



# DIE GENOM- *e*-VOLUTION

*Ivan Đikić*

BIG IDEAS III



# DIE GENOM-e-VOLUTION

*Ivan Đikić*



**eib.org/bigideas**

**Die Genom-E-volution**

© Europäische Investitionsbank, 2020

Alle Rechte vorbehalten.

Fragen zu Rechten und Lizenzen sind zu richten an **publications@eib.org**

Fotos: © Getty Images, Shutterstock. Alle Rechte vorbehalten.

Die Genehmigung zur Vervielfältigung oder Verwendung dieser Fotos ist direkt beim Rechteinhaber einzuholen.

Der nachfolgende Text gibt die Ansicht der Autoren wieder, die nicht unbedingt der Sichtweise der Europäischen Investitionsbank entspricht.

Dieser Essay ist als E-Book erhältlich bei Apple Books, Kindle, Kobo und auf **eib.org/bigideas**

pdf: QH-03-20-217-DE-N ISBN 978-92-861-4677-0 doi: 10.2867/153235

eBook: QH-03-20-217-DE-E ISBN 978-92-861-4682-4 doi: 10.2867/07485

## BIG IDEAS

„Wir haben große Fortschritte gemacht, aber wir bleiben verletzlich. Und unser Wille, den Herausforderungen für die Weltgesundheit gemeinsam zu begegnen, ist noch nicht stark genug. Trotz unseres Wissens, trotz neuer Technologien werden wir ohne konzentrierte weltweite Anstrengungen nur begrenzt Erfolg haben. Das zeigt sich jetzt deutlich.“

Mit der Entschlüsselung des menschlichen Genoms brach zu Beginn dieses Jahrtausends ein neues Zeitalter in der Biomedizin an. Die Nanotechnologie und die Robotik haben innovative Instrumente und leistungsfähige Diagnosetechniken hervorgebracht. Dank großer Therapiefortschritte können wir heute HIV in Schach halten und Krebs gezielter behandeln. Trotzdem stehen wir weiter vor gewaltigen Aufgaben – nicht nur beim Krebs, sondern auch bei neurodegenerativen und anderen Erkrankungen.

Gleichzeitig beeinträchtigen der internationale Reiseverkehr, die Mobilität und der globalisierte Handel unsere Lebensbedingungen und begünstigen die weltweite Ausbreitung von Infektionskrankheiten und neue Pandemien wie Covid-19.

Der kroatische Arzt und Wissenschaftler Ivan Đikić analysiert aktuelle Schwerpunkte der medizinischen Forschung, neue Bedrohungen wie Pandemien und welche Rolle die Gesundheitssysteme dabei spielen.

Dies ist der zwölfte Essay aus der Reihe *Big Ideas* der Europäischen Investitionsbank.

Auf Einladung der EIB schreiben internationale Vordenkerinnen und Vordenker über die drängendsten Themen unserer Zeit. Ihre Essays zeigen uns: Wir müssen umdenken, wenn wir die Umwelt schützen, die Chancengleichheit fördern und das Leben der Menschen weltweit verbessern wollen.

A futuristic DNA double helix structure. The two strands are made of glowing purple metallic tubes, connected by glowing blue and white spring-like structures. The background is dark with bokeh light effects.

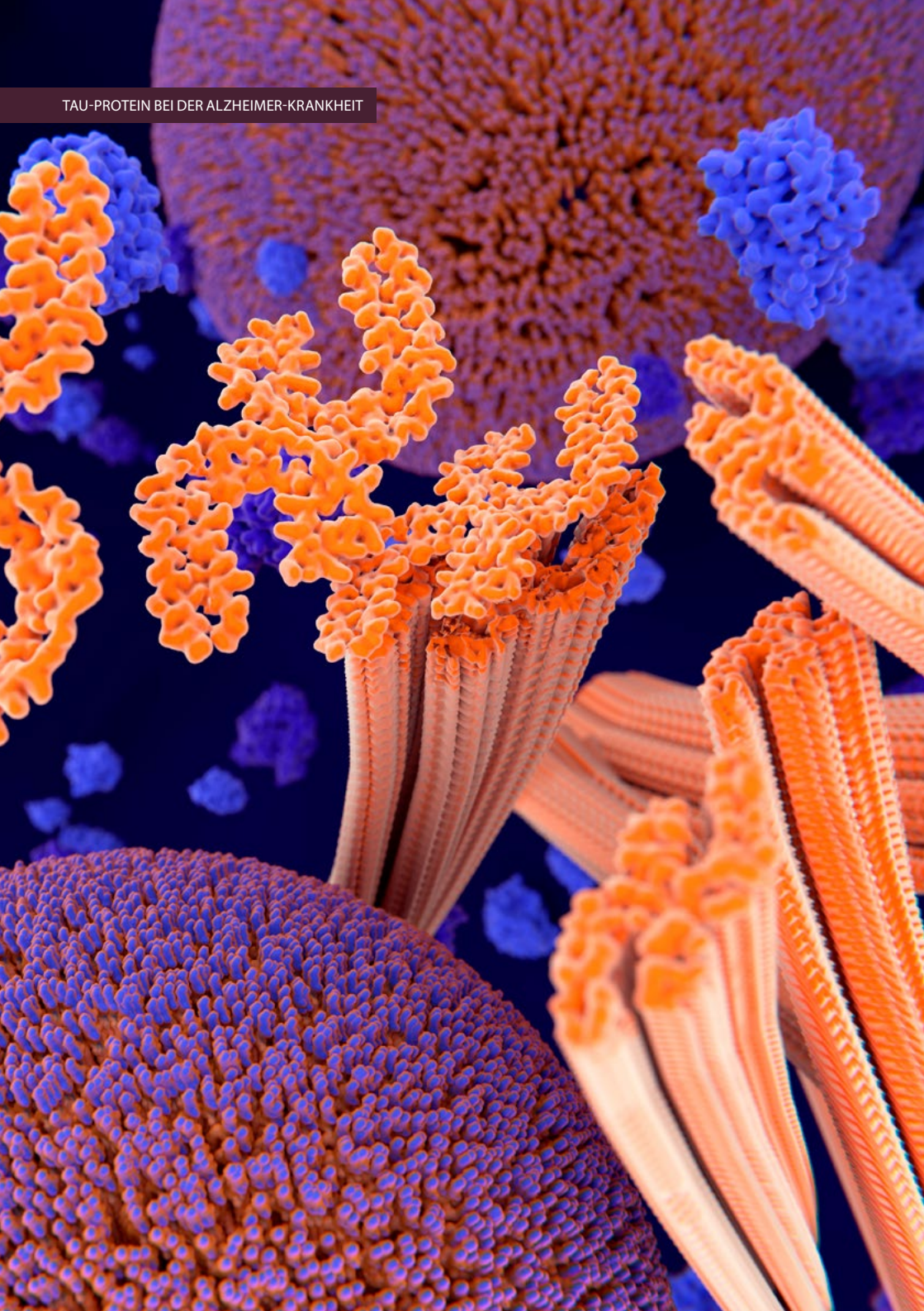
# **DIE GENOM- e-VOLUTION**

## DIE GENOM-e-VOLUTION

Mit der Entschlüsselung des menschlichen Genoms brach zu Beginn dieses Jahrtausends ein neues Zeitalter in der Biomedizin an. Heute ist die Genomsequenzierung so schnell und kostengünstig möglich, dass sie routinemäßig beim einzelnen Patienten angewendet werden kann. So lassen sich genetische Varianten ermitteln, die eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Krankheiten spielen, aber auch der Grund sind für die unterschiedliche Ansprache auf Therapien. Darüber hinaus haben die Nanotechnologie und die Robotik innovative therapeutische Instrumente und leistungsfähige Diagnoseverfahren hervorgebracht – etwa die Analyse der Gesamtheit der menschlichen Proteine (Proteomik) oder die digitale Verarbeitung hochauflösender Gewebebilder. Das erleichtert die Diagnose erheblich, weil erste Anzeichen einer Erkrankung zuverlässig erkannt werden. Diese Technologien betrachten verschiedene krankhafte Veränderungen im Zeitverlauf und liefern ein vollständigeres Bild des individuellen Zustands eines Patienten. Dank technischer Fortschritte und der Genomevolution in der Medizin können wir heute eine Diagnostik anbieten, die besser auf den einzelnen Patienten zugeschnitten ist – und wir haben wirksamere Therapien mit geringeren Nebenwirkungen. Solche Ansätze der „Präzisionsmedizin“ bringen Fortschritte im Gesundheitswesen und verlängern insgesamt das Leben der Bevölkerung.

