötzi sich damals, vor 5.000 Jahren, gedacht hat, als er – so wie ich in diesem Moment – zum Sternenhimmel hinaufgeschaut hat. Ich kenne ja die einschlägige Literatur, wahrschein-

lich ist er da unter einem Spätsommerhimmel marschiert, kurz bevor seine letzte Stunde gekommen ist. Also ich habe da hinaufgeschaut und mir gedacht, dass die Menschen sich damals, in Ötzis Fall an der Grenze zwischen der Jungsteinzeit und der Bronzezeit, sicher genauso Gedanken gemacht haben wie wir heute, was da oben passiert.

Sie waren damals natürlich an freisichtige Informationen gebunden. Was haben sie sich gedacht, was haben sie damit verbunden? Wir haben aus dieser Zeit ja typischerweise keine schriftlichen Zeugnisse, finden aber Artefakte, Zeichnungen. Offensichtlich haben sie sehr konkrete Vorstellungen gehabt. Sie haben den Himmel sehr genau beobachtet, dies beweisen unter anderem Höhlenmalereien in Lascaux, die sehr weit zurückreichen, oder die



Franz Kerschbaum ist Professor am Institut für Astrophysik der Universität Wien. Er entwickelt Instrumente für die Erforschung des Kosmos, er untersucht das Leben der Sterne, macht Weltraumexperimente und denkt über die Milliarden Jahre alte Geschichte des Universums nach.

Himmelscheibe von Nebra. Davon kann man mit heutiger Forschung mit hoher Plausibilität ableiten, was dargestellt wird. In diesem konkreten Fall, und es gibt auch andere Beispiele, spricht sehr viel dafür, dass die Menschen, die damals damit gearbeitet haben, in bestimmten Details den offenen Sternenhaufen der Plejaden dargestellt haben. Das wird in den meisten wissenschaftlichen Arbeiten so assoziiert, obwohl wir keine schriftlichen Zeugnisse haben. Sie haben den Himmel aber auch sehr oft schon mit Unsichtbarem konnotiert, wie etwa mit göttlichem Wirken. Ein Beispiel aus Ägypten ist das für mich wohl schönste Familienporträt der Antike: Echnaton und Nofretete mit auf ihrem Schoß herumturnenden Kindern, unter den schützenden, nährenden Strahlen der Sonne, des Sonnengottes. Oder ein babylonischer Grenzstein, auf dem wir wiederum sehr schön die Venus, den Mond und die Sonne dargestellt haben und auch die Ihnen heute bekannten Tierkreiszeichen. All dies ist also sicher oft göttlich oder zumindest religiös konnotiert. Natürlich hat die Astronomie seit Anbeginn der Zeit den Kult unterstützt, die Zeit gegliedert. Die regelmäßigen Phasen des Mondes, der

Lauf der Sonne und der Lauf der Sterne haben Orientierung ermöglicht. In einer Zeit, die vielleicht sehr viel unverstandenes Chaos gewesen ist, hat der Himmel Halt gegeben. Man hat sich beispielsweise beim Begraben seiner Toten an den Himmelsrichtungen orientiert. Frühe Zeichen von Kultur, etwa Stonehenge oder Kreisgrabenanlagen, waren ja heute schon Thema. Das sind natürlich wunderbare Beispiele. Aber das hat sich auch weit bis in unsere Zeit weitergezogen, etwa durch die sogenannte Ostung der Kirchen, dies ist im Prinzip das Gleiche wie die Orientierungen in prähistorischen Kultstätten. Man orientierte die Kirche so, dass sie zum Patroziniumsfest der jeweiligen Kirche in die Richtung zeigt, in der die Sonne aufgeht. Dies steht also in einer ganz langen Tradition und zeigt, wie stark die Beobachtung des sichtbaren Himmels mit mehr verbunden worden ist, mit Unsichtbarem, mit Bedeutung. Einen großen Sprung hat die Astronomie natürlich gemacht, als der Himmel plötzlich „irdisch“ beziehungsweise „physisch“ geworden ist. In dem Moment, wo wir Hilfsmittel verwenden konnten, in dem Moment, wo wir Fernrohre verwenden konnten, wurde vorher Unsichtbares objek-

tiv sichtbar und messbar. Als Thomas Harriot oder Galileo Galilei so um 1610 erstmals ein Fernrohr verwendet haben, um den Mond zu untersuchen, wurde plötzlich eine neue Welt sichtbar. Der Mond, vorher fern der Erde, wurde bis dahin als etwas komplett Unphysisches beschrieben. Aristoteles hat die Himmelsphären als fünftes Element, die Quintessentia, gesehen. Das alles wurde nun plötzlich sehr irdisch beschrieben. Galileo Galilei hat den Schatten der Mondberge verwendet, um ihre Höhe zu bestimmen, hat also Methoden, die man normalerweise auf der Erde benutzt, auf die himmlischen Sphären angewendet. Jesuiten, wie zum Beispiel Christoph Scheiner, haben die neu entdeckten Sonnenflecken systematisch studiert und festgestellt, dass dieser Körper der Sonne, der entweder vergöttlicht wurde oder als Sinnbild des Reinen, des Göttlichen gesehen worden ist – wir haben es ja bei Echnaton gesehen –, nun plötzlich so etwas wie einen Makel hat, Makulae zeigt. Diese Entwicklung hat das Weltall, das uns umgibt, plötzlich sehr viel physischer greifbar gemacht. Sichtbar gemachtes, vorher Unsichtbares hat damals meist sehr überrascht und so wirklich zu einer Revolution in unserem Weltbild geführt.

