

AKADEMIE IM DIALOG | 5

ZUKUNFTSWEISENDE WISSENSCHAFTLICHE
HERAUSFORDERUNGEN

ZUKUNFTSWEISENDE WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

KURZVORTRÄGE AN DER ÖAW AM 18. DEZEMBER 2015

INHALT

KURZVORTRÄGE

JULIA BUDKA Ludwig-Maximilians-Universität München Die Zukunft der Vergangenheit – Perspektiven der ägyptischen Archäologie	5
HEINZ FASSMANN ÖAW Risiken und Chancen des österreichischen Umgangs mit der Flüchtlingssituation	11
HANS IRSCHIK Johannes-Kepler-Universität Linz BERNHARD JAKOBY Johannes-Kepler-Universität Linz Industrie 4.0: Wissenschaftliche Herausforderungen hinter dem Hype	17
ULRICH SCHUBERT Technische Universität Wien Solar-Driven Chemistry	25
PETER ZOLLER Universität Innsbruck WOLFGANG LECHNER Universität Innsbruck Potenzielle Querverbindungen der Grundlagenforschung in der Quantenphysik zu Anwendung und Industrie	31
KURT ZATLOUKAL Medizinische Universität Graz HELMUT DENK Medizinische Universität Graz Zukunftsaspekte morphologischer (bildgebender) Diagnostik in der Medizin	37

DIE ZUKUNFT DER VERGANGENHEIT – PERSPEKTIVEN DER ÄGYPTISCHEN ARCHÄOLOGIE

JULIA BUDKA

Wie kann man sich die ägyptische Archäologie in zehn Jahren vorstellen, was für Entwicklungen sind zu erwarten, welche sind zu wünschen? Archäologie ist wie kaum ein anderes geisteswissenschaftliches Fach stark auf Interdisziplinarität ausgerichtet – eine Ausgrabung bringt die unterschiedlichsten Spezialisten aus verschiedenen Disziplinen zusammen, generiert Massen an Daten (Stichwort: Digitalisierung) und muss sich Fragen zum Kulturerhalt und Tourismus stellen. Hier werden beispielhaft die wichtigsten Perspektiven zur Archäologie in Ägypten und im Sudan zur Diskussion gestellt.

Da für Ägyptolog(inn)en und Archäolog(inn)en außerhalb von Projekt- und Budgetplanungen nur selten die Zukunft eine Rolle spielt, ist das Skizzieren entsprechender Perspektiven im Rahmen eines Kurzvortrags eine ziemliche Herausforderung. Ich habe mir deshalb erlaubt, die Zukunft der ägyptischen Archäologie in drei mögliche Szenarien aufzubereiten.

Obwohl ich selbst eine unverbesserbliche Optimistin bin, wollen wir mit Szenario 1 beginnen: Es ist leider nicht ausgeschlossen, dass sich die Arbeitsbedingungen aufgrund der politischen Lage in Ägypten – wirtschaftlicher Einbruch seit der Revo-

lution, vermehrt Attentate und Flugunglücke, kaum Tourismus – und auch im Sudan – hier seien nur geplante Staudammprojekte im Norden des Landes und ein aktueller politischer Spagat der Regierung zwischen Saudi-Arabien und Katar erwähnt – noch weiter verschlechtern. Es ist also durchaus denkbar, dass keine Feldarbeiten in diesen Regionen mehr möglich sein werden.

Was würde das für uns Archäologen bedeuten? Nun, arbeitslos wären wir keinesfalls, wir hätten extrem viel Material in Museen und Archiven aufzuarbeiten. Und hier sind durchaus neue Erkenntnisse zu erwarten – durch neue Detailstudien, frische

Fragestellungen und auch naturwissenschaftliche Materialanalysen, die dann sicher vermehrt zum Einsatz kämen.

Kommen wir zu Szenario 2, das ungleich rosiger erscheint: Durch neue Entdeckungen im Grab des Tutanchamun kommt es zu einem Boom der ägyptischen Archäologie, der durch ein Wiedererwachen des Tourismus auch mit dazu beiträgt, dass sich die politische Lage im Land stabilisiert.¹ Seien wir auch mal so unglaublich optimistisch, dass keine Staudämme im Sudan gebaut werden. Das würde, denke ich, dennoch dazu führen, dass bislang wenig beachtete Plätze und Objekte wie z. B. Vorhöfe von Gräbern oder die Peripherie von bereits bekannten Anlagen in den Blick genommen werden. Ich bin auch davon überzeugt, dass man in Zukunft stärker auf Siedlungen und nichtelitäre Relikte fokussieren wird.

D. h., für mich sind die aktuellen Arbeiten im Grab des Tutanchamun, unabhängig von den konkreten

Resultaten, tatsächlich zukunftsweisend – neue Methoden werden neue Erkenntnisse im Umfeld schon untersuchter Monumente liefern. Zahlreiche andere Beispiele, wie z. B. die aktuellen Grabungsarbeiten unseres korrespondierenden Mitgliedes im Ausland Harco Willems in Deir el-Bersheh, stützen meine Annahme.²

Doch wir können weitere Gedankenspiele durchführen: Szenario 3 würde bedeuten, dass die Situation in Ägypten leider stagniert, und sich dadurch ein neuer Fokus der ägyptischen Archäologie aufs Nachbarland, auf den Sudan entwickelt. Nehmen wir mal an, die Staudämme im Sudan werden gebaut, dann ist zudem mit einem großen Aufgebot an Notgrabungen zu rechnen. Dies würde dazu führen, dass neue, bislang unbekannt Gebiete erschlossen werden. Und natürlich komplett neue Daten gewonnen werden – z. B. zu ländlichen Siedlungen, aber auch zu prähistorischen Fundplätzen. In diesem Fall hätten wir dann fürs Fach tatsächliche Neuerkenntnisse durch eine Ausweitung des Untersuchungsgebiets zu verbuchen.

Nun, angesichts der vorgegebenen Knappheit dieses Beitrags kann ich nicht im Detail auf das „Wahrscheinlichste“ aller Szenarien eingehen. Mir geht es aber darum, dass ich denke, der gemeinsame Nenner, unabhängig von äußeren Faktoren – auf die die Archäologie so stark angewiesen ist –, ist darin zu finden, dass die ägyptische Archäologie sich aktuell weit weg von Pyramiden und klassischen Tempelgrabungen entwickelt hat. Unser Kenntnisstand ist so gut, dass es nun essenziell ist, sich den offenen Fragen, den Details, den bislang vernachlässigten Stätten zu widmen, seien dies nun Siedlungen rund um die Pyramiden, einfache Architekturformen entlang von Karawanenwegen oder Vorhöfe von Gräbern, Hinterhöfe von Tempelbauten, die genaue Abfolge von Bauphasen oder detaillierte Veränderungen im Keramikkorpus.

Schon jetzt erlauben neue Dokumentationstechniken eben genau diese Fokussierung auf Details – sei dies ein Laserscan, Orthofotos, Structure From Motion oder sonstiges – sie unterstützen uns, das große Ganze greifbar zu machen. Und hier erwarte ich eine Fortsetzung des Booms; gerade Structure from Motion und Orthofotos werden sich auch in unserem

¹ Angesichts der neuen Erkenntnisse im Frühjahr 2016, die die erhofften „verborgenen Kammern“ im Grab des Tutanchamun unwahrscheinlich machen, ist Szenario 2 mittlerweile noch weniger denkbar als noch im Dezember 2015.

² Vgl. die Projekthomepage <http://www.day-rabarsha.com/>.

Fachgebiet als Standarddokumentationstechniken etablieren. Erwähnt werden muss auch, dass schon jetzt ein Grabungsteam in Ägypten oder im Sudan ein internationales Team aus verschiedenen Spezialisten ist – wir haben natürlich klassische ausgebildete Ägyptologen in unseren Reihen, aber auch Spezialisten für Archäometrie im Allgemeinen, für Petrografie oder Mikromorphologie im Speziellen und für vieles mehr. Bohrungen, Ausgrabungen, Surveys und Vermessungen bringen unterschiedliche Experten zusammen. Physische Anthropologie und die Bearbeitung von Tierknochen, botanischen Resten, Pigmenten oder Inhaltsresten in Gefäßen sind absolut essenziell für jede Grabung. Neuerdings werden auch verschiedene chemische Methoden eingesetzt, wie z. B. instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse oder auch Strontium-Isotopenanalysen.³ Schon jetzt ist die ägyptische/nubische Archäologie näher an die anderen Archäologien gerückt – wir sind nicht mehr ausschließlich auf Hieroglyphen, Pyramiden und Gold

³ Vgl. hierzu mein eigenes START und ERC Projekt AcrossBorders, <http://acrossborders.oeaw.ac.at/>.

fokussierte Exoten, sondern wenden Landschaftsarchäologie, Mikromorphologie und Stratigrafie genauso an wie beispielsweise unsere prähistorischen Kollegen oder vorderasiatische Archäologen.

Und diese Entwicklung soll und wird so weitergehen, davon bin ich überzeugt – diese neuen Techniken, wie beispielsweise mikromorphologische Studien zur Nutzung eines Wohnhauses, ermöglichen natürlich auch frische Fragestellungen. All diese neuen Techniken sorgen aber auch dafür, dass unsere Feldarbeiten eine riesige Fülle an Daten produzieren – das stellt natürlich einen entsprechenden Anspruch an Archivierung und Digitalisierung. Diese Entwicklung wird ebenfalls weitergehen und der Umgang mit Daten wird die Archäologie in den nächsten Jahren schwer beschäftigen.⁴

Ich hatte es bei meinen verschiedenen Szenarien schon anklingen lassen – Archäologie ist nie eine unpolitische Angelegenheit – und dies trifft besonders für Archäologie an Krisenorten zu. Wir Archäolog(inn)

⁴ Vgl. hierzu die an der ÖAW angesiedelte Forschergruppe Digital Archaeology, <http://www.oeaw.ac.at/digital-archaeology.html>.

en sind hier äußeren und politischen Faktoren ausgesetzt, aber auch dazu eingeladen, aktiv Verantwortung zu übernehmen. Die Spanne ist hier natürlich riesig – ich erwähne aus aktuellem Anlass nur zwei Beispiele: Rettungsgrabungen im Sudan, wo wir in Dörfern arbeiteten, deren Bewohner aus der Region vertrieben wurden und alles verloren haben; oder aber das traurige Beispiel, was alles im Sommer 2015 in Palmyra passiert ist, mit dem erschreckenden Höhepunkt des Mordes an Khaled al-Asaad, dem langjährigen Ausgräber der Fundstätte.

Ich möchte zum Abschluss deshalb nochmals betonen, dass ich die aktuellen Herausforderungen, die nun eben auch die Zukunft des Faches prägen werden, darin sehe, wie wir als „Community“ mit der aktuellen politischen Situation und der akuten Bedrohung von Denkmälern und ganzen Landstrichen umgehen werden.⁵

⁵ Vgl. hierzu das „Vienna Statement 2016“, das anlässlich der internationalen Konferenz ICAANE im April 2016 in Wien an der ÖAW verfasst wurde; zum Text siehe http://www.oeaw.ac.at/fileadmin/user_upload/veranstaltungen/2016/ICAANE_Allgemein/Vienna_Statement_Online.pdf.

An die zunehmende Zahl an Surveys und Grabungen mit modernen digitalen Dokumentationsmethoden knüpft sich eine weitere Aufgabe: Wir dürfen nicht vergessen, diese Daten nicht nur in Massen zu sammeln, sondern auch innerhalb des Fachs lesbar und auswertbar zu halten – dies führt zu einem aktuellen Nachwuchsproblem, das dringend in Angriff genommen werden muss. Die heutige Ausbildung für ägyptische Archäologen hat ein anderes Anforderungsprofil als noch vor wenigen Jahrzehnten.