**“ Die aktuelle Covid-19-Pandemie zeigt schmerzhaft, wie anfällig unsere Systeme sind. Neben unvorhersehbaren Bedrohungen durch neue Viren stellen demografische Veränderungen Europa vor drängende Probleme, vor allem die Urbanisierung, die alternde Bevölkerung, gesellschaftliche Entwicklungen und neurodegenerative Erkrankungen, die nicht heilbar sind.**

TAU-PROTEIN BEI DER ALZHEIMER-KRANKHEIT





Trotz dieser Erfolge stehen wir im Gesundheitswesen weiter vor großen Herausforderungen. Die aktuelle Covid-19-Pandemie zeigt schmerzhaft, wie anfällig unsere Systeme sind. Neben unvorhersehbaren Bedrohungen durch neue Viren stellen demografische Veränderungen Europa vor drängende Probleme, vor allem die Urbanisierung, die alternde Bevölkerung, gesellschaftliche Entwicklungen und neurodegenerative Erkrankungen, die nicht heilbar sind. Hinzu kommen steigende Anforderungen im Beruf, chronischer Arbeitsstress und die Verbreitung neuartiger Krankheiten durch die Globalisierung. Angesichts dieser und anderer Faktoren bleibt die Gesundheitsförderung eine der wichtigsten Aufgaben moderner Gesellschaften.

Für die Europäische Union und ihre Mitgliedstaaten hat Gesundheit hohe Priorität. Im Rahmen des EU-Gesundheitsprogramms bemühen sich die Länder, ihr Gesundheitswesen weiter zu stärken. Außerdem fördern sie Maßnahmen zur Gesundheitsaufklärung, damit die Bevölkerung besser informiert ist und sich besser schützt. Dieser Essay befasst sich mit den wissenschaftlichen und technischen Fortschritten, die neue Therapiechancen für schwere Krankheiten eröffnen und die Gesundheit in Europa und weltweit sichern helfen.

# LEBENSSTIL UND KLIMAWANDEL GEFÄHRDEN UNSERE GESUNDHEIT



## LEBENSSTIL UND KLIMAWANDEL GEFÄHRDEN UNSERE GESUNDHEIT

Nicht übertragbare Krankheiten wie Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs sind weltweit die häufigste Todesursache. Zusammen mit chronischen Atemwegserkrankungen und psychischen Störungen sind sie für etwa 86 Prozent der Todesfälle und 77 Prozent der Krankheitslast in Europa verantwortlich.<sup>[1]</sup> Bei den meisten dieser Krankheiten könnte ein gesunder Lebensstil die Zahl der frühzeitigen Todesfälle drastisch reduzieren. Verzicht auf das Rauchen und zu viel Alkohol, eine gesunde Ernährung und regelmäßige Bewegung sind nur einige Beispiele dafür. Der Erfolg von Präventionskampagnen lässt sich am besten an den ersten Anti-Tabak-Kampagnen und Werbeverböten in den 1970er-Jahren belegen, nach denen der Lungenkrebs zurückging. Die meisten nicht übertragbaren Krankheiten verlaufen chronisch, was – in Verbindung mit einer alternden Bevölkerung – das Gesundheitswesen zunehmend belastet.

Darüber hinaus beeinträchtigen der verstärkte internationale Reiseverkehr, die Mobilität und der weltweite Handel (vor allem mit Nahrungsmitteln) zusammen mit dem Klimawandel und der Umweltverschmutzung die Lebensbedingungen und fördern die Ausbreitung von Infektionskrankheiten. Die größte Belastung für unsere Gesellschaften stellt dabei die Grippe dar, gefolgt von Tuberkulose und HIV.<sup>[2]</sup> So fallen der normalen Grippewelle alljährlich rund 44 000 Menschen in Europa zum Opfer. Die offensichtliche Schwäche unserer Gesundheitssysteme bei der Reaktion auf Infektionskrankheiten und Pandemien ist besorgniserregend. Das gilt vor allem für die aktuelle Covid-19-Pandemie, aber auch für die jüngsten Ebola- und Zika-Ausbrüche.

**“ Nicht übertragbare Krankheiten wie Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs sind weltweit die häufigste Todesursache. Zusammen mit chronischen Atemwegserkrankungen und psychischen Störungen sind sie für etwa 86 Prozent der Todesfälle und 77 Prozent der Krankheitslast in Europa verantwortlich.**

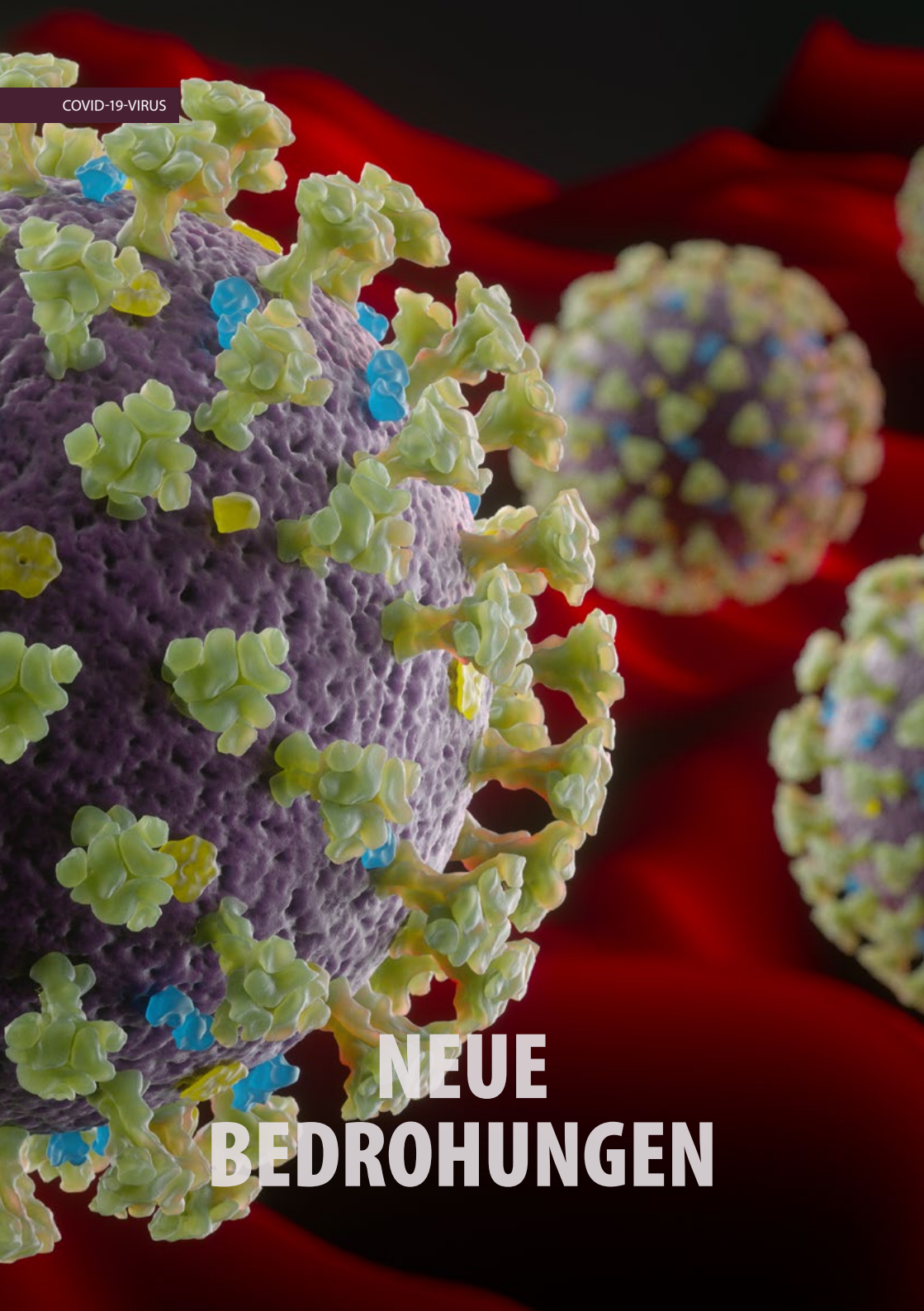


Extreme Wetterereignisse beeinträchtigen schon jetzt die Gesundheit und das Wohlbefinden insbesondere älterer Menschen in Europa. Gleichzeitig beeinflusst der Klimawandel mit seinen Folgen für die Ökosysteme auch die regionale Verbreitung von Infektionskrankheiten. In Europa ist künftig mit mehr Infektionen durch subtropische und tropische Erreger zu rechnen.<sup>[3]</sup> Ebenso steigt die Gefahr durch antibiotikaresistente Bakterien und die Rückkehr von Viruserkrankungen, die in Europa bereits als ausgerottet oder fast ausgerottet galten, darunter so hochansteckende Krankheiten wie die Kinderlähmung und die Masern.