Vor 400 Jahren wurde also das Fernrohr erstmals verwendet. Es hat uns ermöglicht, Himmelskörper wie den Mond oder die Sonne detailliert zu studieren. Heutzutage sind wir etwa hunderttausendmal schärfer und genauer in unseren Bildern. Die heutigen Interferometer, wie das Very Large Telescope Interferometer in Chile, diese kombinierten Teleskope, ermöglichen uns erstmals den Blick auf Sternoberflächen, also nicht auf unsere Sonne, sondern andere, ferne Sonnen. Wir haben heute die Qualität des galileischen Fernrohrs für ferne Sterne und nicht wie damals nur für unsere Sonne. Einer meiner Kollegen, Kollege Hron, sitzt hier im Publikum. Er ist maßgeblich an den aktuellen Forschungen beteiligt. Erstmals können wir Sternoberflächen beim Brodeln, bei Konvektionsbewegungen zuschauen und so die Physik, die auf der Sternoberfläche abläuft, detailliert studieren. Die heutigen technischen Mittel ermöglichen uns nun, 400 Jahre nach Galilei, den Schritt von der Sonne zu den Sternen zu machen. Unser großer Feind in der beobachtenden Astronomie ist natürlich die turbulente Erdatmosphäre. Wir haben heute beim Vortrag von Kollegin Schmidt-Erfurth zur Augenmedizin schon davon gehört, dass

adaptive Optik bei scharfen Bildern in der Augenheilkunde eine ganz große Rolle spielt. Ein astronomisches Beispiel: Das wabernde Bild des Mondes wird unscharf gemacht durch Turbulenzerscheinungen, durch Dichteschwankungen in der Erdatmosphäre. Heute können wir diese Turbulenz computergestützt genauer untersuchen. Es kommt ursprünglich ungestörtes Sternenlicht in einer ebenen Wellenfront aus dem Universum, die ist vielleicht Jahrtausende lang, Jahrmillionen lang unterwegs. Sie tritt ein in die Erdatmosphäre, dort wird diese ebene Wellenfront verbogen. Sie wird dann abgelenkt und erzeugt letztlich ein unscharfes Bild im Brennpunkt unserer großen Teleskope. Wenn wir wüssten, wie die Erdatmosphäre diese Wellenfront verbiegt, dann könnten wir, wenn wir Spiegel hätten, die wir passend gegengleich verformen könnten, wieder scharfe Bilder rekonstruieren. Die gleiche Methode wird eben auch verwendet, um durch organische Materialien wie im Auge ungestörte Bilder, etwa von der Netzhaut, aufzunehmen, die an die Schärfe herankommen, wie sie vorläge, wenn man das Auge wegpräparieren würde und man nur die Netzhaut hätte. Genau

die gleiche Methode verwenden wir heute in der Astronomie. Dort müssen wir das natürlich zeitlich variabel machen. Das ermöglicht uns, Bilder zu machen, die die Effekte der Erdatmosphäre komplett kompensieren und vom Erdboden aus quasi „Weltraumqualität“ liefern. Solche korrigierten Aufnahmen machen wir zum Beispiel mit einem Teleskop, dessen Spiegel einen Durchmesser von acht Metern hat. Daneben sind vier Lasereinheiten, die in der Nacht einen künstlichen Lichtpunkt in der Hochatmosphäre erzeugen, und aus der Verformung des Lichtpunkts kann man rekonstruieren, was die turbulente Atmosphäre dem Licht angetan hat. Im Vergleich sieht man, wie sich das Bild verbessert, wenn man das sogenannte Adaptive-Optik-System einschaltet. Man kann heute also mithilfe moderner adaptiver Verfahren die negativen Einflüsse der Erdatmosphäre korrigieren und so scharfe Bilder machen, als wäre das Teleskop im Weltall. Das heißt, die in der Öffentlichkeit noch sehr verbreitete Meinung, dass man nur mit einem Weltraumteleskop ganz scharfe Bilder herstellen kann, ist heute so nicht mehr gültig. Wir können vom Erdboden aus sogar schärfere Bilder machen, weil wir dort

auch größere Teleskope haben als im Weltall. Die Erdatmosphäre macht aber auch andere Probleme. Darauf werde ich noch zu sprechen kommen.

Zurück zur Zeit von Galileo Galilei. Damals haben etwa Simon Marius und Galilei nicht nur Mond und Sonne genau beobachtet, sondern sie haben sich auch die anderen hellen Punkte am Himmel detailliert vorgenommen, allen voran Jupiter, diesen oft hellsten Planeten in der Nacht. Und Galilei und Marius haben ziemlich gleichzeitig bemerkt, dass neben dem Jupiter einige kleine Sterne zu sehen sind. Und diese Sterne haben sich zu ihrer großen Überraschung innerhalb weniger Stunden relativ zum Jupiter bewegt. Beide haben ziemlich gleichzeitig – es hat deswegen noch einen Prioritätenstreit gegeben – bemerkt, dass ganz offensichtlich Jupiter von vier Sternen, die man bald als Monde erkannte, umkreist wird. Galileo Galilei, ein sehr geschäftstüchtiger Mann, hat diese Objekte umgehend nach den Medici benennen wollen. Simon Marius war eher altphilologisch orientiert und hat sie Io, Europa, Ganymed und Callisto genannt, von denen jeder weiß, dass der lüsterne Jupiter sie begehrte. Seine Namensgebung ver-

wenden wir noch heute für die vier größten Jupitermonde.