Ich bin insgesamt sehr optimistisch, was die Zukunft unseres Faches betrifft – ich denke, wir sind in einem Zeitalter angekommen, wo wir auf den großartigen Entdeckungen von Pionieren wie Sir Flinders Petrie, Ludwig Borchardt, Howard Carter oder auch dem wirklichen Mitglied der ÖAW Manfred Bietak aufbauen können, um gezielt nach fehlenden Puzzlesteinen zu suchen. Es wird in Zukunft noch verstärkt zu einer Neuorientierung auf Fragestellungen rund um Prozesse und Strukturen in der altägyptischen und den nubischen Kulturen kommen – die Verknüpfung, Vernetzung von Daten, die Peripherie ist das, was uns weiterbringen wird.

In der extrem guten Quellenlage der ägyptischen und nubischen Archäologie liegt hohes Potenzial und die Möglichkeit der Detailfragestellungen ist auch von Wert über Fachgrenzen hinaus. Dieses Potenzial gilt es in den nächsten Jahren und Jahrzehnten voll auszuschöpfen.

JULIA BUDKA

Derzeitige Position

- Universitätsprofessorin für Ägyptische Archäologie und Kunstgeschichte an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München

Arbeitsschwerpunkte

- Archäologie des 2. und 1. Jahrtausends v. Chr., insbesondere Keramik und Siedlungsarchäologie sowie Analysen von Bestattungsformen und Ritualen

Ausbildung

- 2007 Promotion in Wien im Fach Ägyptologie
- 1995–2000 Studium der Ägyptologie und Klassische Archäologie an der Universität Wien

Werdegang

- Seit 2015 Universitätsprofessorin für Ägyptische Archäologie und Kunstgeschichte an der LMU München
- Seit 2015 Mitglied im Young Center (CASY) der LMU München
- 2014–2016 Mitglied des Akademierats der ÖAW
- Seit 2014 Mitglied der Jungen Akademie der ÖAW
- 2012 START-Preis des Wissenschaftsfonds
- 2012 ERC Starting Grant
- 2003 DOC-Stipendiatin der ÖAW

RISIKEN UND CHANCEN DES ÖSTERREICHISCHEN UMGANGS MIT DER FLÜCHTLINGSITUATION

HEINZ FASSMANN

Lassen Sie mich das komplexe Thema „Risiken und Chancen des österreichischen Umgangs mit der Flüchtlingssituation“ in acht Punkten und maximal zehn Minuten abhandeln, wohl wissend, dass dazu mehr als zehn Minuten notwendig wären. Ich halte diesen Vortrag auch stellvertretend für Andre Gingrich, der den Vorschlag eingebracht hat, aber heute nicht hier sein kann, und selbstverständlich in eigener Verantwortung. Meine erste Bemerkung:

1. Das Jahr 2015 war für die Europäische Union ein besonderes Jahr. Rund 1,32 Millionen Anträge von Asylwerbern aus dem Nahen Osten,

dem nördlichen Afrika, den Kaukasusrepubliken, und dem indischen Subkontinent sind gestellt worden. Der deutsche Innenminister de Maizière hat nach Beseitigung der Doppelregistrierungen die Zahl der in Deutschland anwesenden Asylwerber mit rund 890.000 festgelegt, von denen 820.000 geblieben sind. Im Vergleich zu 2014 ist das mehr als eine Verdoppelung.

In Österreich liegt die offizielle Zahl der 2015 registrierten Asylwerber bei 88.300. Im Vergleich zum Zeitraum 2014 ist das in etwa eine Verdreifachung. Das einwohnermäßig etwas größere Schweden hat gegen Jahresende 2015 nach der Aufnahme

von rund 190.000 Asylwerbern ein-gestehen müssen, dass das Land eine Atempause benötigt. Es hat seine liberale Asylpolitik vorerst sistiert, Grenzkontrollen eingeführt und die großzügigen Versorgungsstandards zurückgefahren. Schwedens Regierungschef Löfven warnte: „Wir sind am Limit.“

2. Diese große Zahl hat die Bevölkerung und die Politik verunsichert, insbesondere aber auch die Steigerungs-raten und die Befürchtung, dass dieses hohe Ausmaß nicht nur ein einmaliges Event des Jahres 2015 bleibt, sondern sich fortsetzen wird. Einen wesentlichen Beitrag zur Ver-

unsicherung leisteten aber auch die medial vermittelten Bilder. Man sah Menschengruppen, wie sie die Autobahn Budapest-Wien entlangmarschierten, ungeordnet und sich selbst gefährdend. Man konnte österreichische Polizisten beobachten, die versuchten, den Grenzübertritt einer Flüchtlingsgruppe in Kärnten zu stoppen, und als unbeachtete Randfiguren zur Seite geschoben wurden. Und es wurden die Bilder eines Kleintransporters mit erstickten Menschen veröffentlicht, der unbeachtet und unkontrolliert auf der A4 abgestellt wurde. Diese und viele andere Bilder dokumentierten unglaubliches humanitäres Leid, aber auch staatlichen Kontrollverlust, und sie verunsicherten die Bevölkerung nachhaltig. 2015 soll sich nicht mehr wiederholen, so der allgemeine und auch politische Tenor.

3. Angesichts der Bilder und der noch immer mangelhaften Daten- und Faktenlage muss die Wissenschaft kühlen Kopf bewahren und zur Besonnenheit aufrufen. Wir müssen sehen, dass nicht alle Asylwerber einen dauerhaften Aufenthaltstitel bekommen werden. Wir müssen ebenfalls berücksichtigen, dass die Rückführung der abgelehnten Asyl-

werber wieder einsetzen wird. Nicht in die Kriegsgebiete des Nahen Ostens, denn das untersagt die Genfer Flüchtlingskonvention aufgrund des Non-refoulement-Gebots, aber in die Staaten des Westbalkan, vielleicht wieder nach Pakistan oder in die Kaukasusrepubliken. Dennoch wird der Anstieg der Asylberechtigten und der subsidiär Schutzberechtigten einen Rekordwert in der Zweiten Republik darstellen und für ein Bevölkerungswachstum sorgen, welches deutlich über dem langjährigen Durchschnitt liegt. Ein außergewöhnliches Jahr ist verkraftbar, viele solcher außergewöhnlichen Jahre würden Österreich einen Wachstumsstress bereiten, denn die Zahl der Arbeitsplätze und der neu gebauten Wohnungen ist zu gering, um in so einem Fall den Anstieg der Arbeitslosigkeit und eine neue Wohnungsnot zu verhindern.

4. Wenn die EU eine Union wäre, dann wäre das sogenannte Flüchtlingsproblem kein Problem, sondern sofort lösbar. Darauf hat Peter Michael Lingens zu Recht hingewiesen. Aber die EU ist keine solidarisch handelnde Union. Sie ist auch keine Union, die ihr eigenes Regelwerk einhält. Seit der Ratstagung von

Tampere (1999) haben EU-Kommission und die Mitgliedstaaten ein gemeinsames Regelwerk zur Steuerung der Zuwanderung von Flüchtlingen ausgearbeitet. Es besteht aus klugen Richtlinien, die Mindeststandards bei der Unterbringung festlegen, Standards des Asylverfahrens definieren und eine Klärung der Zuständigkeit für die Abwicklung von Asylverfahren gebracht haben. Als Bürger bin ich angetan von gemeinsamen europäischen Regelwerken, die uns Ordnung und Sicherheit bringen, und wir alle wurden überrascht und auch enttäuscht, wie leicht dieses Regelwerk von den Nationalstaaten negiert werden konnte, obwohl die Nationalstaaten vorher an der Verhandlung beteiligt waren und das Regelwerk auch unterschrieben hatten. „Free choice“ des Asyllandes war plötzlich angesagt. Flüchtlinge wurden weitergereicht, und manche Transitstaaten waren stolz darauf, wie elegant und effizient sie die Flüchtlingsfrage bewältigt haben, nämlich mit einem organisierten Bustransfer von einer Grenze zur anderen.

5. Wenn die EU eine Union wäre – ich wiederhole mich –, dann wäre das sogenannte Flüchtlingsproblem kein Problem, sondern sofort lösbar.

Ein gemeinsames Europa mit über 500 Millionen Einwohnern könnte die registrierten 1,32 Millionen Geflüchteten des Jahres 2015 leicht verkraften. Das wären nicht mehr als 0,3% der Wohnbevölkerung der EU. Und auch die für 2016 und 2017 zu erwartenden Flüchtlinge könnten in einem solidarisch handelnden und demografisch alternden Europa gut aufgenommen werden. Aber Europa handelt nicht solidarisch. Die Nationalstaaten schränken ihre Horizonte ein, und die Renationalisierung eines früher gemeinschaftlich angedachten Asylsystems ist nicht zu übersehen. Ein Wettbewerb der Unfreundlichkeit setzt inzwischen ein, denn die „free choice“ des Asyllandes konnte einfach nicht gut gehen. Wer eins und eins zusammenzählen kann, der hat dies auch schon vorhergesagt. Die Dublin-Verordnung zu Grabe zu tragen, ohne eine Alternative dafür zu haben, ist und war kurzichtig.

6. Ich kehre zu meinem Titel und meinem Ausgangspunkt zurück: Risiken oder Chancen im Zusammenhang mit der Flüchtlingswanderung. Die Antwort ist ambivalent: Beides ist gegeben. Die Geflüchteten sind überwiegend junge Männer, die als Pioniere kommen und ihre

Familien nachholen. Das Durchschnittsalter der in Österreich lebenden Afghanen (Stichtag 1. 1. 2016; Statistik Austria) liegt bei 22,9 Jahren, bei den syrischen Staatsbürgern bei 24,8 Jahren. Der Frauenanteil bei den Afghanen beträgt 29%, bei den Syrern 33%. Darin liegt unzweifelhaft eine Chance, denn Zuwanderung ist eben für eine alternde und tendenziell schrumpfende Bevölkerung vorteilhaft, aber auch ein Risiko, weil unbeschäftigte junge Männer, ohne Familie und Rückhalt, individuell oder als Gruppe, bestehende Normen in bestimmten Situationen negieren. Die Silvesternacht in Köln 2015/16 hat das drastisch unter Beweis gestellt. Aber dennoch: Weil die Geflüchteten jung sind, hat die aufnehmende Gesellschaft gute Chancen, über Qualifizierungsmaßnahmen mittel- und längerfristig eine Integration in den Arbeitsmarkt zu erreichen. Aber Qualifizierungsmaßnahmen sind notwendig, denn die bisher vorliegenden Ergebnisse der amtlichen Statistik belegen nicht das, was vorteilhaft wäre, nämlich eine Qualifikation, die einen unmittelbaren Arbeitsmarktzugang ermöglichen würde. Dabei ist sicherlich zu differenzieren, denn Flüchtlinge aus Syrien sind deutlich besser qualifi-

ziert als jene aus dem Irak und diese wiederum sind qualifizierter als afghanische Asylwerber.

Die Integration, der Weg bis zur Integration in den österreichischen Arbeitsmarkt wird aber für viele Flüchtlinge zweifellos ein weiter sein. Auch deshalb, weil die Asylberechtigten heute auf einen Arbeitsmarkt treffen, der durch steigende Arbeitslosigkeit gekennzeichnet ist. Das wirtschaftliche Wachstum müsste deutlich größer sein, wenn die Ausweitung des Arbeitskräfteangebots durch Asylberechtigte nicht nur zu einem Anstieg der Arbeitslosen führen soll. Und 10.000 Arbeitslose mehr, das ist eine einfache Multiplikation, bedeuten rund 100 Millionen Euro Mehrausgaben im Bereich der bedarfsorientierten Mindestsicherung, und das jährlich. Damit ist die verteilungspolitische Diskussion über Sozialtransfers an Personen, die noch nichts oder nur kleine Beiträge in den sozialen Wohlfahrtsstaat eingezahlt haben, aber dafür langfristig Leistungen beziehen, vorprogrammiert. Offene Grenzen und ein sozialer Wohlfahrtsstaat schließen sich leider und zwangsläufig aus.