**“ Extreme Wetterereignisse beeinträchtigen schon jetzt die Gesundheit und das Wohlbefinden insbesondere älterer Menschen in Europa. Gleichzeitig beeinflusst der Klimawandel mit seinen Folgen für die Ökosysteme auch die regionale Verbreitung von Infektionskrankheiten.**

COVID-19-VIRUS

# NEUE BEDROHUNGEN



## NEUE BEDROHUNGEN

Der aktuelle Covid-19-Ausbruch dokumentiert sowohl das Potenzial als auch die Grenzen des wissenschaftlichen Fortschritts. Als Ende Dezember 2019 in China eine Lungenentzündung unbekannter Ursache auftrat, dauerte es buchstäblich nur wenige Tage oder Wochen, bis Covid-19 isoliert, seine vollständige RNA-Sequenz veröffentlicht und molekulare Einzelheiten bekannt waren. Es folgte ein beispielloser weltweiter Informationsaustausch – nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch zwischen Verlagshäusern, Regierungen und Gesundheitsbehörden. Und doch war nicht zu verhindern, dass sich Covid-19 zu einer Pandemie auswuchs. Der Hauptgrund dafür ist unser globalisierter Lebensstil. Hinzu kam, dass öffentliche Gesundheitssysteme weltweit nicht einheitlich und gemeinsam auf die sich ausbreitende Pandemie reagierten. In einer solchen Situation richtet sich der Blick auf die Wissenschaft, aber wissenschaftlicher Fortschritt braucht Zeit – vor allem die Entwicklung neuer Impfstoffe und Arzneimittel. Nach derzeitigen Prognosen benötigt die wissenschaftliche Weltgemeinschaft noch mindestens ein Jahr, bis wir einen sicheren und wirksamen Impfstoff haben und damit die Ausbreitung des Virus tatsächlich stoppen können.

Im Lichte der Covid-19-Pandemie erscheint es nun noch paradoxer, dass die Ablehnung von Impfungen eine Gefahr für die öffentliche Gesundheit in Europa darstellt. Leider reicht bei einigen Viruskrankheiten der Anteil der geimpften Personen nicht mehr aus, um Schutz zu bieten. So kommt es jetzt wieder zu schweren Ausbrüchen der Masern und anderer übertragbarer Krankheiten, gegen die wir sichere und wirksame Impfstoffe haben. Die Masern zählen zu den ansteckendsten Infektionskrankheiten und können bei Kindern zu schweren oder gar tödlichen Komplikationen führen. In Europa haben wir im Vergleich zu Entwicklungsländern zwar wenig Todesfälle, sie sind in den letzten Jahren aber kontinuierlich gestiegen.<sup>[4]</sup> Für die wachsende Ablehnung von Impfstoffen sind zum Teil sowohl die Wissenschaft als auch die Medien mitverantwortlich. Als die Falschbehauptung über einen Zusammenhang zwischen bestimmten Impfstoffen und Autismus weltweit für Schlagzeilen sorgte, dauerte es zu lange, bis die Wissenschaft die Behauptung widerlegte – und in den Medien fand sie dann kein Gehör mehr. Zudem gelang der Wissenschaft in diesem Fall keine effiziente Selbstkorrektur. Letztendlich dauerte es zwölf Jahre, bis der fehlerhafte Artikel von der renommierten medizinischen Fachzeitschrift *The Lancet* zurückgezogen wurde. Und diese Zeit wussten die Impfgegner für sich zu nutzen.

DAS FOMO-SYNDROM (FEAR OF MISSING OUT) UND NOMOPHOBIE (NO-MOBILE-PHONE-PHOBIE) SIND ZWEI NEUARTIGE STÖRUNGEN, DEREN URSACHE IN DER DIGITALISIERUNG LIEGT.





Zu alledem kommt noch eine weitere Herausforderung hinzu: der digitale Wandel der Gesellschaft. Dieser Wandel bringt für verschiedene Altersgruppen unterschiedliche Belastungen mit sich – von zunehmender sozialer Isolation über eine sitzende Lebensweise bis hin zu Depressionen und Fehlkommunikation. Die Digitalisierung der Gesellschaft führt zu neuartigen Störungen, wie dem FOMO-Syndrom (Fear of missing out), der Angst, etwas zu verpassen, und der Nomophobie (No-mobile-phone-Phobie), der Angst, nicht über das Smartphone erreichbar zu sein. 2018 erklärte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Computerspielsucht zur Krankheit.

Die Art und Weise, wie jüngere Generationen bestehende und neue Technologien nutzen, wird sich dauerhaft auf ihre körperliche und geistige Gesundheit auswirken.

**“ Dieser Wandel bringt für verschiedene Altersgruppen unterschiedliche Belastungen mit sich – von zunehmender sozialer Isolation über eine sitzende Lebensweise bis hin zu Depressionen und Fehlkommunikation.**

# MASCHINELLES LERNEN FÜR NEUE THERAPIEN

Neue Technologien bieten die Chance auf Fortschritte in der Medizin. Sie ermöglichen eine schnellere, präzisere Diagnose vieler Krankheiten, sodass die Behandlung früher beginnen kann. Dank der revolutionären Omik-Technologien<sup>[5]</sup> stellt der Zugriff auf die relevanten Patientendaten keinen Engpass mehr dar. Die größte Schwierigkeit liegt vielmehr in der Integration und Interpretation der Daten. Hier ruht die Hoffnung auf den Computerwissenschaften und künstlicher Intelligenz (KI). Algorithmen für maschinelles Lernen sind mittlerweile weit entwickelt: Sie können helfen, auf Basis der Integration und Interpretation von Daten neue Behandlungsstrategien zu entwickeln und die Reaktion der Patienten auf Therapien zu überwachen. So nutzt man die Einzelzell-Sequenzierung, Genomvergleiche (zwischen einzelnen Personen und im Krankheitsverlauf), digitale bildgebende Verfahren und die klinische Proteomik<sup>[6]</sup> heute, um bestimmte Lungenkrankheiten oder Brustkrebszellen zu

**“ Algorithmen für maschinelles Lernen sind mittlerweile weit entwickelt: Sie können helfen, auf Basis der Integration und Interpretation von Daten neue Behandlungsstrategien zu entwickeln und die Reaktion der Patienten auf Therapien zu überwachen.**

erkennen. Anhand bildgebender Daten sind KI-Systeme bereits in der Lage, Krankheiten so zuverlässig wie ein Arzt zu diagnostizieren – wenn nicht gar besser. Noch vor wenigen Jahren hielten das viele Fachleute für unwahrscheinlich.

Die großen Pharmaunternehmen stehen bei der Arbeit mit KI noch eher am Anfang, aber eine wachsende Zahl von Start-ups setzt mittlerweile auch in der Wirkstoffforschung auf maschinelles Lernen. 2017 ermittelte der BenchSci Blog<sup>[7]</sup> 37 Start-up-Unternehmen, die KI für die Entwicklung neuer Arzneimittel nutzen. 2019 waren es schon 177. Insgesamt haben diese Unternehmen

62 Arzneimittel in der Pipeline, einzelne davon befinden sich bereits im fortgeschrittenen Stadium der klinischen Entwicklung. Neben der Hilfe beim Design neuer zielgerichteter Therapien dürfte KI auch die systematische Indikationserweiterung bei bestehenden Arzneimitteln voranbringen.

## LANGFRISTIGE INVESTITIONEN IN GRUNDLAGENFORSCHUNG – DAS BEISPIEL HIV

HIV ist ein hervorragendes Beispiel dafür, welche Fortschritte wir mit Grundlagenforschung und modernen Technologien in der öffentlichen Gesundheit erzielt haben. Aber HIV zeigt auch, dass sich wissenschaftliche Erfolge manchmal erst nach Jahrzehnten einstellen und dass sich Geduld und Beharrlichkeit am Ende lohnen. AIDS entwickelte sich Anfang der 1980er-Jahre zur Pandemie. Einige Jahre später identifizierte ein Forschungsteam am Institut Pasteur in Paris das HIV-Virus. Damit wurde es möglich, bis 1985 den ersten kommerziellen HIV-Test zu entwickeln. Als genauere Kenntnisse über die Art der Infektion vorlagen, wurden weltweit Präventionskampagnen gestartet, durch die es in Verbindung mit Virentests gelang, die Ausbreitung von AIDS einzudämmen.

Das erste Mittel gegen HIV, Azidothymidin, wurde ursprünglich zur Behandlung von Krebs entwickelt. Es verringert opportunistische Infektionen bei HIV-Patienten und damit die Zahl der Todesfälle durch AIDS. Durch Azidothymidin bessern sich die Symptome von AIDS, und die Krankheit führt seltener zum Tod, aber das Virus verschwindet dadurch nicht. Im Gegenteil: Schon bald traten Viren auf, die gegen die Behandlung resistent waren. Trotz großer Ankündigungen und massiver Investitionen in die Forschung dauerte es noch einmal fast zehn Jahre, bis die US-Arzneimittelbehörde FDA 1995 die ersten maßgeschneiderten Inhibitoren anderer wichtiger HIV-Enzyme zuließ. Danach folgten bald wirksamere Medikamente und es zeigte sich, dass das Virus beherrschbar ist und sich durch die kombinierte Behandlung mit mehreren Präparaten unter die Nachweisgrenze drücken lässt. Die Geschichte von HIV und AIDS ist nicht nur eine der Grenzen der Wissenschaft, sondern auch eine der weltweiten Ungleichheiten im Zugang zur Gesundheitsversorgung. Während die Todesfälle im Zusammenhang mit AIDS seit dem Spitzenwert 2004 um mehr als 55 Prozent zurückgegangen sind, steigt die Zahl der Neuinfektionen in manchen Ländern weiter an. Besonders schwierig ist die Lage in Afrika, wo 25,7 Millionen Menschen mit HIV leben. In Europa sind es 2,4 Millionen, weltweit 37,9 Millionen.<sup>[8]</sup>

“ Die Geschichte von HIV und AIDS ist nicht nur eine der Grenzen der Wissenschaft, sondern auch eine der weltweiten Ungleichheiten im Zugang zur Gesundheitsversorgung.