Was bedeutet es nun, diese Sterne, diese Monde neben Jupiter zu finden? Kepler, der ja insbesondere in Korrespondenz mit Galilei gestanden ist, hat wie wenige andere die Konsequenzen daraus gezogen. Er hat ob dieser Erkenntnisse geradezu Angst empfunden und schreibt zum Beispiel in „De Stella Nova“ 1606: „Die Vorstellung des unendlichen Alls mit unendlich vielen Welten führt, ich weiß nicht wie, einen geheimen Schauer mit sich.“ Also er hat Angst davor gehabt, dass wir nicht einzigartig sind, sondern dass es da oben mehr gibt. Und insbesondere bezogen auf die Entdeckung der Jupitermonde hat er in „Dissertatio cum Nuncio Sidereo“ 1610 geschrieben: „Wenn Du, Galilei, entdeckt hättest, dass um einen der Fixsterne Planeten kreisen, hätten auf mich bereits Ketten und Kerker gewartet bei den unzähligen Welten Brunos oder noch viel eher, ein Exil in jener Unendlichkeit. Für den Augenblick hast du mich aber von der großen Angst erlöst.“ Was bedeutet das? Er hat gehört, und zwar bevor er „Sidereus Nuncius“ von Galilei gelesen hat, es würden um Jupiter oder um einen Stern, das war nicht klar, andere Sterne kreisen. Und

das wäre ein großer Bruch in der Tradition gewesen. Seit der Antike dominierte ja die Grundannahme, nur die Erde könne Zentrum solcher Bewegungen sein. Auf einmal diese Entdeckung, plötzlich ist etwas anderes im Zentrum. Wenn das aber nun ein Stern gewesen wäre, dann hätte das ja bedeutet, dass es viele Sterne da oben gibt, die auch Planeten haben. Folglich wäre unsere Sonne nicht einmalig, es wäre möglich, dass unser ganzes Sonnensystem vielleicht unendlich oft im Universum realisiert ist. Davor hat er Angst gehabt. Er hat dann – zum Glück für ihn, sonst hätte er sich noch weiter fürchten müssen – bald gehört, dass nicht ein Stern um einen anderen Stern kreist, sondern Monde um den Jupiter kreisen. Dann hat sein Weltbild wieder gepasst, und das war gleichzeitig eine sehr gute Bestätigung des heliozentrischen Weltbildes.

Nun, Kepler war sehr weitsichtig in diesen Erkenntnissen. Er hat auch vorhergesagt, insbesondere in seinen Rudolfinischen Tafeln, dass die Planeten Merkur und Venus die Erde auf der Innenbahn regelmäßig überholen. Sie haben ja einen kürzeren Weg und sind schneller unterwegs. Dies kann, wenn auch die jeweiligen Bahnebenen zusammenpassen, dazu

führen, dass die Planeten Merkur oder Venus vor der Sonnenscheibe vorüberziehen. Kepler hat das schon für 1631 vorausgesagt, und es wurde dann wiederholt auch beobachtet. Früh hat er so erkannt, dass das ein weiteres Indiz für das heliozentrische Weltbild ist.

In den Jahrhunderten darauf war dies dann die beste Methode, um die Distanzen zu den Planeten zu bestimmen und um die Dimensionen des Sonnensystems festzulegen. Das war eine sehr wichtige Sache. Heute bedeutet diese Methode des Planetentransits aber noch sehr viel mehr. Heute „sehen“ wir damit etwas ganz und gar Unsichtbares. Auch andere Sterne können nämlich so einen Transit erleiden. Stellen Sie sich vor, Sie haben einen Stern, und vor dem Stern fliegt sein Planet vorbei. Wenn wir genau von der Seite auf diese Ebene schauen, dann wird natürlich der Planet einen Teil des Sternenlichtes abdecken. Wenn wir also die Helligkeit des Sterns ganz genau messen, wird die Helligkeit in dem Moment, wo der Planet vorüberzieht, ein bisschen geringer werden. Wir brauchen den Planeten also gar nicht sehen. Das ist genau die Methode, mit der wir in den letzten Jahren Tausende von Planeten gefunden haben, die

um andere Sterne kreisen. Ohne sie zu sehen, also eigentlich unsichtbar, werden Planeten entdeckt, indem wir die Helligkeit ihres Muttergestirnes ganz genau messen. Und man kann dann nicht nur messen, wie lange sie für einen Umlauf brauchen. Man kann in weiterer Folge auch die Masse des Planeten ableiten, und auch den Durchmesser des Planeten kann man ableiten, wenn man den Durchmesser des Sterns kennt, denn der Prozentsatz der Einsenkung des Helligkeitseinbruchs hat natürlich damit zu tun, wie groß der Planet relativ zu seinem Stern ist. Daraus folgt wiederum die Dichte des Planeten. Aus dieser Beobachtung eines unsichtbaren Planeten können wir darauf schließen, ob es ein Gesteinsplanet, ein Wasserplanet oder ein Gasplanet ist. Wir können also schon relativ weitreichende Schlüsse ziehen. Und ich bitte Sie heute alle, uns die Daumen zu halten: Wir verwenden ja eine Reihe von Weltraumteleskopen und bald, am 17. Dezember 2020, starten wir das nächste, den CHEOPS-Satelliten. Hier haben wir gemeinsam mit unseren Grazer Kollegen die Onboard-Intelligenz entwickelt, ein Computersystem, das diesen Satelliten steuert und die Beobachtung durchführt. Damit wollen

