

**Vision und Wirklichkeit:** Bis künstliche Intelligenz komplizierte Zusammenhänge der Physik wirklich versteht, ist es noch ein weiter Weg. Doch heute schon können Algorithmen die Forschung inspirieren und etwa überraschende Designs für Experimente entwerfen.

# KÜNSTLICHE INSPIRATION

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Sei es eine medizinische Diagnose, die Suche nach Materialien für die Energiewende oder die Vorhersage von Proteinstrukturen – Algorithmen künstlicher Intelligenz dienen der Wissenschaft heute in vielen Bereichen als effektives Hilfsmittel. Doch können sie auch in der Physik nützlich sein, in der es darum geht, fundamentale Vorgänge in der Natur zu verstehen? Mario Krenn und Florian Marquardt lassen sich am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts bereits von KI unterstützen. Dabei loten die Wissenschaftler aus, was die Algorithmen heute können und was (noch) nicht.

Künstliche Intelligenz, kurz KI, boomt. Viele Menschen nutzen zum Beispiel ChatGPT als bekanntesten Vertreter einer auf großen Sprachmodellen basierenden KI, um zu recherchieren oder einen Text schreiben zu lassen. Man kann auch aus Texten Bilder oder Videos durch KI generieren lassen, in der Kunstwelt wird KI schon längst als Werkzeug eingesetzt. Aber wie sieht es damit in den Naturwissenschaften aus?

In den Lebenswissenschaften und in der Chemie ist KI bereits gut etabliert. Das AlphaFold-Programm von DeepMind wurde in der Biologie bekannt, weil es Proteinstrukturen berechnen kann. Zur Erinnerung: Furore machte DeepMind mit dem Programm AlphaGo, das 2016 den Koreaner Lee Sedol, einen der weltstärksten Go-Spieler, schlug. Das war eine Sensation, weil es im Go so viele Möglichkeiten für den nächsten Zug gibt, dass kein Computer sie berechnen kann. AlphaGo musste folglich ähnlich wie ein Mensch durch Training lernen, über Muster von Spielsteinkombinationen auf dem Brett ein Gespür, und damit eine Art Verständnis, für kluge Züge zu entwickeln. Dabei profitierte das Programm letztlich doch von brachialer Rechenpower: Es konnte in Millionen Partien quasi gegen sich selbst trainieren, während die menschlichen Go-Profis lediglich einige Tausend Spiele erreichen.

So breit die Anwendung von KI inzwischen auch ist, meistens funktionieren die Programme als Blackbox; das heißt, man erhält ein hilfreiches Ergebnis, weiß jedoch nicht, wie es zustande gekommen ist. Das mag oft genügen – etwa wenn es um die Suche nach einem Protein mit einer bestimmten Funktion geht. Entscheidend ist hier, dass man nachvollziehen kann, warum die von der KI gefundene Struktur das macht, was sie soll. Doch in der Physik, der fundamentalsten aller Naturwissenschaften, widerspricht eine Blackbox dem Anspruch, ein physikalisches System zu verstehen. Zwar setzen Forschende auch hier zunehmend KI ein, doch noch eher in Anwendungen, wo eine Blackbox als Hilfsmittel das Verständnis nicht behindert. Expertinnen und Experten diskutieren jedoch, ob KI so leistungsfähig werden kann, dass sie komplexe physikalische Systeme sogar besser als der

69



Mensch verstehen könnte. Wenn sie dies dann auch menschlichen Kolleginnen und Kollegen erklären könnte: Würde sie damit zur künstlichen Physikerin auf Augenhöhe? Könnte sie so in der Physik zu neuen Ideen inspirieren?