PROTEIN-CLUSTER

**JEDE KRANKHEIT  
IST ANDERS**

## JEDE KRANKHEIT IST ANDERS

In den ersten zwanzig Jahren dieses Jahrhunderts haben wir grundlegende Erkenntnisse darüber gewonnen, in welchem Zusammenhang genetische Variationen und Symptome bei verschiedenen häufigen Krankheiten stehen. Die Forschung in diesem Bereich wurde stark unterstützt, mit Geldern von europäischen Förderinstituten und wohltätigen Organisationen wie dem Wellcome Trust – einer der größten gemeinnützigen Stiftungen im Vereinigten Königreich, die sich für die medizinische Forschung engagiert.<sup>[9]</sup> Bei der Übertragung all dieses Wissens in eine bessere Diagnostik, neue Arzneimittel und neue Therapien stehen wir aber noch ganz am Anfang. Die Funktion vieler Teile des Genoms ist nach wie vor völlig unklar. Das gilt unter anderem für den Großteil des Genoms, der keine Gencodierung für Proteine enthält und lange als evolutionärer „Ballast“ galt. Wir wissen, welche genetischen Variationen bei Menschen zu Krankheiten führen. Oft sind es Variationen nur eines Nucleotids, sogenannte Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs), aber in den meisten Fällen verstehen wir nicht, wie eine bestimmte Variation die normale Funktion verändert. Ebenso wenig wissen wir, welchen Einfluss die vielen anderen genetischen Variationen haben, die einzelne Menschen vermutlich aufweisen, und wie sie mit der Lebensweise und Umweltfaktoren zusammenwirken. Wenn wir die molekularen Mechanismen klären und ihre Regulation und Wechselwirkung in unterschiedlichen Kontexten verstehen, können wir Unterschiede zwischen Patienten erkennen und individuelle therapeutische Strategien entwickeln.



# **MIT ALGORITHMEN GEGEN KREBS?**

## MIT ALGORITHMEN GEGEN KREBS?

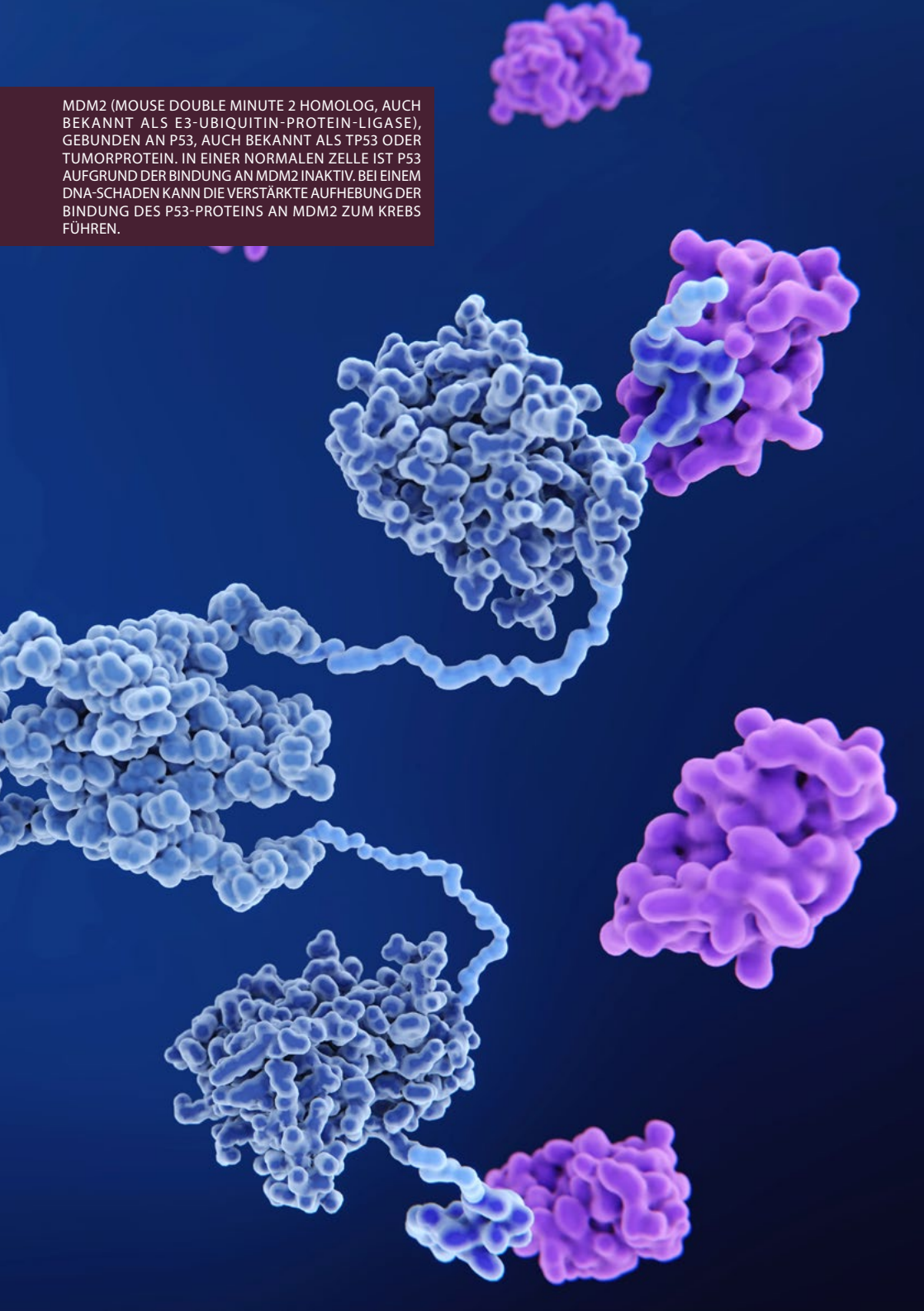
Die Entwicklung von Krebs ist beim Menschen ein mehrstufiger Prozess, gekennzeichnet durch genetische Instabilität und Zellveränderungen, die von der Zufälligkeit und Unvorhersagbarkeit der beschleunigten Evolution angetrieben werden. Krebs ist keine einzelne Krankheit, sondern eine spezifische Konstellation genetischer oder molekularer Veränderungen, die zur unkontrollierten Vermehrung bestimmter Zellen und schließlich zu physiologischen Störungen führen. Entsprechend besteht ein Tumor aus Tausenden von unterschiedlichen entarteten Zellen, was die Behandlung so schwierig macht – eine ernüchternde Erkenntnis, aber wir haben in den letzten Jahrzehnten auch große Fortschritte in der Behandlung von Tumoren gemacht.

Bislang werden Krebspatienten normalerweise mit Medikamenten behandelt, die das Zellwachstum stark hemmen. Diese sogenannte Chemotherapie hat üblicherweise heftige Nebenwirkungen, weil sie das gesamte Zellwachstum im Körper beeinträchtigt. Die Behandlung greift den Körper so stark an und ist so unspezifisch, dass Krebspatienten heute wohl am stärksten von den neuen Erkenntnissen in der Molekularbiologie profitieren.

Bahnbrechende Erkenntnisse über die molekularen Mechanismen der Krebsentstehung haben die Tumorthapie revolutioniert. Konventionelle Ansätze wie die Strahlen- und die Chemotherapie spielen zwar weiter eine zentrale Rolle beim Abtöten von Krebszellen; sie werden heute aber vermehrt mit zielgerichteten Behandlungen kombiniert, seit Kurzem auch erfolgreich mit Immuntherapien. Auch in der Diagnostik ist ein Quantensprung gelungen – mit dem Monitoring von Biomarkern im Blut und Gentests auf relevante Mutationen. Mit diesen Tests lässt sich frühzeitig erkennen, ob ein Erkrankungsrisiko besteht oder bereits eine Erkrankung vorliegt. Sie ermöglichen es auch, den Tumor genau zu bestimmen. Da viele Krebserkrankungen in einem frühen Stadium gut behandelbar sind, verspricht die frühzeitige Diagnose auf kurze Sicht den größten Effekt auf die Überlebenschancen der Patienten.