wir bekannte erdähnliche Planeten ganz besonders genau charakterisieren. Es ist also spannend, dass diese Angst Keplers, dass es nämlich da oben unendlich viele andere Welten gibt, andere Sonnen, eigentlich wahr geworden ist. Und sie alle gehorchen Keplers Gesetzen. Ich lese den Satz noch einmal vor: „Wenn Du, Galilei, entdeckt hättest, dass um einen der Fixsterne Planeten kreisen, hätten auf mich bereits Ketten und Kerker gewartet.“ Also Kerker ist heute zum Glück nicht mehr die Folge solcher Entdeckungen, aber Kepler hat eigentlich ganz genau erkannt, wie weit diese Entdeckung führen kann. Heute kennen wir schon 4.000 Planetensysteme mit vielen großen und kleinen Planeten; einen bunten Zoo von Planetensystemen, den wir detailliert studieren können. Die nächste Schlüsselentdeckung nach dem Fernrohr war der Schritt aus dem sichtbaren Bereich hinaus. Wir haben heute schon im Vortrag über Röntgenmethoden gehört, dass die Röntgenstrahlung eine eher zufällige Entdeckung war. Schon 1800 wurde aber die erste unsichtbare Strahlung entdeckt, und zwar durch Wilhelm Herschel. Er hat sich dafür interessiert, aus welchen Bereichen des Sonnenspektrums die Wärme stammt.

Dazu hat er mit einem Thermometer relativ einfach gemessen, ob sich die Wärme im Sonnenlicht im blauen, gelben, grünen oder roten Bereich findet. Dabei ist aber ganz zufällig mehr passiert. Er hat das Thermometer kurz im Lichtspektrum liegen lassen, die Sonne ist weitergezogen – und so auch das Lichtspektrum. Als er wieder zurückgekommen ist, hat er gesehen, dass in dem Bereich des Spektrums, wo gar kein Licht mehr hingefallen ist, jenseits des roten Bereichs, das Thermometer eine besonders hohe Temperatur anzeigte. Irgendetwas Unsichtbares von der Sonne musste dafür verantwortlich sein. Er hat dann als Wissenschaftler natürlich untersucht, ob das Unsichtbare ähnliche Eigenschaften wie das sichtbare Licht hat. Er hat versucht, es mit einem Spiegel abzulenken, Blenden zu verwenden. Es hat sich herausgestellt, dass infrarotes Licht, die Wärmestrahlung, wie wir es heute nennen, die gleichen optischen Eigenschaften hat wie das sichtbare Licht. Es war dies das erste Mal, dass etwas Unsichtbares nicht spukhaft und nicht Magie war, sondern dass man damit wirklich Experimente machen können. Anfangs konnte man nur die Sonne messen. In der Mitte des 19. Jahrhunderts war es

schon möglich, die Temperatur des Mondes abzuschätzen: mit einem Teleskop auf Teneriffa, in der Nähe des El Teide, in der Caldera ganz hoch oben, wo die Luft besonders transparent ist.

Heute ist die Infrarottechnik in allen Bereichen verbreitet. Ich habe zum Beispiel gezeigt, wie es aussieht, wenn „coole“ und „heiße“ Tänzerinnen und Tänzer beim Wiener Ball der Wissenschaften in der Disco tanzen. Dort haben wir heuer, vom FWF unterstützt, die Leute im Infraroten überwacht. Und man hat sehr schön gesehen, welche Energien da frei werden.

Das ist natürlich nur eine unterhaltende Anwendung. Ich brauche nicht zu erzählen, wie wichtig die Thermografie heute ist und wie wichtig sie natürlich auch für meinen eigenen Forschungsbereich ist. Wie unterschiedlich, wie fremd diese Welt ist, sieht man etwa beim Orion, dem schönsten Sternbild des Winterhimmels: Der Himmelsjäger im sichtbaren Bereich des Lichts betrachtet sieht aber, wenn Sie das Ganze im Infraroten anschauen, ganz anders aus, geradezu komplementär. Sie würden hier nie vermuten, dass da große Bereiche durch Infrarotstrahlung dominiert sind, wo Sie im

Visuellen nichts davon sehen. Das sind massive Sternentstehungsgebiete, Staub und Gaswolken, wo quasi täglich ein Stern neu aufleuchtet. Das sieht man erst in der infraroten Strahlung, und darum war es natürlich wichtig, leistungsfähige Weltraumteleskope in diesem Bereich zu entwickeln, und auch da hat Österreich in den letzten Jahren intensiv mitgearbeitet: am bisher größten Weltraumteleskop überhaupt, Herschel, ein 3,5-Meter-Teleskop, noch größer als Hubble mit seinem 2,5 Meter großen Spiegel.