7. Mitte November 2015 haben Bundesminister Sebastian Kurz und ich

gemeinsam einen 50-Punkte-Plan zur Integration der Asylberechtigten vorgestellt. Der fünfzigste Punkt mahnt wissenschaftliche Begleitforschung ein. Einfache Fragen können nicht schlüssig beantwortet werden. Was sind die Lebensperspektiven von Asylwerbern und anerkannten Flüchtlingen? Was sind ihre Erwartungen, ihre Einstellungen zu Staat und Gesellschaft? Was sind ihre realen und ihre perspektivischen Beziehungen zu ihren Herkunftsländern? Und vielleicht noch wichtiger, welche religiös-kulturellen Vorstellungen sind dominant, und wie kompatibel sind diese religiös-kulturellen Vorstellungen zu jenen einer modernen, aufgeklärten Gesellschaft? Führt die Zuwanderung der mehrheitlich muslimischen Zuwanderer zu einem Mehr an traditionellem Religionsverständnis, oder haben die Geflohenen schlichtweg genug davon und wählen einen anderen, einen säkularen Weg? Die Gesellschaft, die Politik und die Wissenschaft selbst haben viele wichtige Fragen, aber bis dato noch immer wenige gesicherte Antworten.

8. Ich schließe daher mit einer Ankündigung. Einige Institute der ÖAW haben sich zu einem Netz-

werk zusammengeschlossen, um gemeinsam Forschung in diesem Bereich zu betreiben. Sie legen unterschiedliche Kompetenzen zusammen, um wissenschaftliche Qualität zu gewährleisten. Das stimmt mich zuversichtlich, denn die Akademie kann auf exzellente und spezialisierte Fachkompetenz zurückgreifen. Das Institut für Iranistik, das Institut für Sozialanthropologie und mein eigenes Institut für Stadt- und Regionalforschung kennen die Herkunftsgelände, beherrschen die jeweiligen Landessprachen und blicken auf eine langjährige Expertise im Bereich der Migrations- und Integrationsforschung zurück. Und die empirische Forschung wird eine besondere methodische Qualität erforderlich machen, denn die Stichprobenziehung ist komplex und die sprachliche Vielfalt der Zielgruppe stellt eine Herausforderung dar.

Die EU ist derzeit keine Union, die ÖAW ist aber eine Akademie, die den Diskurs über Fächergrenzen pflegt und zusammenarbeitet. Das freut mich, und stimmt mich in dem Bereich optimistisch. Wir haben viele Fragen, wir werden dazu auch präzise Antworten liefern können.

HEINZ FASSMANN

Derzeitige Positionen

- Direktor des Institutes für Stadt- und Regionalforschung der ÖAW
- Vizerektor für Forschung und Internationales an der Universität Wien
- Professor für Angewandte Geographie, Raumforschung und Raumordnung am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien
- Obmann der ÖAW-Kommission für Migrations- und Integrationsforschung

Arbeitsschwerpunkte

- Demographie (besonders im Bereich Migration)
- Stadtgeographie, vergleichende Stadtforschung und Stadtentwicklung
- Transformation im östlichen Europa

Ausbildung

- | | |
|-----------|---|
| 1991 | Verleihung der Venia Legendi für das Fach Humangeographie und Raumforschung |
| 1980 | Promotion zum Dr. phil. an der Universität Wien |
| 1974–1980 | Studium der Geographie und Geschichte an der Universität Wien |

Werdegang

- | | |
|-----------|--|
| 2011–2015 | Vizerektor für Personalentwicklung und Internationale Beziehungen der Universität Wien |
| 2006–2011 | Dekan der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie der Universität Wien |
| Seit 2007 | Wirkliches Mitglied der ÖAW |
| Seit 2006 | Geschäftsführender Direktor des Instituts für Stadt- und Regionalforschung (ÖAW) |
| 2004–2006 | Vizedekan der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie der Universität Wien |

- 2002–2006 Stellvertreter des geschäftsführenden Direktors des Institutes für Stadt- und Regionalforschung
- Seit 2000 Universitätsprofessor für Angewandte Geographie, Raumforschung und Raumordnung an der Universität Wien
- 1996–2000 Ordinarius (C4) für Angewandte Geographie II (Geoinformatik) an der Technischen Universität München
- 1992–1996 Geschäftsführender Direktor des Instituts für Stadt- und Regionalforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften
- u. a. Mitglied der Academia Europaea, Österreichisches Nationalkomitee für International Geographical Union (IGU)
- u. a. Kardinal Innitzer-Würdigungspreis, Bruno Kreisky-Preis für das Politische Buch

INDUSTRIE 4.0: WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN HINTER DEM HYPE

HANS IRSCHIK UND BERNHARD JAKOBY

Industrie 4.0 meint eine vierte industrielle Revolution, welche durch eine wesentlich verstärkte Nutzung von Kommunikationstechnologien bewirkt werden soll und wobei aktuelle Begriffe wie „Internet of Things“, „Smart Factory“ und „Cyber Physical Systems“ eine wichtige Rolle spielen¹. Dieser „Megatrend“ trifft

derzeit nicht nur in der Wirtschaft auf größtes Interesse², er hat auch die Politik erreicht: In Deutschland erklärte Kanzlerin Angela Merkel dieses Konzept im Februar 2015 in einem Video-Podcast zur Chefsache. In Österreich gründete im Juni 2015 der damalige Technologieminister Alois Stöger im Schulterschluss mit

der Industriellenvereinigung (IV) und diversen Fachverbänden den „Verein Industrie 4.0“³.

Leider ist Industrie 4.0 ein etwas unscharfer Begriff, der aber eben höchste Erwartungen in Politik und Gesellschaft weckt. Dementsprechend wurde Industrie 4.0 in den Medien auch als große unbekannte Revolution bezeichnet⁴, und es wurde gefragt: Handelt es sich um eine

¹ Wikipedia schreibt etwa zu Industrie 4.0: „Industry 4.0 facilitates the vision and execution of a ‘Smart Factory’. Within the modular structured Smart Factories of Industry 4.0, cyber-physical systems monitor physical processes, create a virtual copy of the physical world and make decentralized decisions. Over the Internet of Things, cyber-physical systems communicate and cooperate with

each other and with humans in real time, and via the Internet of Services, both internal and cross-organizational services are offered and utilized by participants of the value chain.“, siehe: https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_4.0.

² R. Drath and A. Horch, „Industrie 4.0: Hit or Hype?“, in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014.

³ Siehe: <http://diepresse.com/home/zeitgeschichte/4764217/Die-vierte-industrielle-Revolution?from=suche.intern.portal>.

⁴ Siehe: <http://www.computerwoche.de/a/industrie-4-0-die-unbekannte-revolution,3065252>.

leere Worthölse, einen Hype⁵, oder doch um zukünftige Realität? Ohne Zweifel geht es bei Industrie 4.0 also auch um Diskussions- und Beratungsbedarf für Industrie und Gesellschaft, wofür feste Grundlagen benötigt werden.

Die in der Öffentlichkeit erhoffte gezielte Umsetzung des Konzepts Industrie 4.0 erfordert tatsächlich die Lösung einer großen Zahl wissenschaftlicher Fragestellungen. Diese Herausforderungen sind zunächst den Computerwissenschaften zuzuordnen, wobei es darum geht, die Vernetzung und Informationsverarbeitung in komplexen sogenannten cyber-physikalischen Systemen im erforderlichen Ausmaß zu verbessern. Es werden bei Industrie 4.0 aber auch an die mathematisch-physikalische Beschreibung (Modellbildung und Simulation) der beteiligten komplexen Maschinen, Verfahren und Komponenten bisher unerreichte Qualitätsanforderungen gestellt, wie z. B. „Echtzeitfähigkeit“ bei der Simulation stark nichtlinearer Vor-

gänge. Wichtig erscheint weiters, dass die, für das Funktionieren von Smart Factories unerlässlichen, automatischen Regelungsalgorithmen entsprechend weiterentwickelt werden müssen, ebenso wie die dafür benötigte physikalisch-chemische Beschreibung der beteiligten Sensoren und Aktoren. Schließlich erfordert die breite Implementierung sensorischer und aktorischer Intelligenz die Erforschung und Erschließung fortgeschrittener, aber auch gänzlich neuer Technologien. Dies alles kann wissenschaftlich als Forderung nach verbesserter Mechatronisierung in der Technik zusammengefasst werden. Nicht zuletzt werden aber bei der Realisierung des Konzepts Industrie 4.0 wichtige neue Fragestellungen in den Wirtschafts- und Rechtswissenschaften sowie in der Ethik zu beantworten sein. Wenn nämlich eine gemeinsame Lehre aus den bisherigen drei industriellen Revolutionen (s. Abbildung 1) gezogen werden kann, dann jene, dass diese immer große Herausforderungen an eine Vielzahl von Wissenschaften gestellt haben, also keineswegs nur an die Technik, welche allerdings in den nachfolgenden Ausführungen im Fokus steht.

Industrie 4.0 beruht auf der folgenden Strategie: Das Konzept des „Internets der Dinge“⁶ soll angewendet werden auf neuartige Produktionssysteme mit integrierter Intelligenz⁷. Dabei entstehen smarte Maschinen und Fabriken, welche als „Cyber Physical Systems (CPS)“ funktionieren⁸, also als Integration von Computeralgorithmen und physikalischen Vorgängen und Systemen. Es wird unter anderem erwartet, dass dies zu einer neuartigen sozialen Produktionstechnik führen wird, basierend auf modernen Methoden der Kommunikationstechnik, welche z. B. den Bereich „Big Data“ betreffen⁹.

⁵ Siehe: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/374842/TIA_2_2015_Industrie4.0_Trend_oder_Hype.pdf und <http://derstandard.at/2000042066282/Industrie-4.0-viel-Laerm-um-nichts>.

⁶ Zitat: „... networked interconnection of everyday objects, which are often equipped with ubiquitous intelligence“, siehe: F. Xia et al.: Editorial: Internet of Things, in *International Journal of Communication Systems*, 2012.

⁷ K.-D. Thoben et al.: System-integrated Intelligence – New Challenges for Product and Production Engineering in the Context of Industry 4.0, in *Procedia Technology*, 2014.

⁸ Zitat: „CPS are integrations of computation and physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops.“, siehe: E. A. Lee: *Cyber Physical Systems: Design Challenges, in University of California at Berkeley, Technical Report No. UCB/ECS-2008-8*, 2008.

⁹ Zitat: „... This strategy of industrie 4.0 will lead to more and more people coming to partici-

Übersicht der industriellen Revolutionen

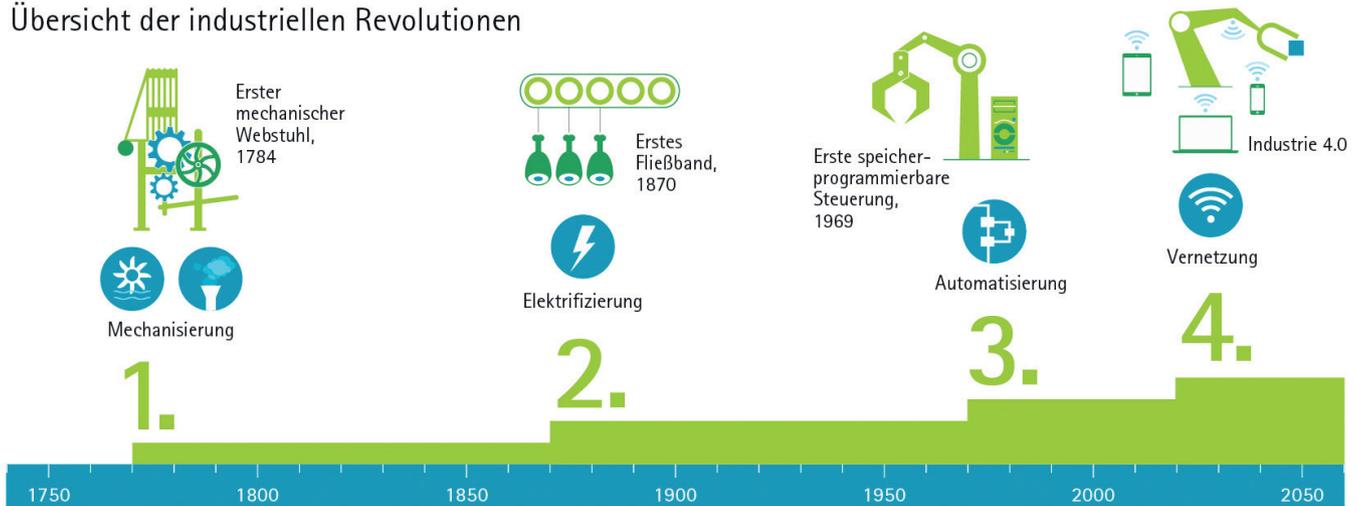


Abb. 1: Übersicht über die industriellen Revolutionen.