**“ Krebspatienten profitieren heute wohl am stärksten von den neuen Erkenntnissen in der Molekularbiologie. Auch in der Diagnostik ist ein Quantensprung gelungen – mit dem Monitoring von Biomarkern im Blut und Gentests auf relevante Mutationen.**

MDM2 (MOUSE DOUBLE MINUTE 2 HOMOLOG, AUCH BEKANNT ALS E3-UBIQUITIN-PROTEIN-LIGASE), GEBUNDEN AN P53, AUCH BEKANNT ALS TP53 ODER TUMORPROTEIN. IN EINER NORMALEN ZELLE IST P53 AUFGRUND DER BINDUNG AN MDM2 INAKTIV. BEI EINEM DNA-SCHADEN KANN DIE VERSTÄRKTE AUFHEBUNG DER BINDUNG DES P53-PROTEINS AN MDM2 ZUM KREBS FÜHREN.





Die gezielte Behandlung von Tumoren begann zunächst mit der Hemmung bestimmter Onkoproteine, die an der Regulation des Zellwachstums beteiligt sind. Dazu verabreichte man beispielsweise monoklonale Antikörper, die Wachstumsrezeptoren auf der Oberfläche von Krebszellen blockieren.<sup>[10]</sup> Ein bekanntes Beispiel ist Trastuzumab (Herceptin®), das erste zugelassene Medikament für die zielgerichtete Therapie von HER2-positivem Brustkrebs. Andere Medikamente enthalten kleine chemische Verbindungen, die die fehlgesteuerte Signalweiterleitung der Rezeptoren blockieren. Ein Beispiel dafür ist Vemurafenib (Zelboraf®), ein chemischer Inhibitor des Zellwachstumsregulators B-Raf. Mit dem Medikament werden Melanome behandelt, bei denen eine Mutation im B-Raf-Gen ein unkontrolliertes Zellwachstum verursacht. Gegenwärtig gibt es über zwanzig zielgerichtete Therapien, die eingesetzt werden und bereits Millionen Patienten geholfen haben. Ein großes Problem ist allerdings die rasche Tumorresistenz gegen die Behandlung – häufig binnen Monaten, nachdem Patienten anscheinend tumorfrei waren. Deshalb versucht man, verschiedene Varianten des ursprünglichen Medikaments gegen die neu entstandenen Tumoren einzusetzen, die gegen den ursprünglichen Wirkstoff resistent sind. Außerdem werden zunehmend zwei oder mehr gezielte Therapien miteinander kombiniert, um den Krebs von Beginn an möglichst effektiv zu bekämpfen.

DENDRITISCHE ZELLE. DENDRITISCHE ZELLEN SIND BESTANDTEIL DES IMMUNSYSTEMS. ES HANDELT SICH UM ANTIGENPRÄSENTIERENDE ZELLEN (APCS), D. H. SIE PRÄSENTIEREN ANDEREN ZELLEN DES IMMUNSYSTEMS PATHOGENE ODER FREMDE MOLEKÜLE (ANTIGENE), DAMIT DIESE BESEITIGT WERDEN



# PERSONALISIERTE KREBSTHERAPIEN

## PERSONALISIERTE KREBSTHERAPIEN

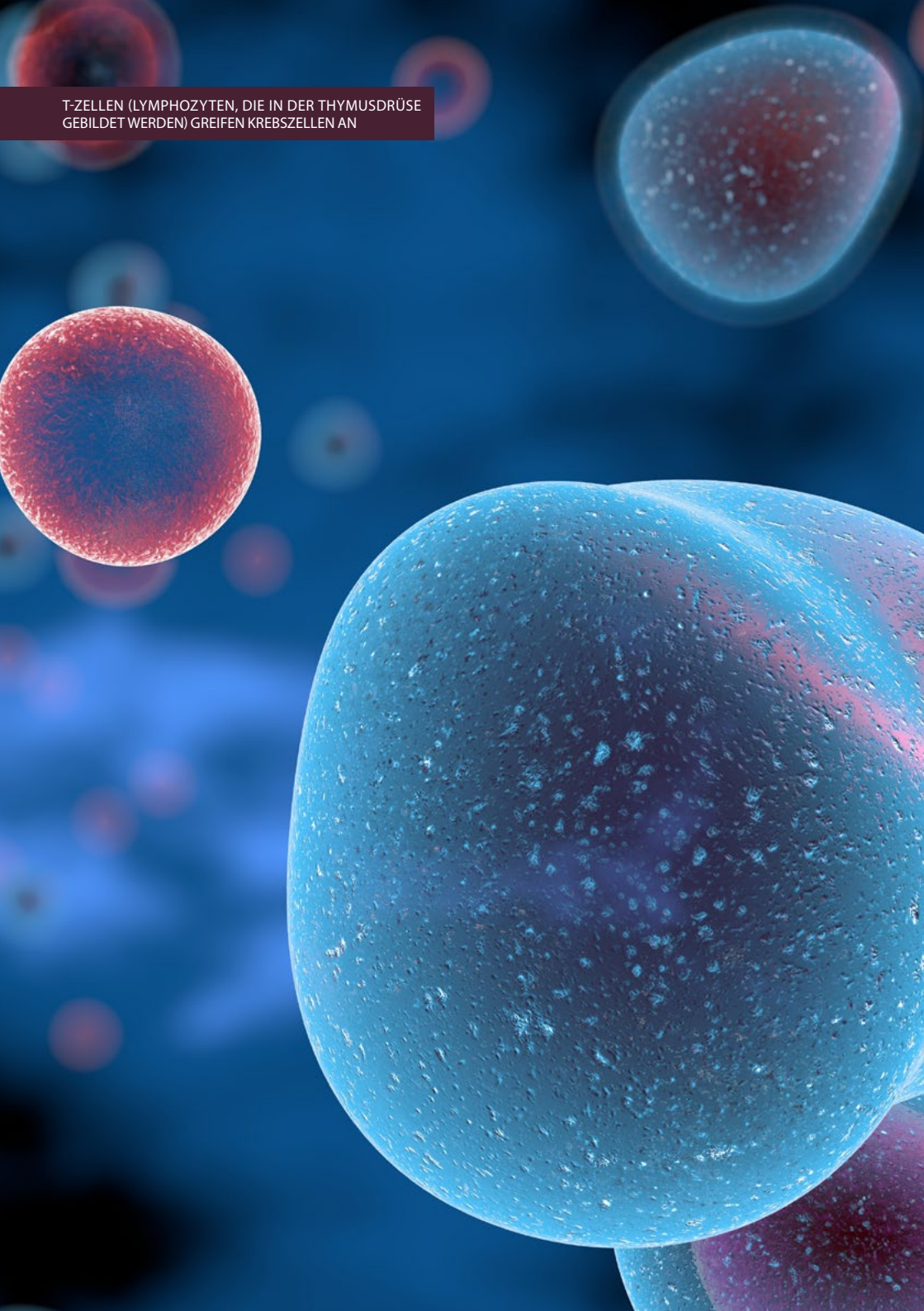
Weitere Fortschritte in der Behandlung von Krebs verspricht die Immuntherapie. Sie zielt darauf ab, das Immunsystem von Patienten scharfzustellen, sodass es Tumorzellen erkennen und zerstören kann. Sogenannte Checkpoint-Inhibitoren machen Immunzellen zur körpereigenen Waffe gegen den Tumor. Ein ähnlicher Ansatz beruht darauf, Immunzellen genetisch zu verändern und sie damit quasi in eine Wunderwaffe zu verwandeln, die Tumorzellen gezielt erkennt und vernichtet. Die Immuntherapie und die dafür entwickelten Medikamente, die gezielt auf molekularer Ebene wirken, werden die Behandlung metastasierter Krebserkrankungen revolutionieren – die Daten aus aktuellen klinischen Studien sind äußerst positiv.

Doch trotz dieser unbestreitbaren Erfolge werden die Fortschritte in der Öffentlichkeit erst allmählich gewürdigt. Ein Grund ist, dass Krebs – gerade wenn er erst in einem späten Stadium erkannt wird und bereits gestreut hat – nach wie vor die zweithäufigste

Ursache für einen vorzeitigen Tod ist. Leider sind Tumoren äußerst komplex und vielfältig, kaum zwei sind gleich. Die wirksamste gezielte Therapie zu finden, bleibt daher eine schwierige Aufgabe. Gleichzeitig sind Tumorzellen genetisch instabil und mutieren häufig, sodass sie ihre Zusammensetzung unter der Behandlung rasch verändern und dadurch oft gegen die verabreichten Medikamente resistent werden. Aber wir bewegen uns geradezu in Lichtgeschwindigkeit auf personalisierte Behandlungsansätze zu und werden in den nächsten zehn Jahren viele grundlegende Veränderungen in der Krebstherapie sehen, zumal wenn kostengünstigere Technologien die routinemäßige Analyse des gesamten Tumorgenoms und -proteoms ermöglichen.