Damit haben wir gesehen, wie Sterne an ihrem Lebensende große Staubmassen an ihre Umgebung abgeben und – wir haben heute schon von der Molekülspektroskopie gehört – uns genau angeschaut, welche Moleküle wegfliegen, welcher Typ Staub wegfliegt. Wir haben zum Beispiel Silikate festgestellt, wir haben gesehen, dass Wasser und andere Moleküle von den Sternen an die Umgebung abgegeben werden. Wenn Sie im Sommer spazieren waren, dann haben Sie vielleicht die Milchstraße über sich gesehen, dieses Band, das am Sommerhimmel im Zenit dominiert. Die Milchstraße, dieses vertraute Bild, wenn wir fernab der Großstadt den Himmel betrachten,



Abb.: „Säulen der Schöpfung“, Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) https://de.wikipedia.org/wiki/Pillars_of_Creation#/media/File:Pillars_of_creation_2014_HST_WFC3-UVIS_full-res_denoised.jpg

schaut ganz anders aus, wenn wir es im Infraroten aufnehmen, im Radiobereich, im Röntgen, im Gammabereich: da gibt es keine Ähnlichkeit, geradezu komplementär sind oft die verschiedenen Sichtweisen des Himmels. Dort, wo es im sichtbaren Bereich besonders finster ist oder auch im Röntgenbereich, leuchtet es im Gammabereich oder im Infrarotbereich besonders stark. Da blicken wir geradezu durch die Staubwolken, die im sichtbaren Bereich den Blick auf das Zentrum versperren. Das heißt, wir brauchen all diese Wellenlängen, um das Universum – und ich verwende dieses unsägliche Wort bewusst – ganzheitlich zu verstehen, in diesem Fall ist der Begriff wirklich angebracht. Ein weiteres Beispiel für das, was ich vorher gerade besprochen habe, für sterbende Sterne, sind etwa die Staubwolken, die gleich einem Rauchwölkchen an die Umgebung abgegeben werden. Hier haben wir uns nur ein Molekül angeschaut, das zweithäufigste Molekül im Universum, das Kohlenmonoxid; das wichtigste ist das H_2 und das zweithäufigste ist schon das Kohlenmonoxid. Kohlenmonoxid ist ein sehr gut detektierbares Molekül, das von den Sternen wegfliegt. Im konkreten Fall haben wir das im Mikrowellen-

bereich gemacht, bei 230 Gigahertz, mit einem Radiointerferometer auf 5.000 Meter Höhe, im Hochland Chiles. Und weil wir uns da einzelne Moleküllinien anschauen, können wir sogar ein tomografisches Bild dieser Sternenhüllen, dieses Materials, das vom Stern wegfliegt, rekonstruieren, mit ganz ähnlichen Methoden, wie wir sie vorher schon im medizinischen Bereich gesehen haben.

Hier können wir einen Scan durch die Blase, die den Stern verlässt, betrachten. Wir schneiden hier, wie etwa durch den Körper eines Menschen, sukzessive hindurch. Wir erkennen so eine kugelförmige Blase und in der Mitte den Stern. Auf diese Weise können wir feststellen, welches Material mit welcher Geschwindigkeit in welcher Menge von den Sternen wegfliegt. Durch dieses Material wird die Umgebung der Sterne angereichert. Warum ist das interessant? Diese sterbenden Sterne produzieren schwere chemische Elemente. Am Anfang des Universums gab es nur Wasserstoff, Helium und ein bisschen Lithium. Alles, was für uns wichtig ist – alle Elemente, die zentral für uns sind, allen voran natürlich Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff oder Silizium –, kommt aus

dem Sterninneren. Dort sind diese Elemente produziert worden, und sie werden genau durch solche Massenverlustprozesse in der Umgebung verbreitet. Die erzeugten und verteilten schwereren chemischen Elemente werden dann in Sterne der nächsten Generation eingebaut, und diese können dann Planetensysteme damit bauen, zum Beispiel mit Siliziumoxid, Silikaten, um eine Erdkruste zu produzieren und darauf dann eben Sauerstoff und Kohlenstoff zu haben und Wasser draufzubringen. Wir beobachten bei den Sternen, wie all das an die Umgebung abgegeben wird.

Die Andromeda-Galaxie, die nächste große Milchstraße in unserer Nachbarschaft, circa zwei Millionen Lichtjahre von uns entfernt, schaut im sichtbaren Bereich so vertraut aus. Manche von Ihnen haben das Bild vielleicht schon gesehen. Wenn wir jetzt andere Wellenlängenbereiche verwenden, sehen wir eine ganz andere Galaxie. Da, wo dunkle Regionen sind, dunkle Ringe, die dort durchziehen, sehen wir beim komplementären Blick ein helles Leuchten: Das ist der Staub, der im Sichtbaren den Blick auf die Sterne verbirgt. Er leuchtet im Infraroten selbst. Oder zu einem anderen Bereich, dem Röntgenbereich: Sterne,