Quelle: <https://www.bmvoit.gv.at/bilder/innovation/fdz/industrie.jpg>

Dabei werden sich, wie gesagt, auch zahlreiche nichttechnische Probleme ergeben, etwa in den Rechtswissenschaften¹⁰.

pate in the manufacturing process through CPS technology. ... social manufacturing ... must be based on enabling technologies, such as embedded systems, wireless sensor network, ..., cloud computing, and big data.“, siehe: J. Wan, H. Cai, K. Zhou: Industrie 4.0: Enabling Technologies, in *Int. Conf. Intelligent Computing and Internet of Things*, 2015.

¹⁰ R. H. Weber, R. Weber: *Internet of Things: Legal Perspectives*, Springer 2010.

Eine wissenschaftliche Herausforderung, die bewältigt werden muss, damit dieses Konzept umfassend technisch funktionieren kann, ist die kontinuierliche Computersimulation von Produktionsvorgängen in Echtzeit, also zeitlich synchron zu wirklichen Vorgängen¹¹. Neue Internet- und

¹¹ Zitat: „Unternehmen werden zukünftig ihre Maschinen ... als CPS weltweit vernetzen ... (Mit) dem Siegeszug des Internets führt dieser Trend zur Allgegenwärtigkeit der rechnergestützten Informationsverarbeitung ... Die physikalische Welt und die virtuelle Welt (der Cyber-Space)

Funkstandards eröffnen durchaus Möglichkeiten für den Einsatz echt-

verschmelzen zu CPS Systems. ... In der produktionstechnischen Forschung sind Methoden zur kontinuierlichen Echtzeit-Simulation und Visualisierung über alle Ebenen und Firmengrenzen hinweg zu erarbeiten ...“, siehe: Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, in Abschlussbericht für die Deutsche Bundesregierung. Hrsg.: Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Frankfurt/Main 2013.

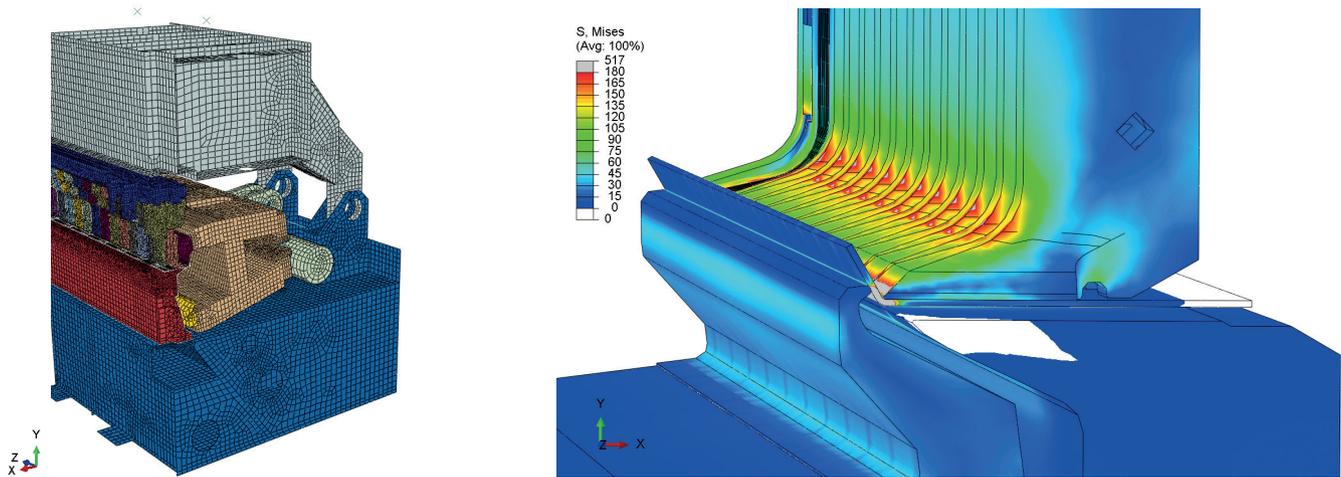


Abb. 2: Finite Elemente Modell und mechanische Spannungen in einem Blechbiegeautomaten.
Quelle: Hammelmüller et al. (2013)¹⁴

zeitfähiger CPS¹². Eine daraus resultierende dramatische Veränderung in der Produktionstechnik wird z. B. die verlässliche Individualisierung von Produkten zu Massenfertigungskosten sein, verbunden mit dem Stichwort „Losgröße 1“¹³. Man versteht

¹² Neue Internet Protocol Standards (IPv6 erlaubt $3,4 \times 10^{38}$ Adressen) und Funkstandards (5G) fördern den allumfassenden Einsatz echtzeitfähiger CPS.

¹³ Zitat: „Fortschritte in den IKT bewirken dramatische Veränderungen ... Diese Veränderungen inkludieren: ... (z. B.:) – die Individualisierung

darunter eine Strategie zur Verhinderung unnötiger Maschinen-Rüstzeiten: „Jeder produzierte Teil muss ein Gutteil sein.“

Nun ist die computergestützte Beschreibung des Verhaltens moderner Hochleistungsproduktionsmaschinen aber häufig noch keineswegs echtzeitfähig und wird es in direkter Weise noch lange nicht sein, auch

von Produkten zu Massenfertigungs-Kosten („mass customization“ / „Losgröße 1“); ...“, siehe: Österreichische Plattform Industrie 4.0. Mission Statement, Version 0.9, 2014.

wenn man die genannten neuen Internet- und Funkstandards berücksichtigt. Zur Illustration nennen wir als ein charakteristisches Beispiel eine Forschungsaktivität im Rahmen des Comet-K2-Kompetenzzentrums LCM gemeinsam mit dem Unternehmen „Salvagnini Maschinenbau GmbH“ in Ennsdorf, NÖ. Zur wirklichkeitsnahen Simulation der Umformvorgänge in den fortschrittlichen Blechbiegeautomaten dieses Unternehmens benötigt man komplexe nichtlineare Finite-Element-Modelle (s. Abbildung 2) mit

mehreren Millionen Unbekannten (zu jedem betrachteten Zeitpunkt) und viele Stunden Rechenzeit¹⁴.

Erst die zusätzliche wissenschaftliche Analyse von zunächst widersprüchlich erscheinenden Finite-Element-Ergebnissen hat es erlaubt, in einem dimensionslosen Ergebnisraum neue, aus der Ähnlichkeitsphysik resultierende echtzeitfähige Modelle zu entwickeln, z. B. für eine skalierte Umformkraft¹⁵. Die sensorische Erfassung der wirklich auftretenden Zylinderkräfte in der Maschine gestattet dann, unter Verwendung dieses neuen ähnlichkeitsphysikalischen Modells, die wirkliche Umformkraft in Echtzeit genau abzuschätzen und sehr rasch auf Schwankungen in den Eigenschaften des umzuformenden Blechs

zu reagieren, sodass Losgröße 1 für solche Produktionsprozesse mit höchster Genauigkeitsanforderung tatsächlich erstmals realisiert werden konnte.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass das Konzept Industrie 4.0 zum einen zunächst direkt zu Anforderungen im Bereich der Informatik führt („embedded systems“, „cloud computing“, „big data“). Die eingebettete Intelligenz verlangt aber auch nach neuen echtzeitfähigen Modellen und Sensoren, Aktoren sowie nach verbesserten Regelungssystemen, um die computergestützte Wechselwirkung der Maschinen mit der physikalischen Realität der smarten Fabrik zu ermöglichen. Dies betrifft verschiedenste mechatronische Disziplinen, wie die Modellierung komplexer physikalischer Systeme, Forschungen zu neuartigen Sensoren und Aktoren, zu Mikrosystemen, über Smarte Strukturen und Materialien, und nicht zuletzt betreffend die Regelungstechnik sowie natürlich die zugehörigen mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen. Um Industrie 4.0 zu einer funktionierenden und segensreichen industriellen Revolution zu machen, werden eine große Zahl wissenschaftlicher Herausforderungen in diesen Dis-

ziplinen zu bearbeiten und zu lösen sein, und sicher nicht nur dort.

Die Autoren danken dem wirklichen Mitglied der ÖAW Andreas Kugi (TU Wien) und den Professoren Kurt Schlacher und Klaus Zeman (JKU Linz) für wertvolle Diskussionen im Zuge der Erstellung dieses Beitrags.

¹⁴ Zitat: „This complete three-dimensional FEM model has a total number of 5117118 variables, and finally we got a computation time with ABAQUS of 114h using eight CPUs on a Workstation with 8 CPUs, 96 GB RAM and a clock rate of 2.8 GHz.“, siehe: F. Hammelmüller et al.: Advanced Mechanical Simulation Models for Automatic Panel Benders, in XII Int. Conf. Computational Plasticity, Fundamentals and Applications (COMPLAS XII), 2013.

¹⁵ Ch. Zehetner et al.: Similarity Methods in Elasto-Plastic Beam Bending, in XIII Int. Conf. Computational Plasticity, Fundamentals and Applications (COMPLAS XIII), 2015.

HANS IRSCHIK

Derzeitige Positionen

- Professor für Technische Mechanik an der Johannes-Kepler-Universität Linz (JKU Linz)
- Institutsvorstand am Institut für Technische Mechanik der JKU Linz

Arbeitsschwerpunkte

- Technische und Angewandte Mechanik, Mechatronik

Ausbildung

- 1986 Habilitation an der TU Wien im Fachgebiet Mechanik
- 1981 Promotion zum Doktor der Technischen Wissenschaften an der TU Wien
- 1970–1977 Studium des Bauingenieurwesens an der TU Wien

Werdegang

- Seit 2015 Mitglied der Academy of Europe
- Seit 2011 Wirkliches Mitglied der ÖAW
- 2009–2013 Senatsvorsitz an der JKU Linz
- 2009 Ehrendoktorat der St. Petersburg State Polytechnic University
- Seit 2004 Leiter am Institut für Technische Mechanik der JKU Linz
- 1995–2001 Vizerektor für Forschung, JKU Linz; Mitglied der Österreichischen Rektorenkonferenz
- 1994–1996 Institutsvorstand, Institut für Technische Mechanik und Grundlagen der Maschinenlehre, JKU Linz
- 1991–2004 Leiter an der Abteilung für Technische Mechanik am Institut für Mechanik und Maschinenlehre, JKU Linz
- 1991 Ordentlicher Professor für Technische Mechanik, JKU Linz

BERNHARD JAKOBY**Derzeitige Position**

- Professor für Mikroelektronik an der Johannes-Kepler-Universität Linz (JKU Linz)

Arbeitsschwerpunkte

- Theorie und Anwendung von integrierter Sensorik, Flüssigsensoren, Mikroakustische Elemente und Elektromagnetismus im Allgemeinen

Ausbildung

- | | |
|------|---|
| 2001 | Habilitation im Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, TU Wien |
| 1994 | Promotion zum Dr. techn. in Elektrotechnik, TU Wien |
| 1991 | Sponsion zum Diplomingenieur im Fach Elektrotechnik, TU Wien |

Werdegang

- | | |
|-----------|---|
| Seit 2015 | Korrespondierendes Mitglied der ÖAW |
| Seit 2005 | Ordentlicher Professor für Mikroelektronik, JKU Linz |
| 2001–2005 | Außerordentlicher Professor für Industrielle Sensorsysteme am Institut für Industrielle Elektronik und Materialwissenschaften, TU Wien |
| 1999–2001 | Projektleiter am Sensortechnologiezentrum der Robert Bosch GmbH |
| 1996–1999 | Wissenschaftler und später Assistenzprofessor an dem Electronic Instrumentation Laboratory of the Delft University of Technology, Niederlande |
| 1994–1995 | Erwin Schrödinger Fellow am Department of Information Technology, University of Ghent, Belgien |
| 1991–1994 | Assistent am Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik der TU Wien |

SOLAR-DRIVEN CHEMISTRY

ULRICH SCHUBERT

Ich möchte vorausschicken, dass ich kein Experte auf diesem Gebiet bin, aber in einer Art Moderatorrolle für ein Weißbuch war, das von einer Gruppe von Experten erstellt und von der Europäischen Vereinigung für Chemische und Molekulare Wissenschaften (EuCheMS) herausgegeben wurde.¹ Ich kann Ihnen daher über dieses Thema berichten und habe dafür den englischen Titel des Weißbuchs gewählt, weil es keine wirklich gute deutsche Übersetzung gibt. Der englische Titel ist aber selbsterklärend.