**“ Die Immuntherapie zielt darauf ab, das Immunsystem von Patienten scharfzustellen, sodass es Tumorzellen erkennen und zerstören kann. Ein ähnlicher Ansatz beruht darauf, Immunzellen genetisch zu verändern und sie damit quasi in eine Wunderwaffe zu verwandeln, die Tumorzellen gezielt erkennt und vernichtet.**

T-ZELLEN (LYMPHOZYTEN, DIE IN DER THYMUSDRÜSE  
GEBILDET WERDEN) GREIFEN KREBSZELLEN AN



Personalisierte Ansätze in der Krebstherapie erfordern erhebliche Investitionen in Technologien für die Analyse, Datenintegration und die Entwicklung neuer Prognosealgorithmen. Sobald wir die Mutationsprofile einzelner Tumoren besser kennen, wird die Forschung sich neue Ziele setzen und neue Medikamente entwickeln. Mit Hochdurchsatz-Screening-Technologien (HTS)<sup>[11]</sup> und der Genschere CRISPR/Cas9 zur gezielten Veränderung bestimmter Genabschnitte stehen heute gute Instrumente zur Verfügung, um Angriffspunkte bei Tumorzellen zu finden. Damit lässt sich besser vorhersagen, wie gut ein Tumor auf bestimmte Wirkstoffkombinationen anspricht. Möglicherweise lassen sich sogar Mutationen bei erblichen Krebsarten oder anderen vererbaren Krankheiten korrigieren. Diese Technologien öffnen auch die Tür zum systematischen Einsatz bereits zugelassener Arzneimittel für andere Indikationen, weil sich testen lässt, welche Kombination gegen bestimmte Tumoren am besten wirkt. Das könnte den langen Weg bis zur klinischen Anwendung neuartiger Therapiekonzepte erheblich verkürzen.

A close-up photograph of four elderly women of diverse ethnicities laughing heartily. They are all wearing red clothing. The woman at the top has voluminous white curly hair. The woman on the right has dark curly hair. The woman on the left has short grey hair. The woman in the center has short grey hair and is wearing a red leather jacket. The background is a solid, vibrant red color.

**DIE  
WELTBEVÖLKERUNG  
WIRD ÄLTER**

## DIE WELTBEVÖLKERUNG WIRD ÄLTER

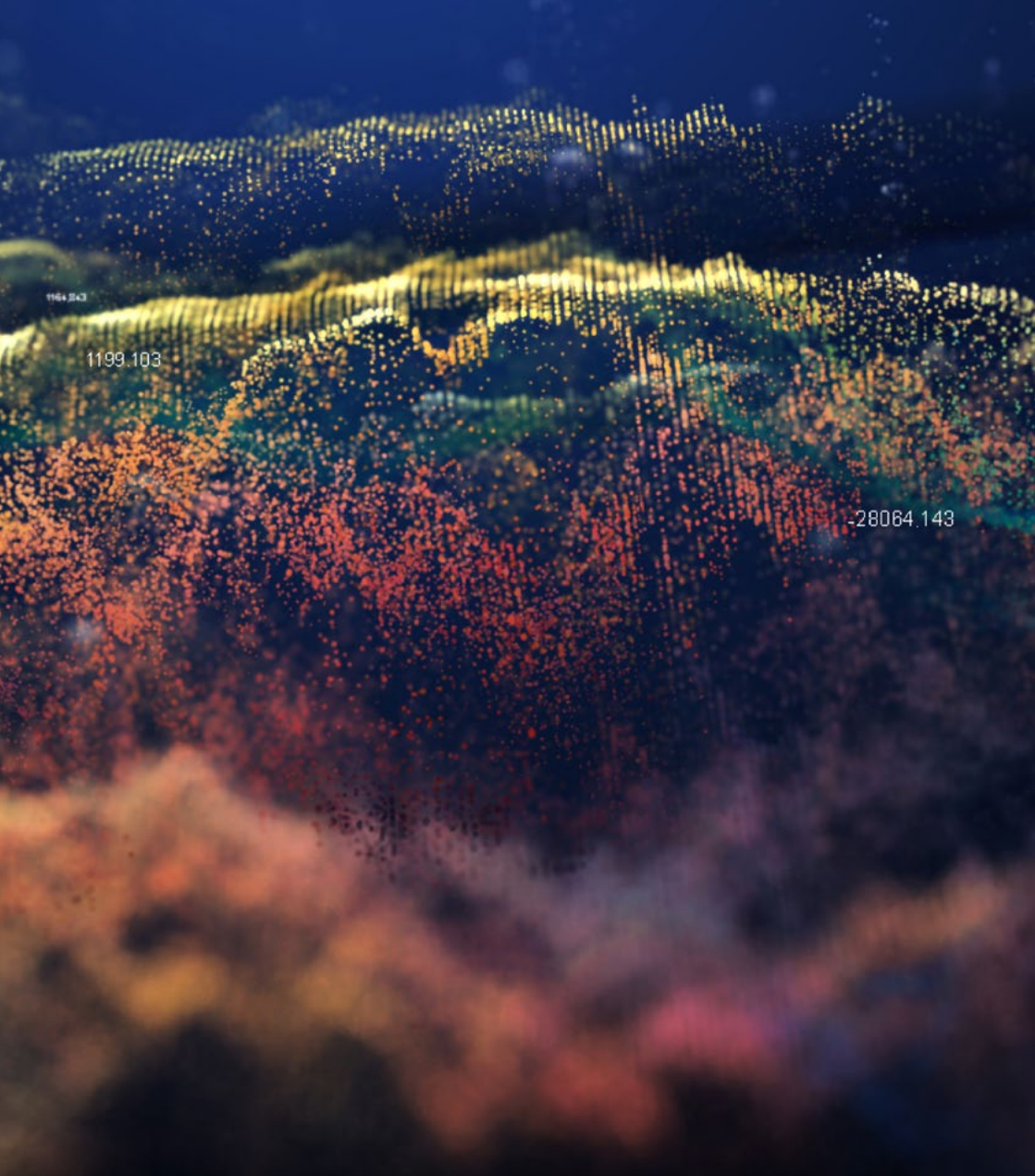
Die Zahl der über 60-Jährigen dürfte sich bis 2050 auf rund 2,1 Milliarden Menschen weltweit verdoppeln. Besonders stark ist der Anstieg in Japan und der EU.<sup>[12]</sup> Mit der alternden Bevölkerung rückt ein weiteres Feld in den Blickpunkt der Medizin: neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson und Demenz. Die Betroffenen leiden an einem fortschreitenden Abbau von Nervenzellen im Gehirn und/oder im Rückenmark, was die motorischen oder geistigen Fähigkeiten oder beide beeinträchtigt. Gegen Mitte des 21. Jahrhunderts werden neurodegenerative Erkrankungen, vor allem Alzheimer, zu einer Krise in der Gesundheitsversorgung führen, das ist absehbar. Bis 2050 wird sich die Zahl der Patienten, die an derartigen Krankheiten leiden, voraussichtlich mehr als verdreifachen – eine gewaltige Belastung für die betroffenen Familien, das öffentliche Gesundheitswesen und die Gesellschaft insgesamt.

Neuronale Degenerationen werden überwiegend durch schädliche Ablagerungen hervorgerufen, häufig verklumpte Proteine. Sie schädigen Funktionsbereiche innerhalb der Zellen, die sogenannten Organellen (Mitochondrien, endoplasmisches Reticulum, Lysosomen) langlebiger Nervenzellen. Dies führt zu einer allmählich fortschreitenden

Schädigung und schließlich zum Absterben bestimmter Neuronengruppen im Gehirn. Nachdem dies bekannt ist, will die Forschung nun herausfinden, welche sehr frühen Ereignisse in der Neurodegeneration verhindert werden können, bevor sich die Schädigungen häufen und zu einem massiven Verlust an Nervenzellen führen. Eine schwierige Aufgabe, keine Frage. Denn die Therapie müsste, um erfolgreich zu sein, möglicherweise schon zehn bis zwanzig Jahre vor den ersten Symptomen beginnen – nämlich dann, wenn die ersten Ablagerungen auftreten. Derzeit fehlt uns noch die geeignete nichtinvasive Diagnostik, um dieses Stadium beispielsweise mittels Massenscreening der gesamten Bevölkerung zu erkennen. Sobald das Absterben von Nervenzellen begonnen hat, lässt sich der Dominoeffekt der Erkrankung kaum noch stoppen. So verkümmern bei Parkinson etwa 80 Prozent der dopaminergen Neuronen (Nervenzellen, die den Neurotransmitter Dopamin herstellen, der für ein normales

**“Gegen Mitte des 21. Jahrhunderts werden neurodegenerative Erkrankungen, vor allem Alzheimer, zu einer Krise in der Gesundheitsversorgung führen.“**

MENSCHLICHES GEHIRN IN DER  
3D-COMPUTERDARSTELLUNG





Funktionieren des Nervensystems erforderlich ist) schon, bevor erste klinische Symptome auftreten. Das deutet auf ein langes therapeutisches Zeitfenster hin. Ähnlich ist es bei Alzheimer: Die Schäden an den für unser Gedächtnis wichtigen Nervenzellen im Hippocampus beginnen oft schon viele Jahre, bevor die Zellen ihre Funktionsfähigkeit verlieren.