die knapp vor ihrem Tode stehen, das sind beispielsweise Röntgendoppelsterne, sie kreisen ganz knapp umeinander und tauschen Materie aus, leuchten ganz hell im Röntgenbereich. Sie sind vor allem im inneren Bereich der Galaxie zu finden. Erst wenn Sie diese verschiedenen Wellenlängen kombinieren, wird es möglich, zu verstehen, wie so ein großes System funktioniert. Wo werden Sterne geboren, wie entwickeln sie sich, wie sterben sie? Das als Funktion der Zeit und noch zusätzlich die Dimension der chemischen Analyse und wir sehen, wie die Zusammensetzungen sich verändern – auch das wurde schon in einem wunderbaren Beispiel aus der Botanik erwähnt, wo in der Raman-Spektroskopie gezeigt worden ist, wie man heute räumlich aufgelöst sagen kann, dass es dort jene chemische Zusammensetzung gibt. Genau das machen wir auch in der Astronomie, wir haben auch für jedes Bildpixel quasi ein Spektrum. Und wir können auch sagen, das Material hat diese oder jene Geschwindigkeit. So können wir ein chemisches und dynamisches Gesamtbild der Galaxien erstellen. Wenn wir also heute von Weltraumteleskopen sprechen, dann sprechen wir nicht nur vom Hubble-Teleskop, sondern von

einer ganzen Armada, die nicht nur den sichtbaren Bereich, sondern viele andere Spektralbereiche abdeckt – von den Gammastrahlen über die Röntgenstrahlung, Infrarot, Mikrowellen bis in den Radiobereich. Und überall gewinnen wir einzigartige Informationen über das Universum. Ich darf dazu anmerken, dass wir mittlerweile in Österreich an etwa 50 Prozent all dieser Weltraummissionen beteiligt sind. Österreich, dieses kleine Land, hat sich also in den letzten eineinhalb Jahrzehnten sehr fit gemacht, mit den entwickelten Technologien in Zusammenarbeit mehrerer Institutionen im Land wirklich an vorderster Front mitforschen zu können.

Nun möchte ich nicht Schluss machen bei der elektromagnetischen Strahlung. Wir haben heutzutage noch mehr Möglichkeiten, wir beobachten nicht nur Licht, sondern zum Beispiel auch kosmische Strahlung. Hochenergetische Teilchen, die aus dem Universum zur Erde kommen und uns Kunde geben von den Prozessen im Universum. Eines von vielen Beispielen sind die Neutrinos. Bei der Kernfusion im Inneren unserer Sonne werden Neutrinos frei. Früher konnte man sagen, die Sternfusion im Sterninneren sei eine

unbewiesene Hypothese, es gebe ja kein direktes Indiz dafür. Wir wissen zwar, wie viel Energie von der Sonne kommt, aber direkt hineinschauen konnten wir nicht. Heute können wir Neutrinos dafür verwenden. Die Neutrinos fliegen als einzige Teilchen ja relativ ungehindert durch den Sonnenkörper nach draußen. Auf der Erde können wir dann diese Neutrinos detektieren und schauen, ob sie zu den Kernreaktionen, zu den Fusionsprozessen im Sonneninneren, wie wir sie uns vorstellen, passen.

Das ist nur ein Beispiel dafür, dass wir heutzutage viele Bestimmungsstücke brauchen: verschiedene Wellenlängen des Lichtes, aber auch Teilchen. Und noch exotischer, es wurde heute ja schon einmal ganz kurz in der Einleitung erwähnt: Mittlerweile können wir die Raumzeit selbst als Informationsquelle verwenden. Gravitationswellen entstehen, wenn sich große Massen sehr schnell bewegen, und das passiert eben bei einem raschen Umkreisen oder gar bei einem Verschmelzen zweier massiver Körper wie dem von Doppelsternen. Dann kann es zu einer Erschütterung der Raumzeit kommen. Diese Erschütterung breitet sich so wie jedes Signal im Universum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Sie kommt dann bei uns

auf der Erde als Gravitationswelle an, das sind im Prinzip ganz kleine Längenänderungen, die wir mit hochempfindlichen Geräten messen können und die uns wiederum Aufschlüsse über die hochenergetischen Vorgänge im Universum liefern können, von denen wir mit anderen Methoden eigentlich direkt nichts sehen können. Wenn zwei schwarze Löcher miteinander verschmelzen, dann wird zuerst einmal nicht so viel elektromagnetische Strahlung frei. Das ist aber vor allem durch genau diesen Vorgang beobachtbar, und auch das zeigt, wie vielfältig wir uns heute an diese unsichtbaren Prozesse im Universum annähern.

Zu guter Letzt: Der Blick zurück in die Geschichte unseres Universums ist ein Blick in das Unsichtbare. Da wird es jetzt „besonders unsichtbar“, um das Wort noch einmal zu steigern, wenn wir uns in Erinnerung rufen, dass in den 1960er-Jahren relativ zufällig durch Arno Penzias und Robert Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung beobachtet worden ist, die ja vorher schon von mehreren Wissenschaftlern in den 1940er-, 1950er-Jahren vorhergesagt wurde. Dieses Nachleuchten des Urknalls, um es so auszudrücken, ist nicht nur eine allumfassende diffuse Strahlung,