Worum geht es? Wir sind heute noch stark von Erdöl, Erdgas und Kohle abhängig, aber nicht nur als Energieträger. Oft wird vergessen, dass gerade Erdöl auch einer der wichtigsten Rohstoffe für die chemische Industrie ist. Ein sehr großer Teil

ihrer kohlenstoffhaltigen Produkte geht letztendlich auf Erdöl zurück. Irgendwann wird aber der Zeitpunkt kommen, und es lässt sich streiten wann das genau sein wird, an dem die Erdölvorräte erschöpft sind. Die große Herausforderung besteht darin, eine andere Rohstoffbasis für die chemische Industrie und auch für Brennstoffe zu finden.

Pflanzen, Algen und Cyanobakterien können Kohlendioxid (CO_2) und Wasser mithilfe von Sonnenlicht durch Photosynthese in $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ -haltige Verbindungen umwandeln. Letztere finden als Energieträger, (Bio-)Materialien oder chemische Rohstoffe Verwendung. Durch Photosynthese wird Sonnenenergie eingefangen und in Form chemischer Bindungen gespeichert. Wenn Erdöl als chemischer Rohstoff verwendet wird, werden chemische Verbindungen genutzt, die über biologische und geologische Prozesse im Laufe von Jahrmillionen entstanden sind.

Wenn fossile Energieträger verbrannt werden, setzen wir die Sonnenenergie frei, die vor sehr, sehr langer Zeit hauptsächlich in Form von Kleinstlebewesen und Pflanzen gespeichert wurde.

Die Herausforderung ist, den Prozess der Speicherung von Sonnenenergie in Form chemischer Verbindungen, den die Natur über Jahrmillionen entwickelt hat, gewissermaßen im Zeitraffer nachzubilden. Ausgangsstoffe müssen, wie in biologischen Systemen, die Bestandteile der Luft und Wasser sein. Das ist CO_2 , wenn wir von kohlenstoffhaltigen Verbindungen sprechen, und Stickstoff für stickstoffhaltige Verbindungen. Ich möchte mich hier auf CO_2 beschränken. Ziel ist es also, allein aus CO_2 , Wasser und Photonen, also Sonnenenergie, Brenn- und Treibstoffe sowie Rohstoffe für die chemische Industrie herzustellen. Schlagworte sind etwa „künstliche Photosynthese“ oder auch „solar fuels“.

¹ Vgl. <http://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2016/09/160905-Solar-Driven-Chemistry-web.pdf>.

Ein Zitat beschreibt diese Herausforderung recht gut: „We believe the development of a carbon neutral solar fuel is the greatest energy opportunity of our lifetime. Using just sunlight, carbon dioxide, and water, we can create a clean liquid fuel that could someday power our cars, airplanes, and homes without contributing to climate change.“² Der Prozess soll effizienter sein als natürliche Prozesse, sowohl bezüglich der Zeitskala, also schneller als in der Natur, als auch wirkungsvoller. Die Umwandlung von Sonnenstrahlung in chemische Energie in natürlichen Organismen liegt bestenfalls bei 4–5%, was für technische Prozesse nicht akzeptabel ist. Mikroalgen können in der Natur 6–8% erreichen, in Photobioreaktoren 8–12%.³

Mithilfe von Sonnenlicht erzeugte Energieträger („solar fuels“) oder Rohstoffe für die chemische Industrie wären gleich oder sehr ähnlich wie jene, die wir heute verwenden,

² Vgl. <http://www.solar-fuels.org/>.

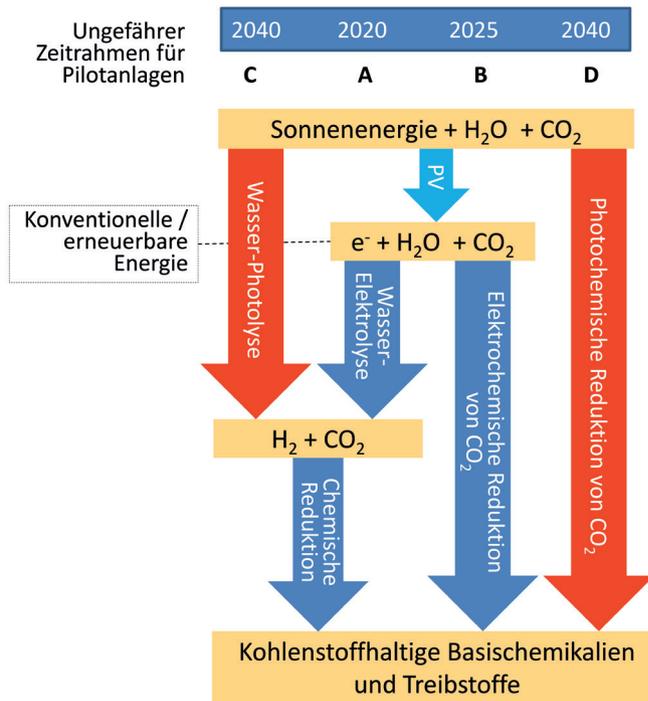
³ R. E. Blankenship, D. M. Tiede, J. Barber, G. W. Brudvig, G. Fleming, M. Ghirardi, M. R. Gunner, W. Junge, D. M. Kramer, A. Melis, T. A. Moore, C. C. Moser, D. G. Nocera, A. J. Nozik, D. R. Ort, W. W. Parson, R. C. Prince, R. T. Sayre, *Science* 2011, 332, 805–809.

wären aber von CO₂ und Wasser abgeleitet und nicht von fossilen Kohlenstoffverbindungen. Sie wären klimaneutral, da bei ihrer energetischen Nutzung („Verbrennung“) nur das ursprünglich gebundene CO₂ wieder freigesetzt wird. Eine solche Technologie hätte auch den Vorteil, dass die derzeitige Infrastruktur für Energieerzeugung und -verteilung kaum geändert werden muss. Die mithilfe von Sonnenlicht erzeugten chemischen Verbindungen könnten mit vorhandenen Möglichkeiten und Anlagen gelagert, transportiert und verwendet werden.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der Aspekt der Energiespeicherung in der öffentlichen Diskussion oft untergeht. Das ist eines der großen und schwierigen Themen im Zusammenhang mit alternativen Energien. Eine der robustesten Arten von Energiespeicherung sind (flüssige) chemische Verbindungen (hohe Energiedichte, Transport- und Lagerfähigkeit, hoher Wirkungsgrad bei ihrer Nutzung usw.). Energieträger die mithilfe von Sonnenstrahlung als Energiequelle erzeugt wurden, sind daher eine extrem attraktive „grüne“ Lösung der Energiespeicherung.

Wie könnten photochemische Prozesse aussehen? Die Zeitskala in der nachfolgenden Grafik⁴ bezieht sich auf den geschätzten Zeitrahmen für die Entwicklung von Demonstratoren und Pilotanlagen. Stand der Technik ist, dass mithilfe von konventionellen oder erneuerbaren Energiequellen erzeugtem Strom Wasser elektrolysiert werden kann. Ein erster Schritt in Richtung einer „solar-driven chemistry“ wäre, dass die benötigte Energie nicht über das Stromnetz transportiert, sondern durch Kopplung der Elektrolysezellen an Photovoltaik-Module (PV) erzeugt wird (Weg A). Elektrolyse von Wasser liefert Wasserstoff und Sauerstoff. Der so erzeugte Wasserstoff kann als solcher (z. B. in Brennstoffzellen) verwendet oder mit dem Kohlendioxid aus Verbrennungsanlagen zu chemischen Verbindungen verarbeitet werden. Letzteres ist bereits machbar. Das Szenario von Weg A hat aber signifikante Schwächen, die mit dem Aufbau und dem Betrieb der Elektrolysatoren zu tun haben, die hier aber nicht im Detail diskutiert werden können. Dies wird also nur eine Übergangstechnologie sein.

⁴ Adaptiert von <http://solarfuelsnetwork.com/solar-fuels/>.



Ein nächster Schritt (Weg B) wäre, CO₂ – ohne die intermediäre Erzeugung von Wasserstoff – elektrochemisch direkt in einfache kohlenstoffhaltige Verbindungen umzuwandeln. Die dafür benötigte Energie könnte kurz- und mittelfristig wiederum durch Kopplung an PV-Module bereitgestellt werden. Es gelten aber die gleichen Einschränkungen wie bei Weg A.

In mittlerer bis ferner Zukunft – optimistisch geschätzt sicherlich erst in 20 bis 30 Jahren – könnten Wasserstoff (Weg C) und kohlenstoffhaltige Verbindungen (Weg D) direkt durch photochemische Reaktionen von CO₂ und Wasser erzeugt werden. Anstatt Elektronen durch Photovoltaik (PV) zu erzeugen und in separaten elektrochemischen Zellen zu nutzen, würde Sonnenenergie in integrierten

Systemen, etwa in photoelektrochemischen Zellen (PECs) oder durch photokatalytische Prozesse eingefangen und genutzt. Dabei werden Absorption der Sonnenstrahlung und Ladungstrennung, d. h. Erzeugung von Elektronen und positiv geladenen Löchern, durch photoaktive Materialien erreicht, die mit Katalysatoren wechselwirken. Letztere nutzen Elektronen oder Löcher für chemische Umsetzungen. Es gibt verschiedene Strategien zur Kombination von photoaktiven Systemen mit Katalysatoren, die aber hier nicht diskutiert werden sollen. Großtechnische Produktion von Wasserstoff durch derartige Prozesse (Weg C) ist wahrscheinlich schneller umsetzbar, da Reduktion von Protonen zu elementarem Wasserstoff weitaus einfacher ist als Reduktion von CO₂.

Im *Labormaßstab* ist es bereits möglich, Verbindungen wie Wasserstoff, Ameisensäure, Methanol oder Methan aus Wasser, CO₂ und Sonnenlicht herzustellen. Es sind allerdings gewaltige wissenschaftliche und technologische Hürden bis zu einer *industriellen* Umsetzung zu überwinden. Damit verbunden ist eine Fülle von naturwissenschaftlichen und technischen Problemen, so zum Beispiel photophysikali-

sche und photo(elektro)chemische Grundlagenforschung, Erforschung und Entwicklung von (Photo-)Katalysatoren und Elektrodenmaterialien, Material- und Stabilitätsprobleme, Entwicklung von Bauteilen oder Standardisierungsfragen. Ich möchte zwei Beispiele exemplarisch herausgreifen, um Ihnen zu zeigen, welche weitreichenden Nebenaspekte die Entwicklung einer solchen Technologie hat.