Bislang ist keine der genannten neurodegenerativen Erkrankungen heilbar. Ihre Behandlung beschränkt sich auf Symptome im Spätstadium und kann den Verlauf allenfalls bremsen. Die Gründe dafür sind vielfältig: Erstens ist das menschliche Gehirn unglaublich komplex. Es besteht aus rund 86 Milliarden Nervenzellen, die jeweils über etwa 7 000 Synapsen mit anderen Nervenzellen verbunden sind. Zweitens handelt es sich um langlebige Zellen, die sich nicht mehr teilen. Das macht sie auf Dauer anfällig für Schädigungen. Und drittens ist das Gehirn ein abgeschlossenes Organ, das für die Diagnose und die Behandlung mit herkömmlichen Medikamenten nur schwer zugänglich ist. So stellen neurodegenerative Erkrankungen heute eine der größten Herausforderungen für die Biomedizin dar.

**“ Neurodegenerative Erkrankungen stellen heute eine der größten Herausforderungen für die Biomedizin dar.**

Bis heute konzentriert sich die Entwicklung von Arzneimitteln gegen den Abbau von Nervenzellen auf chemische Verbindungen, Antikörper, Nukleinsäuren oder Proteine. Sie sollen schädliche Eiweißablagerungen verhindern oder möglichst sogar auflösen – etwa Alpha-Synuclein bei Parkinson und Amyloid-Plaques bei Alzheimer. Aber alle Versuche, die Ablagerungen mit den genannten Mitteln zu behandeln, sind bislang hinter den Erwartungen zurückgeblieben. Jetzt richtet sich die Aufmerksamkeit verstärkt auf die zelleigene Qualitätskontrolle, die für die Beseitigung schädlicher Ablagerungen oder beschädigter Organellen zuständig ist. Defekte dieser zellulären Kontrollsysteme können zum Abbau von Nervenzellen beitragen oder gar die Ursache dafür sein. Entsprechend kann es eine schützende Wirkung haben, wenn wir diese zelleigenen Mechanismen stärken. Einer dieser Mechanismen ist die Autophagie, mit der Zellen beschädigte oder schädliche Bestandteile abbauen. Neuartige Innovationsansätze zielen darauf ab, gefährliche Bestandteile zu kennzeichnen und die Autophagie-Maschinerie auf ihre Beseitigung auszurichten.

PFLEGE UND GESUNDHEITSVERSORGUNG IM KRANKENHAUS WERDEN VERSTÄRKT AUF DEM ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN ÄRZTEN UND ROBOTERN BERUHEN



**AUSBLICK**

## AUSBLICK

Die digitale Revolution hat bereits jetzt einen starken Einfluss auf die Patientenversorgung. Das beginnt mit den Unmengen von (nicht immer medizinisch verifizierten) Informationen im Internet und mobilen Apps, über die wir Gesundheitsdaten aufzeichnen und an Ärzte weiterleiten können (als Teil eines breiteren Trends zur Fernüberwachung von Patienten). Jetzt, da wir schnell und kostengünstig das gesamte Genom eines Menschen sequenzieren können, rücken maßgeschneiderte Therapien endlich in Reichweite.

Die beispiellosen Möglichkeiten, die Superrechner, maschinelles Lernen und KI eröffnen, lösen aber auch ethische Bedenken und tiefe Befürchtungen aus, was die Zukunft der Medizin betrifft. Nirgendwo treten sie so offen

**“ Die CRISPR/Cas9-Technologie ermöglicht äußerst genaue, schnelle und kostengünstige Eingriffe in das genetische Material lebender Organismen.**

zutage wie in der Gentechnik. Die bahnbrechende CRISPR/Cas9-Technologie<sup>[13]</sup> ermöglicht äußerst genaue, schnelle und kostengünstige Eingriffe in das genetische Material lebender Organismen. Sie eröffnet große Chancen, nicht nur in der Ökologie und der Nahrungsmittelproduktion, sondern auch bei der Suche nach den Ursachen von Krankheiten und neuen Therapien. Aber die Genschere kann auch missbraucht werden, um genetisch veränderte oder „optimierte“ Menschen zu schaffen. Außerdem bleibt unklar, ob es nicht doch zu sogenannten Off-Target-Effekten, also unerwünschten Fehlschnitten kommt, die Erbanlagen der behandelten Patienten schädigen.

CRISPR/Cas9 wurde erstmals 2012 in der Gentechnik eingesetzt. Sechs Jahre später wurde in China über die Geburt potenziell HIV-resistenter genetisch veränderter Babys berichtet, was als Verstoß gegen international etablierte forschungsethische Normen galt und weltweit scharf kritisiert wurde. Der verantwortliche Forscher wurde vor Kurzem wegen Verstoßes gegen das Gesetz über die Integrität der Forschung in China zu drei Jahren Haft verurteilt.<sup>[14]</sup> In 16 der 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union sind genetische Veränderungen der Keimbahn oder entsprechende Veränderungen von Spermien oder Eizellen zum Zwecke der Fortpflanzung verboten. Europäische Forscherinnen und Forscher gehören traditionell zu den ersten, die Bedenken über die Gefahren und ethischen Folgen der Gentechnik zu therapeutischen Zwecken äußern und darauf hinweisen, welche Probleme der breite Zugang zu Genomdaten und deren Nutzung mit sich bringen. Aber in einer globalisierten Welt lassen sich weder technische Durchbrüche noch die Folgen von deren Missbrauch an Landesgrenzen aufhalten.

ZERSTÖRUNG DES HUMANEN  
IMMUNDEFIZIENZ-VIRUS (HIV)



# INNOVATIVE THERAPIEN UND GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

# INNOVATIVE THERAPIEN UND GESELLSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

Zu den Bedenken über die Gentherapie und den möglichen Missbrauch persönlicher genetischer Daten, etwa durch Versicherungsgesellschaften oder Digitalunternehmen, kommen bei wissenschaftlichen und technischen Innovationen noch andere ethische Probleme hinzu. Viele der neuartigen Therapien sind mit immensen Kosten verbunden. Das belastet die knappen Gesundheitsbudgets zusätzlich und wirft Fragen auf, wie es mit dem Zugang zu einer hochwertigen, individuellen Versorgung und Ungleichheiten im Gesundheitssystem steht.

Medizinisch besteht auch eine klare Notwendigkeit, mehr Geld in die Erforschung seltener Krankheiten zu stecken, die von der Pharmaindustrie weitgehend vernachlässigt wird. Innovative Therapien für seltene Krankheiten sind oft astronomisch teuer, was nur zum Teil daran liegt, dass der Markt dafür so klein ist. Zumeist bestimmt eher die Einzigartigkeit als die Nachfrage den Preis, und dieses Problem lässt sich nur durch Regulierung lösen.

**“ Sind die Kosten für die Behandlung eines einzelnen Patienten gerechtfertigt, wenn mit der gleichen Summe Hunderte Menschen geheilt werden können, die an anderen Krankheiten leiden? ”**

Wenn maßgeschneiderte Therapien für häufige Krankheiten auf breiter Front eingeführt werden, müssen Ärzte sich immer öfter fragen: Sind die Kosten für die Behandlung eines einzelnen Patienten gerechtfertigt, wenn mit der gleichen Summe Hunderte Menschen geheilt werden können, die an anderen Krankheiten leiden? Sollte diese Behandlung vom öffentlichen Gesundheitssystem übernommen oder privat bezahlt werden? Ein Beispiel: Die zuvor beschriebenen modernen Krebstherapien mit genetisch veränderten Zellen der Patienten kosten mehrere hunderttausend Euro. Wenn die Behandlung jedoch wirksam bei den besonderen persönlichen Umständen der Erkrankung ansetzen und unter möglichst geringen Nebenwirkungen helfen soll, ist die individuelle Therapie ein Muss. Wir müssen deshalb darüber diskutieren, wie wir die finanziellen Hürden überwinden können. Eine ähnliche Debatte entzündete sich auch über die hohen Behandlungskosten für neue chronische Krankheiten, die zuvor tödlich waren und jetzt die lebenslange Einnahme teurer Medikamente erfordern – HIV-Infektionen etwa, die sich heute mit einer Kombination verschiedener Präparate in Schach halten lassen. Wir kommen also nicht daran vorbei, uns mit einigen äußerst schwierigen Fragen auseinanderzusetzen. Und ein noch viel drängenderes Thema haben wir noch nicht einmal angeschnitten: Wie lässt sich weltweit eine akzeptable Gesundheitsversorgung und der Zugang dazu sicherstellen?