sondern sie ist auch fein strukturiert, und wir lernen daraus, wie das ganz frühe Universum aufgebaut war. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ja das Licht von etwa 400.000 Jahren nach dem Urknall, als das Universum erstmals durchsichtig geworden ist. Diese Strahlung sehen wir in alle Richtungen. Wenn wir 13,8 Milliarden Jahre zurückschauen, kann man daraus ableiten, wie schnell sich beispielsweise erste Galaxien gebildet haben, wie sich das Universum ausgedehnt hat. Man kann damit auch ableiten, woraus das Universum selbst zusammengesetzt ist. Da kommen wir – und das ist jetzt das „besonders Unsichtbare“ – zu einer ganz eigenartigen, irritierenden Erkenntnis. Wir wissen heute, dass die sichtbare Materie circa nur ein Prozent der Gesamtmasse im Universum ausmacht. Etwa fünf Prozent ist baryonische Materie, also Materie, die wir gut verstehen, mit der wir die normale Physik betreiben. Die restlichen 95 Prozent verstehen wir eigentlich nicht. Diese, Sie haben davon schon gehört, dunkle Materie und die dunkle Energie lassen sich nur ganz indirekt durch Messungen erschließen. Eigentlich beide Komponenten, dunkle Materie und dunkle Energie, offenbaren sich

durch Dynamik im Universum. Die dunkle Materie durch die Rotation von Galaxien und die dunkle Energie aus der Änderung der Ausdehnungsgeschwindigkeit des ganzen Universums. Von beidem sehen wir nichts, wir haben auch keine Physik, die es direkt beschreiben könnte.

Das sind ganz große Fragen, die wir uns noch weiter stellen müssen. Hier gibt es zwar schon einige miteinander konkurrierende Modellvorstellungen, aber wir haben noch sehr viel zu tun und dürfen vielleicht noch so manche Überraschung erwarten. Ich möchte aber jetzt nicht so negativ enden. Dieses eine Prozent, das auf uns so direkt wirkt, dass wir es gut beschreiben können, ist auch das wichtige Prozent des Universums, weil die dunkle Energie und die dunkle Materie bei uns lokal zum Glück eine sehr geringe Rolle spielen. Das bringt mich zurück unter den Abendhimmel. Wenn ich als Astronom beim Beobachten bin, wenn ich über das Universum nachdenke, bietet es sich mir ja „sichtbar“ dar. Dann sehe ich die Sterne, die da oben sind, und ich gewinne aus diesen Sternen Inspiration zum Nachdenken über das Universum, aber – und das muss ich ganz ehrlich sagen – vielleicht noch mehr zum

Nachdenken über mich selbst. Danke schön.

HERBERT MATIS

Auch hier sind Fragen wieder hochwillkommen, danke sehr, Herr Kerschbaum.

PUBLIKUMSGAST

Eine Bemerkung zu diesem Vortrag: Du hast ja die adaptive Optik erwähnt: Um die Korrekturen zu machen, bedarf es ja sehr kluger und schneller Algorithmen. Und diese Algorithmen werden am Radon Institut in Linz entwickelt. Die Linzer sind da wirklich weltweit führend!

FRANZ KERSCHBAUM

Ich glaube, das kann man nur unterstreichen. Das gilt auch für sehr viele technische Entwicklungen, die wir heute verwenden. Wir haben eigentlich bei all unseren Vorträgen gesehen, dass es da ganz viele Überlappungen gibt. Die adaptive Optik wird dort und da verwendet, die Optik und die Stellglieder, mit

denen man die Optik manipulieren kann. Die Rekonstruktionsverfahren, bei denen wir komplexe Datensätze, Data-Cubes, gemeinsam behandeln, um dann solche Bilder rekonstruieren zu können, haben wir mit vielen anderen Disziplinen gemein. Man muss sagen, dass wir in den jeweiligen Fachdisziplinen davon profitieren, insbesondere von der Mathematik und von der Informatik, die uns da ganz großartige Möglichkeiten in die Hand geben. Da gibt es eine starke Wechselbeziehung; die Anwendung bei uns und die Entwicklung der Grundlagen stehen miteinander sehr stark im Austausch.

PUBLIKUMSGAST

Sie haben uns gezeigt, dass man Helium, Wasserstoff und Kohlenmonoxid gut finden und schön darstellen kann. Was uns natürlich interessiert: Wo sind Aminosäuren und all das, was Leben charakterisiert?

FRANZ KERSCHBAUM

Na ja, so weit sind wir noch nicht, dass wir so komplexe Moleküle gesehen haben, einige andere, etwa

Alkohole, schon. Natürlich versuchen wir auch, komplexere Dinge zu sehen. Wir sind bei der Infrarotspektroskopie darauf angewiesen, häufige Dinge zu beobachten. Die Sterne sind weit weg, die Sterne sind schwach, wir haben wenige Photonen bei der Auswertung. Wir schauen uns die Dinge an, wie sie sind, und da ist es so, dass wir beispielsweise im Infraroten großteils zwei, drei Moleküle der häufigsten chemischen Elemente betrachten, wie zum Beispiel Siliziumoxide, Titanoxid, Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ozon oder Methan. Aus denen kann man aber auch – und die Frage nach dem Leben schwingt in Ihrer Frage mit – natürlich schon Rückschlüsse zumindest auf die Bewohnbarkeit von Körpern ziehen.