Mein erstes Beispiel: Es müssen effiziente photoaktive Materialien und (Photo-) Katalysatoren entwickelt werden. Der wirkungsvollste Photosensibilisator oder Katalysator nützt aber für eine großtechnische Umsetzung nichts, wenn er nicht aus billigen, breit verfügbaren und leicht zugänglichen Materialien besteht (die sog. „Materialfalle“). Es hilft also nicht, z. B. einen Katalysator auf Platinbasis zu entwickeln, wenn wir vom – langfristig vollständigen – Ersatz von Treibstoffen durch „solar fuels“ sprechen. Die Weltvorräte an Platin würden dafür nicht ausreichen. Leider sind nach heutigem Stand der Entwicklung wenig häufige Elemente oder potenziell toxische Materialien noch essenziell. Ihr Ersatz durch besser verfügbare und nicht-toxische Materialien ist daher eine zusätzliche

und gewaltige Herausforderung und ein potenzielles Hindernis für die rasche Umsetzung einer „solar-driven chemistry“ in großem Maßstab (dieser Materialaspekt wird übrigens in vielen anderen Bereichen, z. B. Elektromobilität, übersehen oder ignoriert). Wo dies nicht möglich ist, müssen wirkungsvolle Methoden zur Rückgewinnung weniger häufiger Elemente entwickelt werden (z. B. durch „urban mining“).

Ein weiteres Beispiel sind Standort- und Infrastrukturfragen. „Solar fuels“ können im Prinzip überall hergestellt werden, da CO_2 , Wasser und Sonnenenergie überall vorhanden sind. Es wäre also vorstellbar, in lokalen Kleinanlagen Treibstoff zu erzeugen, so wie die Energieerzeugung bereits teilweise dezentralisiert worden ist. Für eine Umwandlung von CO_2 in kohlenstoffhaltige Verbindungen im großtechnischen Maßstab sollte allerdings CO_2 in hoher Konzentration vorliegen. Dazu könnte etwa das in Kalkwerken erzeugte CO_2 verwendet werden. Die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen hätte gewaltige geopolitische Auswirkungen, da es die Monopolstellung einzelner Länder auf den Energie- und chemischen Rohstoffmärkten aufbrechen würde.

„Solar-driven chemistry“ ist ein ambitioniertes wissenschaftliches und technisches Langzeitprojekt, in der Größenordnung vergleichbar mit dem Human Genome Project oder dem Large Hadron Collider. Es wird gewaltigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Nutzen mit sich bringen, auch bereits kurz- oder mittelfristige Ergebnisse. Seine Realisierung erfordert integrierte und synergetische Anstrengungen unterschiedlichster Wissenschaftsdisziplinen sowie von Grundlagen- und industrieller Forschung. Ob alle Ziele im oben diskutierten Zeitraum erreicht werden können, hängt weitgehend von der Höhe der Ressourcen ab, die für R&D auf diesem Gebiet zur Verfügung stehen, aber auch von effizienten Instrumenten der Koordination und Intensivierung von Forschung. Es warten große Herausforderungen auf uns. Wir alle sind aufgefordert, uns ihnen zu stellen.

ULRICH SCHUBERT

Derzeitige Positionen

- Emeritierter Professor am Institut für Materialchemie der TU Wien (Emeritierung 2014)

Arbeitsschwerpunkte

- Sol-Gel Prozess anorganischer und anorganisch-organischer Materialien
- Chemie von Koordinationsverbindungen, molekularen Clustern und Nanomaterialien

Ausbildung

- 1967–1972 Studium der Chemie an der TU München
- 1974 Promotion im Arbeitskreis des Chemie-Nobelpreisträgers Prof. Dr. E. O. Fischer
- 1980 Habilitation für das Fach Chemie an der TU München

Werdegang

- 2011–2016 Vizepräsident und Präsident der Europäischen Vereinigung für Chemische und Molekulare Wissenschaften
- Seit 2005 Wirkliches Mitglied der ÖAW
- 2001–2004 Präsident der Gesellschaft Österreichischer Chemiker
- 1995–2014 Ordentlicher Professor für Anorganische Chemie an der TU Wien
- 1989–1994 Abteilungsleiter und zeitweilig kommissarischer Direktor des Fraunhofer-Instituts für Silikatforschung in Würzburg
- 1980–1982 Privatdozent an der TU München

u. a. Mitglied der Deutschen Akademie Leopoldina, Halle; Langjähriges Mitglied im FWF-Kuratorium, im Senat der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft sowie in einem ERC Panel; Mitglied der Expertenkommission der deutschen Exzellenzstrategie u. a. Träger der Loschmidt-Medaille der Gesellschaft Österreichischer Chemiker und Empfänger des Wacker-Silicone-Awards 2009

POTENZIELLE QUERVERBINDUNGEN DER GRUNDLAGENFORSCHUNG IN DER QUANTENPHYSIK ZU ANWENDUNG UND INDUSTRIE

PETER ZOLLER

Unser Präsident hat mir die ehrenvolle Aufgabe übertragen, ein kurzes Impulsreferat zum Thema „Potenzielle Querverbindungen der Grundlagenforschung in der Quantenphysik zu Anwendung und Industrie“ zu halten. Wie wir alle wissen, betreibt die Österreichische Akademie der Wissenschaften mit dem IQOQI Innsbruck und IQOQI Wien, dem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation, Forschungsinstitute, die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Quantenphysik betreiben. Ich glaube, wir können alle mit

einem gewissen Stolz sagen, dass die Quantenphysik in Österreich insgesamt, und am IQOQI im Speziellen, ein Aushängeschild exzellenter österreichischer Forschung mit internationaler Sichtbarkeit ist.

Als das IQOQI vor mehr als zehn Jahren gegründet wurde, war unsere Vision, ein Forschungsinstitut ins Leben zu rufen, wo in Ergänzung zu dem, was an Universitäten möglich ist, Forschungsthemen betrieben werden, die sehr viel längerfristiger ausgelegt sind, und auch mit dem Anspruch, über die akademische

Landschaft und Forschung hinauszublicken. In den Augen von vielen von Ihnen ist die Quantenphysik vermutlich eines jener Forschungsgebiete, das mit tiefen und fundamentalen Fragen in der Physik verbunden ist. Das ist auch richtig. Die paradoxen Quantenphänomene bilden gleichzeitig aber auch die Grundlage von neuen Quantentechnologien. Diese reichen von einem Fernziel, wie dem Bau eines Quantencomputers, bis zu viel näherliegenden Anwendungen, wie zum Beispiel der Quantenkommunikation, die eine sichere

Datenübertragung verspricht, oder Quantensensoren, oder auch besseren Atomuhren, die wir für unsere GPS-Systeme benötigen.

Bei der Gründung des IQOQI wurde auch konkret angestrebt, solchen Anwendungen und Interessen der Industrie offen gegenüberzustehen. Heute sind wir in der Lage, Ihnen ein Beispiel dafür zu präsentieren, ein sehr erfolgreiches Beispiel, das Ihnen Wolfgang Lechner im Anschluss in allen Einzelheiten erklären wird. Abstrakte theoretische Ideen, die vielleicht am Anfang nur in Form von Kritzeleien auf Tafeln entstanden, dann zu der neuen Architektur eines adiabatischen Quantencomputers oder Quanten-Annealers entwickelt wurden und kürzlich in ein Patent und eine Publikation von hoher Sichtbarkeit gemündet haben. Wir sind heute an einem Punkt, wo die Industrie bereits großes Interesse an diesen Patenten signalisiert hat. Die gesamte Entwicklung hat sich auf einer Zeitskala von einem halben Jahr abgespielt. Sie sehen hier eine Brücke von der Grundlagenforschung bis hin zu industrieller internationaler Relevanz und Bedeutung, und letzten Endes der Positionierung Österreichs auf dieser neuen Landkarte.

Bevor Ihnen Wolfgang Lechner gleich noch Details berichten wird, möchte ich allgemein hinzufügen, dass vor einigen Jahren die Industrie solchen Quanten-Anwendungen eher zögerlich und eher als Beobachter gegenübergestanden ist. Mit dem heurigen Jahr scheint jetzt doch ein Damm gebrochen zu sein. Es ist offenbar die Zeit gekommen, wo hauptsächlich amerikanische Firmen, wie Microsoft, Intel, Google, IBM, quasi auf die Quanten gekommen sind und an ihre Zukunft glauben, wobei sie mit erstaunlicher Offenheit hier Investitionen in etwas tätigen, das genau an der Schnittstelle von Grundlagenforschung und Industrie mit ihren entsprechenden Anwendungen steht.

Dass wir in Österreich und an den ÖAW-Instituten in der Quantenphysik in der ersten Liga mitspielen dürfen, habe ich bereits vorhin erwähnt. Dass wir auch hervorragend aufgestellt sind, um bei diesem Brückenschlag zu Anwendungen und zur Industrie eine zentrale Rolle zu spielen, ist wohl eine erfreuliche Konsequenz von all den Investitionen, die in die Grundlagenforschung gemacht wurden. Das kann auch als ein Musterbeispiel dafür dienen, dass sich diese Investitionen letzten Endes auch in einem weiteren Sinne lohnen. Was

ich persönlich sehr hoffe, ist, dass Österreich als jenes Land, das gerade in dieser Grundlagenforschung, in der Quantenphysik einer der großen Spieler weltweit ist, in der Umsetzung genauso erfolgreich ist. Ich hoffe, dass wir die Früchte, die wir auf akademische Weise erarbeitet haben, auch transferieren können in das, was man als industrielle Relevanz bezeichnet, dass wir diese Früchte unserer intellektuellen Errungenschaften auch in Österreich ernten können. Letzten Endes ist es Aufgabe der Politik, die richtigen Rahmenbedingungen dafür zu schaffen.

Ich möchte Sie noch auf eine Initiative der Quantenphysiker in Österreich hinweisen. Wir wollen ein gemeinsames Erwin Schrödinger Quantenzentrum gründen, als Klammer für die Quantenphysik in ganz Österreich. In diesem Zusammenhang durfte ich vor kurzem einen Vortrag zum Thema „Exzellenzinitiative“ auf einer Tagung des Wissenschaftsrates halten. Dabei ging es darum, dass wir im Gegensatz zu unseren Nachbarn in Österreich bedauerlicherweise keine solche Initiative haben. Ich habe in diesem Kontext angemerkt, dass uns wohl die finanziellen Mittel fehlen, eine Exzellenzinitiative wie zum

Beispiel in Deutschland, wo diese ja äußerst erfolgreich war, in breitem Rahmen in Österreich aufzustellen. Es müsste aber wohl auch in Österreich möglich sein, eine Exzellenzinitiative für einige Topgebiete wie zum Beispiel die Quantenphysik und die Lebenswissenschaften auf die Beine zu stellen. Das sind Bedingungen, die die Politik schaffen muss, damit die Dinge, die in Österreich entstanden sind, auch in Österreich umgesetzt werden können. Mit diesen Bemerkungen möchte ich an Wolfgang Lechner weitergeben, der Ihnen ein wenig handfester erzählen wird, worum es eigentlich bei der angesprochenen Erfindung geht.

WOLFGANG LECHNER

Wie Professor Zoller in seiner Einleitung bereits erwähnt hat: Die Grundlagenforschung in Österreich ist exzellent. Nicht nur an der ÖAW, auch an den Universitäten. Sie ist getragen von dem Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment. In letzter

Zeit interessiert sich auch die Industrie dafür. Und obwohl wir noch nicht sagen können, in welcher Form der Quantencomputer irgendwann auf unseren Schreibtischen stehen wird, sehen wir doch, dass enorme Investitionen in bestimmte Richtungen getätigt werden.

Ich möchte einige Zeitungsausschnitte aus den letzten Monaten nennen, um zu veranschaulichen, um welche Summen es hier geht. Intel zum Beispiel investiert 50 Millionen, D-Wave in Kanada hat insgesamt 170 Millionen an Funding bekommen, Google, Microsoft, NASA, die Liste ist lang.

Es gibt ja auch verschiedene Varianten des Quantencomputers. Eine Variante, mit der wir uns beschäftigt haben, ist der sogenannte adiabatische Quantencomputer. Dieser adiabatische Quantencomputer erzeugt deswegen enormes Interesse bei US-Konzernen, weil er entwickelt wurde, um Optimierungsprobleme zu lösen.