**OPEN ACCESS:  
FREIER ZUGANG ZU  
FORSCHUNGSWISSEN**


## OPEN ACCESS: FREIER ZUGANG ZU FORSCHUNGSWISSEN

Gibt es eine Lösung, um die hohen Gesundheitskosten unter Kontrolle zu halten? Nachhaltige Gesundheitssysteme könnten auf diesen Grundsätzen beruhen: hohe Standards, faire Preise, effiziente Organisation, offene Forschung, eine gut informierte Öffentlichkeit und gut ausgebildete Fachkräfte.

Aus wissenschaftlicher Sicht würde der freie Zugang zu Forschungsergebnissen die Kosten von Medikamenten deutlich senken und sollte deshalb für öffentlich finanzierte Forschung zur Pflicht werden. Das internationale Humangenomprojekt, an dem Forscherinnen und Forscher aus aller Welt mitarbeiteten, war wegweisend in der Veröffentlichung einer kompletten Genomsequenz. Seither folgten viele öffentliche Großprojekte in der Biomedizin diesem Beispiel, und immer größere Datenmengen werden über leicht zugängliche Datenbanken geteilt. Geldgeber und Entscheidungsträger in der Europäischen Union, wie Forschungs- und gemeinnützige Stiftungen, die von der Kommission finanziert werden, setzen sich für eine offene Wissenschaft ein.

**“ Geldgeber und Entscheidungsträger in der Europäischen Union, wie Forschungs- und gemeinnützige Stiftungen, die von der Kommission finanziert werden, setzen sich für eine offene Wissenschaft ein.**

Dennoch haben in der Entwicklung neuer Medikamente und bei der Preisgestaltung nach wie vor die Hersteller das Sagen, die ihrerseits die öffentlich finanzierte Forschung nutzen. Aber vielleicht bricht nun ein neues Zeitalter an. Es gibt mehr öffentlich-private Partnerschaften wie das Structural Genomics Consortium, in dem Wissenschaft und Industrie gemeinsam an neuen Arzneimitteln forschen und ihre Ergebnisse frei zugänglich machen. Ihre Forschungsbilanz hat bereits gezeigt, dass die offene Wissenschaft erfolgreich ist und sich nachhaltig positiv auf die Arzneimittelentwicklung, die Bildung und die Gesellschaft auswirken kann. Wir brauchen aber neue Finanzierungsmodelle für gemeinsame Forschungsprojekte von Wissenschaft und Industrie und die Nutzung modernster Technologien. Denn die jetzigen klassischen Ansätze zur Entwicklung neuer Wirkstoffe und neuer Antibiotika, für maßgeschneiderte Therapien und für die Behandlung neurodegenerativer Erkrankungen reichen nicht mehr aus. Nur in einer konzertierten Anstrengung, ähnlich wie bei dem Humangenomprojekt, lassen sich die nötigen Instrumente und Technologien entwickeln, um sämtliche Eiweiße im menschlichen Proteom zu erforschen und diejenigen zu verändern, die an Krankheitsverläufen beteiligt sind.

A photograph of two surgeons in an operating room. The surgeon on the left is wearing a blue surgical cap, a blue face mask, and a pair of blue AR glasses. The surgeon on the right is also wearing a blue surgical cap and a blue face mask. They are both looking down, presumably at a patient. The background is filled with bright, circular surgical lights, creating a blue-tinted atmosphere.

MIT AUGMENTED-REALITY-BRILLEN KÖNNEN ÄRZTE DIE  
DATENVISUALISIERUNG IN DIE BEHANDLUNG INTEGRIEREN

**GEMEINSAM  
VERANTWORTUNG  
FÜR DIE ZUKUNFT  
ÜBERNEHMEN**



## GEMEINSAM VERANTWORTUNG FÜR DIE ZUKUNFT ÜBERNEHMEN

Mit einem Kulturwandel in der Arzneimittelforschung – weg von einem pharmagetriebenen Prozess und hin zu krankheitsbezogenen, personalisierten Therapien – könnten oftmals unnötige Entwicklungsschritte wegfallen und die Entwicklungskosten für Arzneimittel sinken. Die Europäische Union könnte mindestens 10,2 Milliarden Euro jährlich einsparen, wenn die FAIR-Prinzipien (findable, accessible, interoperable, reusable) für Forschungsdaten vollständig umgesetzt würden.<sup>[15]</sup> Das Forschungsdilemma kann nicht von Wissenschaft und Klinik allein gelöst werden. Versicherungsgesellschaften, der Staat, die Pharmaindustrie und die Öffentlichkeit – sie alle müssen daran mitwirken.

Ein fairer Zugang zu einer hochwertigen Gesundheitsversorgung wird davon abhängen, ob wir allen Patienten die wirksamste Therapie und Versorgung anbieten können – unabhängig davon, woran sie leiden. Fortschritte in Wissenschaft und Technik können die Medizin und Gesundheitsversorgung voranbringen. Aber dazu müssen wir weltweit gemeinsam Verantwortung übernehmen und alle an einem Strang ziehen.

**“ Die Europäische Union könnte mindestens 10,2 Milliarden Euro jährlich einsparen, wenn die FAIR-Prinzipien (findable, accessible, interoperable, reusable) für Forschungsdaten vollständig umgesetzt würden.**

## Fußnoten

- [1] <http://www.euro.who.int/en/health-topics/noncommunicable-diseases>
- [2] [https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.16.17-00454#abstract\\_content](https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.16.17-00454#abstract_content)
- [3] FEMS Microbiol Lett. 2018 Feb 1;365(2). doi: 10.1093/femsle/frx244.
- [4] EMBO Mol Med 2018 10:e9176. <https://doi.org/10.15252/emmm.201809176>;  
<https://www.who.int/csr/don/06-may-2019-measles-euro/en/>
- [5] Omik bezieht sich auf sämtliche Technologien, die genutzt werden, um Gesamtheiten biologischer Moleküle zu charakterisieren und zu quantifizieren, und um ihre Funktionen, Beziehungen und Wirkungen in den Zellen von Lebewesen zu analysieren.  
<https://www.genomicseducation.hee.nhs.uk/blog/the-omics-revolution/>
- [6] Das Proteom ist die Gesamtheit der Proteine, die zu einem bestimmten Zeitpunkt durch ein Genom, eine Zelle, ein Gewebe oder einen Organismus exprimiert werden oder exprimiert werden können (Wikipedia, englischer Eintrag).
- [7] <https://blog.benchsci.com/>
- [8] <https://www.who.int/hiv/en/>
- [9] <https://wellcome.ac.uk/>
- [10] Monoklonale Antikörper (MAB oder moAb) sind Antikörper, die von einer Zelllinie (Zellklon) produziert werden und auf eine einzige Mutterzelle zurückgehen (Wikipedia).
- [11] Das Hochdurchsatz-Screening (HTS) ist eine wissenschaftliche Methode in der Biologie und Chemie, die vor allem in der Pharmaforschung angewandt wird. Unter Einsatz der Robotik sowie von Datenverarbeitungs-/Steuerungssoftware, Liquid-Handling-Geräten und empfindlichen Detektoren können damit in kurzer Zeit Millionen chemischer, genetischer oder pharmakologischer Tests durchgeführt werden.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/High-throughput\\_screening](https://en.wikipedia.org/wiki/High-throughput_screening)
- [12] [https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WPA2017\\_Highlights.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WPA2017_Highlights.pdf)
- [13] Einfach ausgedrückt, wird dabei das Gen für die Genschere Cas in Zellen injiziert, die anschließend die DNA präzise an einer zuvor festgelegten Stelle schneidet. Damit lässt sich das Genom modifizieren, um beispielsweise die Funktion eines Gens zu verändern oder schädliche Mutationen zu beseitigen.
- [14] <https://www.scientificamerican.com/article/crispr-babies-scientist-sentenced-to-3-years-in-prison/>
- [15] <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm>



## BIOGRAFIE

**Ivan Đikić** wurde 1966 in Zagreb geboren. Er ist ein führender Experte auf dem Gebiet der Ubiquitin-Biologie und der Krebsforschung. Đikić ist Professor an der Goethe-Universität Frankfurt und Fellow der Max-Planck-Gesellschaft. Er leitet ein Forschungslabor, in dem multidisziplinäre Teams die molekularen Grundlagen des Lebens studieren, um herauszufinden, welche pathologischen Veränderungen Krebs, neurodegenerative Erkrankungen und Infektionen auslösen.

Đikić wurde für seine wissenschaftliche Arbeit mehrfach ausgezeichnet, unter anderem mit dem Ernst Jung-Preis für Medizin und dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis, der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnung in Deutschland. Er ist gewähltes Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Europäischen Akademie sowie Ehrenmitglied der American Academy of Arts and Sciences.

Ivan Đikić setzt sich weltweit für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein. Für seine Bemühungen, die wissenschaftliche Forschung einer breiten Öffentlichkeit zu vermitteln, wurde ihm vom Präsidenten Kroatiens der Fürst-Branimir-Orden verliehen, die höchste zivile Auszeichnung des Landes.





**Europäische  
Investitionsbank**

*Die Bank der EU*