## Heureka-Erlebnis mit Maschinenlernen

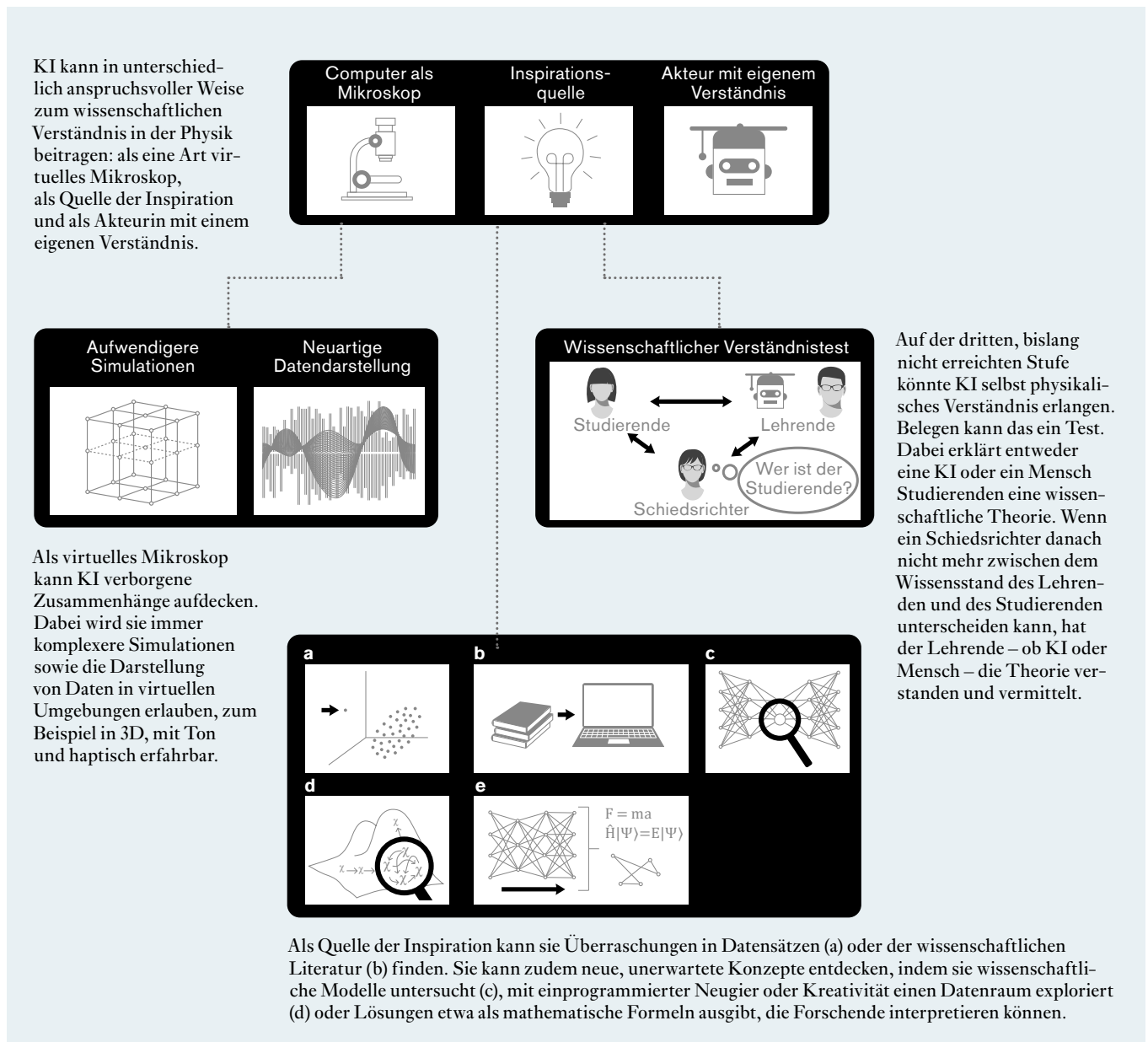
Mario Krenn und andere Physiker bezeichnen eine solche KI als künstliche Muse, sie haben darüber in einem Artikel im Fachblatt *Nature Reviews Physics* vom Dezember 2022 geschrieben. Wir sitzen in der Cafeteria des

Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts in Erlangen, mit dabei Florian Marquardt, Direktor der Theorie-Abteilung am Institut. Wie Krenn setzt er seit einigen Jahren Methoden des Maschinenlernens ein und verfeinert sie mit seinem Team kontinuierlich. Krenn, der in Wien bei Anton Zeilinger, Physik-Nobelpreisträger von 2022, noch als experimenteller Quantenoptiker promovierte, hat im Jahr 2014 – nach einem Heureka-Erlebnis mit Maschinenlernen – eine radikale Wendung vollzogen. „Seitdem bin ich in kein Labor mehr gegangen“, sagt er lachend. Er zählt zu den Pionieren des KI-Einsatzes in der Physik. Heute leitet er die Forschungsgruppe Artificial Scientist Lab am Institut –

schon der Name vermittelt die Vision eines künstlichen Physikers.