Optimierungsprobleme spielen in vielen Feldern eine sehr große Rolle. In der Mathematik und in der Computerwissenschaft reden wir von „NP-Complete Problems“. Das hört sich nach eher abstrakten Dingen an, wie dem „Number Partitioning

Problem“ und ähnlichem. Aber diese abstrakten Probleme haben ganz konkrete Anwendungen. Nehmen wir zum Beispiel das Gebiet der Logistik. Das sogenannte „Travelling Salesman Problem“ ist eines der ganz bekannten Beispiele aus diesem Bereich. Dabei geht es um Folgendes: Nehmen Sie an, Sie arbeiten für ein Logistikunternehmen und müssen Punkte auf einer Landkarte abfahren. Sie stellen sich die Frage: Wie kann ich das möglichst effizient machen? Wenn Sie nur einige Punkte auf der Liste haben, können Sie das Problem mit einer Hand lösen. Wenn Sie aber Tausende Punkte anfahren müssen, dann dauert es schon länger, auch auf einem Supercomputer, solange wie das Universum alt ist. All diese Probleme zeichnen sich dadurch aus, dass mit der Zahl der Elemente die Rechenzeit exponentiell anwächst. Optimierungsprobleme sind aber sehr viel allgemeiner. Wir sehen das auch in der Wissenschaft. Zum Beispiel in der Physik der kondensierten Materie hört man von der Problematik der Spin-Gläser, und in der Biologie tauchen Optimierungsprobleme bei der Proteinfaltung auf. In der theoretischen Chemie stellt das Minimieren von Elektronenstrukturen ein Optimierungsproblem dar.

DNA-Sequenzierung als Ganzes ist ein Optimierungsproblem. Künstliche Intelligenz, neuronale Netzwerke, die Liste ist endlos.

Solche Optimierungsprobleme können mit einem adiabatischen Quantencomputer effizient gelöst werden. Das Problem dabei ist nur, dass die Programmiersprache dieser Quantencomputer als Wechselwirkung zwischen Quantenbits formuliert ist. Das heißt, wenn ich heute auf einem Quantencomputer die Elektronenstruktur eines bestimmten Moleküls finden möchte, dann verwende ich Quantenbits, die auf eine bestimmte Art miteinander verbunden sind. Und genau für diese Verdrahtung kann ich eine Berechnung durchführen. Möchte ich ein anderes Molekül oder ein anderes Problem lösen, muss ich einen neuen Quantencomputer bauen, mit einer anderen Verdrahtung. Das zu lösende Problem ist Teil der Hardware. Man kann das mit den mechanischen Rechenmaschinen vergleichen.

Die Idee von John von Neumann, die Idee des modernen Computers ist, dass das Problem Teil der Software ist. Das heißt, dass ich das Problem als Input in meinen Computer geben kann. Und genau das haben wir mit unserem adiabatischen Quantencom-

puter erreicht. Es ist uns gelungen, die physikalischen Quantenbits von den logischen Quantenbits zu trennen. Die Verbindungen zwischen den Quantenbits sind jetzt nicht mehr Teil der Hardware, sondern etwas, was ich durch einfache Felder von außen ein- und ausschalten kann. Unser Projekt kann man als Grundlagenforschung bezeichnen, und es wurde von der akademischen Welt auch als eine High-Impact-Publikation gewürdigt. Worauf wir aber auch sehr stolz sind, ist, dass wir hier ein gemeinsames Patent der Akademie der Wissenschaften und der Universität Innsbruck eingereicht haben, für das schon jetzt, in dieser frühen Phase, ein enormes Interesse von großen US-Konzernen besteht.

ZOLLER PETER

Derzeitige Positionen

- Professor für Theoretische Physik an der Universität Innsbruck
- wissenschaftlicher Direktor des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der ÖAW

Arbeitsschwerpunkte

- Quantenoptik und Quanteninformation mit Anwendung auf dem Gebiet der Quantencomputer, sowie Querverbindungen von Quantenoptik und Festkörperphysik

Ausbildung

- | | |
|------|---|
| 1977 | Doktorat im Fach Theoretische Physik an der Universität Innsbruck |
| 1981 | Habilitation |

Werdegang

- | | |
|-----------|--|
| 2015 | Jacques Solvay Professor in Physics |
| Seit 2003 | Wissenschaftlicher Direktor am IQOQI Innsbruck |
| Seit 2001 | Wirkliches Mitglied der ÖAW |
| Seit 1994 | Adjoint Fellow, Joint Institute für Laboratory Astrophysics, Boulder, Colorado |
| Seit 1994 | Ordentlicher Professor für Theoretische Physik am Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck |

u. a. Träger des Wolf-Preises, der Benjamin Franklin Medaille und des Wittgenstein-Preises

u. a. Mitglied der National Academy of Sciences, der Naturforscher Leopoldina, Halle; der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften und des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik

WOLFGANG LECHNER

Derzeitige Positionen

- Assistent an der Universität Innsbruck
- Senior Scientist am IQOQI Innsbruck

Arbeitsschwerpunkt

- Adiabatische Quantencomputer

Ausbildung

- 2005–2009 Doktorat an der Universität Wien
- 2000–2005 Studium der Theoretischen Physik an der Universität Wien

Werdegang

- Seit 2016 Assistent an der Universität Innsbruck
- Seit 2014 Senior Scientist am IQOQI Innsbruck
- 2011–2016 PostDoc an der Universität Innsbruck
- 2009–2011 PostDoc an der Universität Amsterdam

ZUKUNFTSASPEKTE MORPHOLOGISCHER (BILDGEBENDER) DIAGNOSTIK IN DER MEDIZIN

KURT ZATLOUKAL UND HELMUT DENK

Trotz zahlreicher heute zur Verfügung stehender biochemischer, serologischer und molekularer diagnostischer Methoden haben invasive und nichtinvasive bildgebende Verfahren ihre wichtige Position in der medizinischen Forschung und diagnostischen Praxis behauptet und werden auch in der Zukunft eine wesentliche Rolle spielen. Dies gilt nicht nur für den radiologischen Bereich, wie klassische Röntgenologie, Computertomografie, Szintigrafie, Positronen-Emissions- und Magnetresonanztomografie sowie Sonografie, sondern auch für die Pathologie, im Besonderen für die Histopathologie im Rahmen der personalisierten

Medizin. In diesem Fach beruhen sowohl Forschung als auch Diagnostik weitgehend auf der Interpretation histologischer Bilder gesunder und krankhaft veränderter, durch Operation, Biopsie oder im Rahmen von Tierexperimenten gewonnener Gewebeproben; sie gewähren einen recht direkten Einblick in ein Krankheitsgeschehen. Es geht dabei aber nicht nur um die Feststellung eines krankhaften Prozesses anhand der im Mikroskop erfassbaren Veränderungen, sondern auch um die Beurteilung funktioneller Aspekte, z. B. der Tendenz eines Tumors zur Metastasierung und sein Ansprechen auf Therapie, also um Voraussagen

auf Basis der Momentaufnahme, die uns das morphologische Bild des gefärbten Gewebsschnittes bietet. Derartige Befunde sind die Grundlage einer auf den individuellen Patienten zugeschnittenen personalisierten Medizin, der sog. „Präzisionsmedizin“, und damit einer „maßgeschneiderten“ Therapie. Die klassische auf Kenntnissen und Erfahrungen beruhende visuelle Diagnostik in der Histopathologie ermöglicht bereits viele klinisch wichtige Aussagen (Abbildung 1). Wir berücksichtigen z. B. bei der Beurteilung von Tumoren den Differenzierungsgrad, d. h. die vom normalen Muttergewebe abweichende Morphologie, als Maß für

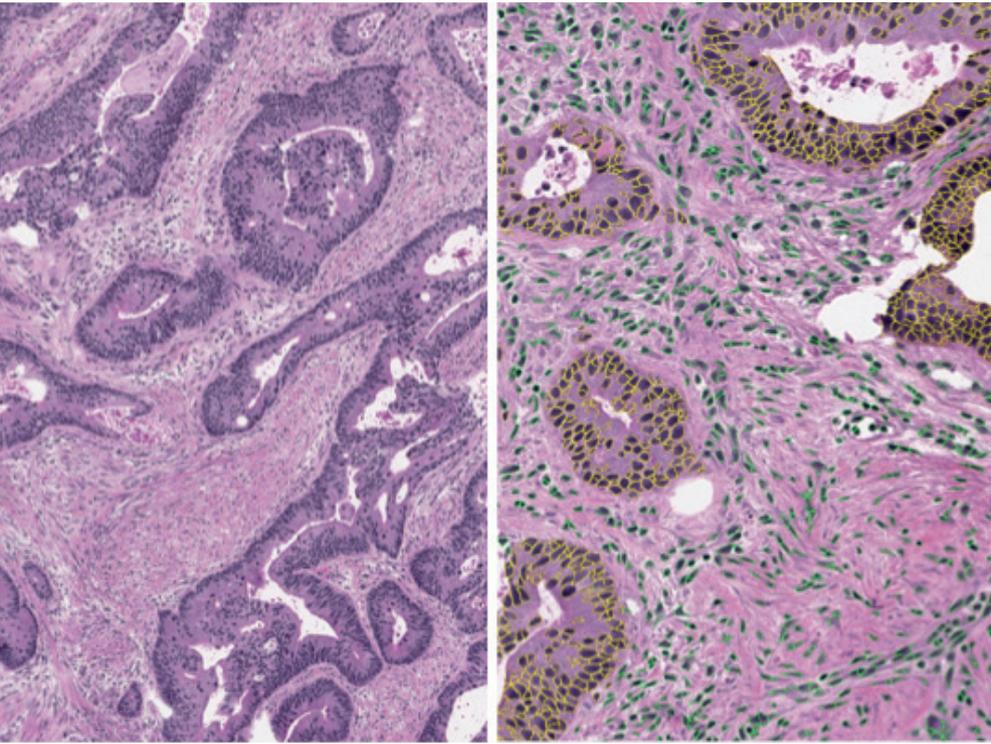


Abb. 1: Histologischer Schnitt eines Adenokarzinoms des Dickdarms. *Links* Hämatoxylin-Eosin- gefärbtes Präparat. Visuelle Mustererkennung erlaubt eine schnelle und sichere Diagnose. *Rechts* Computer-basierte quantitative Auswertung der Zellkerne im Karzinom und Bindegewebe generiert reproduzierbare Daten, die z. B. für die Auswertung von Gensequenzierungsanalysen erforderlich sind.

den Grad der Bösartigkeit, die Invasion in die Umgebung, die Schnelligkeit des Wachstums durch Erfassung

der Mitosen, die Gefäßeinbrüche als Voraussetzung für die Metastasierung etc., also morphologische

Veränderungen mit spezifischem genetischem Hintergrund. In den traditionell verarbeiteten (gefärbten) Gewebsschnitten verbirgt sich aber eine Fülle weiterer Informationen, die visuell nicht erfasst oder interpretiert werden können. Eine Erweiterung und Objektivierung der Aussagekraft mikroskopischer Untersuchungen erbringen histochemische, immunhistochemische und molekulare Verfahren. Durch Kombination und Korrelation phänotypischer und genotypischer Darstellungen sowie Digitalisierung und Auswertung mittels bioinformatischer Methoden (Abbildung 1) lassen sich Biomarker (sogenannte „Imaging Biomarker“) für diverse neoplastische und nicht-neoplastische Erkrankungen identifizieren und damit eine Präzisierung der klassischen morphologischen Diagnostik erreichen¹. Optimierte Sequenzierungsmethoden erlauben eine immer exaktere Analyse von Genveränderungen auch in routinemäßig fixiertem biologischem Material und erweitern in Korrelation mit den morphologischen und klinischen Befunden die diagnostische Aussage-

¹ European Society of Radiology (ESR). ESR Position Paper on Imaging Biobanks. Insights Imaging. 2015 August 6(4):403–10.