Wir sind jetzt eigentlich gerade an der Schwelle der Beobachtbarkeit von Planetenatmosphären. Meine eigene Gruppe in Wien arbeitet an einem Weltraumteleskop, an Ariel. Es wird 2028 fliegen und einen Infrarotspektrografen haben, mit dem wir ferne Planeten, also nicht Planeten in unserem Sonnensystem, werden messen können, um zu prüfen, wie viel Methan, Ozon, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid oder Wasser dort vorkommt. Aus dem Vergleich der

Stärken dieser Moleküle und den Temperaturen sowie dem Druck der Planeten können wir herausfinden, ob zum Beispiel eine sogenannte Nichtgleichgewichtschemie nötig ist, um diese Verhältnisse zu erzeugen. Auf der Erde wird dieses Gleichgewicht zwischen den Molekülen, die ich gerade angesprochen habe, wesentlich beeinflusst – durch Reisfelder oder das Wiederkäuen der Kühe. Die Menge des Methans oder des CO₂ wird durch einen biologisch aktiven Planeten verändert. Wenn ich in circa 15 Jahren hierherkomme oder woanders einen Vortrag halte und keine Antwort zur Bewohnbarkeit von Planeten habe, dann haben wir etwas ziemlich falsch gemacht.

PUBLIKUMSGAST

Mich würde interessieren, wie man mit Ihren Techniken schwarze Löcher untersuchen kann.

FRANZ KERSCHBAUM

Indirekt, das Neuste waren etwa jetzt gerade die Gravitationswellen. Nichts kann das Universum so erschüttern, wie wenn zwei schwarze

Löcher miteinander verschmelzen. Es ist eine großartige Methode, die Gravitation zu benutzen, um schwarze Löcher zu untersuchen. Was ist eine andere Methode? Schwarze Löcher lenken auch auf friedlichere Weise Sterne auf andere Bahnen. Beispielsweise das schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße, das circa vier Millionen Sonnenmassen hat. Es zwingt Sterne in der Umgebung auf enge Bahnen, und aus diesen Bahnen kann man auf die Masse des Lochs rückschließen. Die direkte Methode basiert darauf, dass schwarze Löcher, wenn sie von Materie umgeben sind, dazu führen, dass diese Materie angezogen wird, sich eine Scheibe um sie bildet, diese Scheibe durch innere Reibung Drehimpuls verliert und das Material in das schwarze Loch hineinbeschleunigt wird. Dabei wird Röntgenstrahlung frei, und wenn man das genau modelliert, kann man auch lernen, was die schwarzen Löcher über die Zeit hinweg so verfüttern und wie sie dadurch auch schwerer werden.

Sie haben es ja alle in den Medien gesehen, dieses erste Bild eines schwarzen Lochs. Was man hier sieht, ist aber eigentlich das gravitativ verformte Bild dieser Akkretionsregion. Das schwarze Loch ist darauf nicht

direkt sichtbar, weil es selbst nicht leuchtet, aber das Material, das um dieses massive schwarze Loch im Zentrum einer anderen Galaxie beobachtet wird, leuchtet im Radiobereich. Diese schwarze Region im hellen Ring ist nicht das schwarze Loch selbst, aber sie ist ein sehr gutes Indiz dafür, dass da eines ist. Und man kann damit auch viel lernen.

RESÜMEE

HERBERT MATIS

Ich möchte jetzt ein kurzes Resümee ziehen. Allerdings nicht, indem ich jetzt noch einmal nacherzähle, was uns diese sechs Vorträge heute gebracht haben. Mir ist am heutigen Tag etwas aufgefallen, und zwar: Es gibt in unserer Zeit ein extremes Zusammenwirken verschiedenster Disziplinen, Methoden und Techniken, welches die Grundlagenforschung und die anwendungsorientierte Wissenschaft auszeichnet. Alle diese Bereiche, zu denen natürlich auch die Ingenieurwissenschaften, vor allem Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik wichtige Beiträge liefern, gepaart mit Instrumenten, die aus den anwendungsnäheren Gebieten kommen, erlauben es, völlig neue Erkenntnisse zu gewinnen. Wir können damit die durch unsere natürliche Sinnesausstattung, das Auge, gezogenen Grenzen der Visualisierung wesentlich erweitern, und gleichzeitig ist es möglich, die großen Datenmengen, die mithilfe dieser neuen

„Sinne“ anfallen, durch den Einsatz der Informatik und Mathematik auswertbar zu machen, sodass ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn daraus entsteht. Dieses kollektive Lernen der Menschheit führt zu einer Wissensexplosion, die unser Leben in der Zukunft gravierend verändern wird. Damit bedanke ich mich noch einmal bei allen Vortragenden und Diskussionsteilnehmern.

IMPRESSUM

Herausgeber:

Präsidium der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, 1010 Wien

www.oeaw.ac.at

Herausgeber des Bandes:

Univ.-Prof. Dr. Georg Brasseur

FOTOS

Cover: © Andrey VP/Shutterstock.com

Seite 5: Foto: ÖAW, Sepp Dreissinger

Seite 7: Foto: privat

Seite 11: Foto: MedUniWien/Matern

Seite 27: Foto: privat

Seite 39: Foto: privat

Seite 51: Foto: privat

Seite 63: Foto: privat

REDAKTION

Ingrid Weichselbaum

Alle Rechte vorbehalten

Copyright © 2020

Die inhaltliche Verantwortung und das Copyright für die jeweiligen Beiträge liegen bei den einzelnen Autorinnen und Autoren.



9 783700 188056 >

ISBN 978-3-7001-8805-6



WWW.OEAW.AC.AT