kraft. Das in Biobanken gelagerte biologische Material mit der dazugehörigen klinischen Information bildet dafür eine wichtige Grundlage. Dass mikroskopische Methoden in der Forschung heute nicht an Aktualität verloren haben, zeigen die Fortschritte in der Einzel-Zell-Mikroskopie. Sie ermöglicht durch die modernen Entwicklungen bei Mikroskopen, Laser-Technologie, Fluoreszenzmarkierung von Proteinen und Bioinformatik immer tiefere Einblicke in das biologische Geschehen gesunder und kranker lebender Zellen. Erkenntnisse auf diesem Gebiet wurden 2014 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet (Nobelpreis für Chemie an Eric Betzig, Stefan Hell und William E. Moerner für die Entwicklung der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie). Insbesondere Entwicklungen der molekularen Medizin machen es erforderlich, Biomoleküle im Gewebe (in situ) mit ihren Interaktionspartnern und in ihrer zellulären Lokalisation spezifisch und quantitativ nachzuweisen (Abbildung 2); nur dadurch kann in vielen Fällen die Funktion von Biomolekülen bestimmt werden. Neben den Entwicklungen in der Mikroskopiertechnologie und Möglichkeiten der Digitalisierung kom-

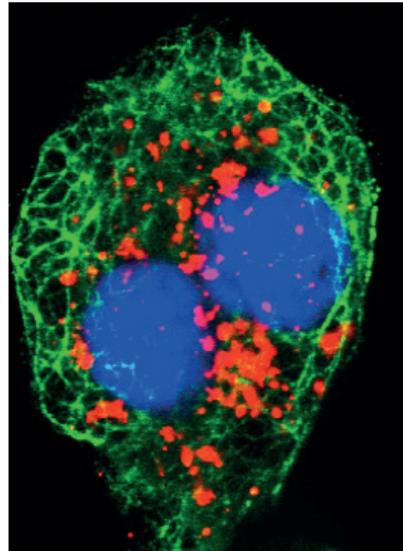


Abb. 2: Immunfluoreszenzmikroskopische Darstellung der intrazellulären Verteilung unterschiedlicher Zellkomponenten in einer Leberkarzinomzelle. Grün: Keratin-Zellskelett; rot: Autophagosomen; blau: DNA in den beiden Zellkernen.

men heute wichtige Impulse aus dem Feld der Computerwissenschaften. Durch Fortschritte in der Verarbeitung großer Datenmengen wird es nun möglich, digitale Informationen aus komplexen Bildern von Gewebsschnitten systematisch und standardisiert zu analysieren. Dies wird

zukünftig eine bisher nicht erschlossene Informationsquelle aus histologischen Schnitten der medizinischen Forschung aber auch Diagnostik nutzbar machen. Um diese Entwicklungen voranzutreiben, bedarf es großer Datenmengen von digitalisierten Bildern, molekularer Daten über biologische Veränderungen bei Krankheitsprozessen und medizinischer Daten über individuelle Krankheitsverläufe. Hierbei besteht die größte Herausforderung nicht so sehr in der Datenmenge, die dank moderner Technologie zu bewältigen ist, sondern in der Verfügbarkeit medizinischer Daten für Forschung und Entwicklung. Die diesbezüglichen Herausforderungen betreffen Aspekte, wie die inhomogene Datenstruktur und -qualität, aber auch ethische und rechtliche Erfordernisse (Tabelle 1).

In der Medizin werden Erkrankungen noch immer überwiegend in Form von freiem Text beschrieben, welcher stark von Arzt zu Arzt variieren kann. Obwohl Krankheitsbilder zunehmend durch internationale Klassifikationen und Ontologien dokumentiert werden, kann auf Freitextinformation, welche in der Landessprache vorliegt und dadurch zusätzlich noch eine Sprachbarriere

bei internationalen Zusammenarbeiten darstellt, nicht verzichtet werden. Bei molekularen Daten, die durch Analyse von biologischen Proben mit unterschiedlichen Technologien (z. B. zur Gensequenzierung, Protein- oder Metabolitenanalyse) generiert werden, liegt die Information in Form von international standardisierten Messergebnissen vor. Diese Daten weisen jedoch ein weiteres Problem auf. Je aufwendiger die Analysetechnologie ist, desto spezifischer sind auch die Anforderungen an die Qualität des untersuchten biologischen Materials. Studien haben gezeigt, dass wegen fehlender Qualitätsstandards von biologischen Proben Forschungsergebnisse unterschiedlicher Gruppen nur eingeschränkt vergleichbar sind^{2,3}, ein Umstand, der durch zertifizierte Biobanken verbessert werden soll. Somit sind Heterogenität in der Datenstruktur (z. B. freier Text, Messdaten, Bilddaten) und fehlende Standardisierung

² Baker M. 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*. 2016 May 25; 533(7604): 452–4.

³ Freedman L. P., Cockburn I. M., Simcoe T. S. The Economics of Reproducibility in Preclinical Research. *PLoS Biol*. 2015 Juni 9; 13(6): e1002165.

-
- **Medizinische Daten sind sensible Daten (personenbezogen, identifizierbar)**
 - **Komplexe Regularien (Datenschutz, Ethik, Medizin)**
 - **Potenziell großer Wert und komplizierte Eigentumsituation**
 - **Heterogene Daten (Text, Bilder, Laborparameter, Lebensstil, „omics“-Daten etc.)**
 - **Heterogene Datenqualität**
 - **Datenherkunft und -entwicklung muss dokumentiert werden (Krankheitsverlauf, Entwicklung von Nomenklaturen)**
 - **Komplizierte Zugriffsregelungen**
-

Tab. 1: Beispiele für Faktoren, die bei der Forschung an medizinischen Daten zu berücksichtigen sind.

in der Datenqualität derzeit limitierende Faktoren für die integrierte Analyse großer Datenmengen. Insbesondere im Zusammenhang mit der personalisierten Medizin ist es notwendig, individuelle Erkrankungen so detailliert wie möglich zu beschreiben. Dies bedeutet jedoch, dass diese Daten einen Bezug zu einzelnen Personen haben und dadurch nicht oder nur begrenzt anonymisierbar sind⁴. Eine weitere Folge ist, dass diese Daten nur unter Erfüllung spezieller ethischer Kriterien und

⁴ Eder J., Gottweis H., Zatloukal K. IT solutions for privacy protection in biobanking. *Public Health Genomics*. 2012;15(5):254–62.

Auflagen des Datenschutzes für die Forschung verwendet werden dürfen. Grundsätzlich sind bei biologischen Proben und medizinischen Daten, die sich auf einzelne Personen beziehen, die entsprechende Information des Patienten und dessen spezifische Einwilligung erforderlich⁵. Obwohl die überwiegende Mehrzahl der Patienten bereit ist, ihre Proben und Daten der medizinischen Forschung zur Verfügung zu stellen, stößt die umfassende Umsetzung

⁵ World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013 November 27;310(20):2191–4.

der informierten Einwilligung an die Grenzen der Machbarkeit im medizinischen Alltag. Weiters erfordert eine informierte Einwilligung, dass Prinzipien modernster medizinischer Forschung in leicht verständlicher Form kommuniziert werden und ein medizinisches und biologisches Grundverständnis bei der Bevölkerung vorhanden ist. Daraus ergibt sich auch ein dringender Bedarf, generell die naturwissenschaftliche Bildung und das Forschungsverständnis und -interesse zu verbessern⁶.

Diese Beispiele zeigen, dass die Weiterentwicklung der morphologischen Diagnostik ein interdisziplinärer Prozess ist, der neben naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen auch die Öffentlichkeit einbinden muss. Im Rahmen der europäischen Forschungsinfrastruktur für Biobanken und biomolekulare Ressourcen (BBMRI-ERIC) wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Pathologie der Medizinischen Universität Graz an einer Lösung gearbeitet, die zu einer neuartigen Forschungsinfrastruktur für digitale Pathologie führen soll. Das Konzept reicht von neuen Wegen, Patienten in den For-

schungsprozess einzubeziehen, über Standardisierung von Proben und Datenqualität, Datenkuration, zu sicherer Datenspeicherung und -analytik, wobei Musterlösungen für die Umsetzung der europäischen Datenschutz Grundverordnung etabliert und getestet werden. Das Konzept könnte auch einen Beispielcharakter für die Einbindung medizinischer Forschungsdaten in die sich derzeit in Planung befindende European Open Science Cloud sein⁷.

⁶ Gaskell G., Gottweis H. Biobanks need publicity. *Nature*. 2011 März 10;471(7337):159–60.

⁷ European Open Science Cloud. *Nat Genet*. 2016 Juli 27;48(8):821.

KURT ZATLOUKAL

Derzeitige Position

- Professor und stellvertretender Institutsvorstand am Institut für Pathologie, Medizinische Universität Graz

Arbeitsschwerpunkte

- Medizinisch-theoretische Wissenschaften, Pharmazie
- Konzeption und Aufbau der Europäischen Biobanken-Forschungsinfrastruktur
- Molekulare Pathologie mit Fokus auf metabolische und neoplastische Erkrankungen der Leber

Ausbildung

- | | |
|-----------|--|
| 1992 | Habilitation für Molekulare Pathologie an der Karl-Franzens-Universität Graz |
| 1985 | Promotion |
| 1977–1985 | Studium der Humanmedizin an der Medizinischen Universität Graz |

Werdegang

- | | |
|-----------|---|
| Seit 2010 | Leiter des Christian Doppler Labors für Bioprobenforschung und Biobanktechnologie |
| Seit 2005 | Stellvertretender Institutsvorstand des Instituts für Pathologie, Medizinische Universität Graz |
| 2002–2005 | Präsident der Österreichischen Gesellschaft für Gentechnik und Gentechnologie |
| Seit 2002 | Korrespondierendes Mitglied der ÖAW |
| Seit 1997 | Professor für Molekulare Pathologie am Institut für Pathologie der Medizinischen Universität Graz |

u. a. Mitglied der Bioethikkommission am Bundeskanzleramt und des wissenschaftlichen Ausschusses für Genanalyse und Gentherapie der Gentechnikkommission
u. a. Träger des Alois Sonnleitner-Preises der ÖAW, Carl von Rokitansky-Preises, Best of Biotech Prize, Sandoz-Preis für Medizin

HELMUT DENK

Derzeitige Position

- Emeritierter Professor für Pathologische Anatomie am Institut für Pathologie der Medizinischen Universität Graz

Arbeitsschwerpunkte

Molekularpathologie mit besonderem Fokus auf krankhaften Veränderungen von Komponenten des Zellskeletts – insbesondere bei Tumoren, bei chronischen Leber-Erkrankungen und chronisch-degenerativen Erkrankungen wie Alzheimer oder Parkinson

Ausbildung

- | | |
|------|---|
| 1976 | Habilitation für Pathologische Anatomie |
| 1973 | Habilitation für Allgemeine und Experimentelle Pathologie |
| 1964 | Promotion an der Universität Wien |

Werdegang

- | | |
|-----------|--|
| 2009–2013 | Präsident der ÖAW |
| Seit 1991 | Wirkliches Mitglied der ÖAW |
| 1983–2008 | Ordentlicher Universitätsprofessor für Pathologische Anatomie und Vorstand des Instituts für Pathologie der Medizinischen Universität Graz (Emeritierung 2008) |
| 1977–1982 | Außerordentlicher Professor für Pathologie und stellvertretender Instituts-vorstand am Institut für Pathologische Anatomie der Universität Wien |
| 1974–1975 | Visiting Professor und Fulbright Scholar am Pharmakologischen Institut, Yale Universität, New Haven, USA |

u. a. Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle; The Royal College of Pathologists London und der New York Academy of Sciences

u. a. Träger des Österr. Ehrenzeichens für Wissenschaft und Kunst, des Kardinal-Innitzer-Würdigungspreises und des Sandoz-Preises für Medizin

IMPRESSUM

Herausgeber:

Österreichische Akademie der Wissenschaften

Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, 1010 Wien

www.oeaw.ac.at

COVERBILD

Computer-basierte quantitative Auswertung der Zellkerne eines Adenokarzinoms und Bindegewebe des Dickdarms.

© Georg Steiner, TissueGnostics GmbH

REDAKTION

DI Dr. Viktor Bruckman

Ingrid Wechselbaum

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 2017

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



WWW.OEAW.AC.AT