Was 2014 Krenn zur Neuorientierung bewegte, soll später Thema sein. Zuerst gilt es zu klären, unter welchen Bedingungen eine KI menschlichen Physikerinnen und Physikern ebenbürtig wäre. „Zuerst müssen wir verstehen, wie menschliche Forschende arbeiten“, betont Krenn, „warum sie kreativ sind, wie sie kreativ sind, warum sie neugierig sind.“ Es geht also um die Frage, was Menschen zu ihrer Forschung motiviert. „Wenn wir das verstehen, haben wir eine bessere Chance, wirklich autonome, automatisierte Wissenschaft zu machen“, sagt er. Florian Marquardt stimmt dem zu

70



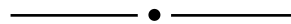
und ergänzt: „Gleichzeitig lernt man etwas darüber, was wir Menschen in der Wissenschaft machen – es ist ja gar nicht klar, ob all unsere Prioritäten in der Forschung wirklich so objektiv sind!“

Wir können also als ersten Punkt festhalten, dass ein künstlicher Physiker auf Augenhöhe mit dem Menschen sich selbst motivieren können müsste. Das klingt banal, aber ein Beispiel illustriert, wie anspruchsvoll diese Vision ist. „Nehmen wir doch eine Leitfrage der Festkörperphysik“, schlägt Marquardt vor: „Wie kann ich einen Raumtemperatur-Supraleiter herstellen?“ Abgesehen davon, dass selbst eine so konkrete Frage, die bis heute ungelöst ist, noch zu offen und unspezifisch für eine heutige KI ist: Ein künstlicher Physiker müsste von selbst auf die Frage kommen und sie auch als wichtig einstufen. Die KI müsste also von sich aus erkennen, dass die verlustlose Leitung von elektrischem Strom bei normaler Umgebungstemperatur ein attraktives Forschungsziel ist. „Aber warum willst du Strom verlustlos transportieren?“, stellt Krenn die Frage nach der nächsten Metaebene der Erkenntnis. Die KI müsste sich ohne äußere Vorgabe selbst diese Frage stellen und beantworten. Kurzum: Sie müsste wissen, dass elektrische Energie von zentraler Bedeutung für unsere Gesellschaft ist. Das ist aber ein ins Soziale gehender Aspekt, der weit außerhalb der Physik liegt.

Das Beispiel illustriert, wie anspruchsvoll Kreativität und Neugier sind, die uns Menschen auszeichnen. Davon ist KI noch weit entfernt. Etwas näher könnte KI daran sein, eine Art von Verständnis für physikalische Theorien zu erlangen. Auch hier stellt sich aber die Frage, was genau es bedeutet, einen physikalischen Zusammenhang zu verstehen. Im Gespräch mit Mario Krenn und Florian Marquardt kristallisieren sich mehrere Aspekte heraus, die dafür wesentlich sind. Dazu brauchen Physikerinnen und Physiker eine intuitive, modell- oder bildhafte Vorstellung – und sei es eine abstrakte mathematische Darstellung. Im Fall von AlphaGo hat KI schon bewiesen, dass sie diese Art Intuition

– im speziellen Fall für die Situation auf dem Spielbrett – erlangen kann. Verständnis zu haben heißt aber auch, Einsichten und Lösungen von einem Gebiet auf ein anderes übertragen zu können. „Wenn eine KI ein Konzept in einem Zusammenhang kennengelernt hat, vielleicht auch, wie wir, davon in der wissenschaftlichen Literatur erfahren hat, dann kann sie vielleicht erkennen, dass sich das Konzept auch in einem anderen Zusammenhang anwenden lässt“, sagt Marquardt. Schließlich müsste eine KI, eventuell mithilfe eines Sprachmodells, auch Menschen einen Zusammenhang erklären können. Auch das trauen Mario Krenn und Florian Marquardt einer KI zu. Doch bis es so weit ist, muss KI noch viel lernen.

Heute schon ist KI menschlichen Physikerinnen und Physikern bei manchen speziellen Aufgaben überlegen. Und genau darauf setzen Krenn und Marquardt in ihrer Forschung: Sie nutzen dafür unter anderem künstliche neuronale Netze. Diese simulieren miteinander vernetzte Nervenzellen, die lernen, indem sie durch Training be-



## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Künstliche Intelligenz ist sehr gut darin, in großen Datenmengen Muster zu erkennen und die Komplexität von Zusammenhängen zu reduzieren. Deshalb kann sie etwa in der Quanten- oder der Gravitationswellenphysik Experimente konzipieren.

Künftig könnte KI auch physikalische Zusammenhänge verstehen, wenn sie eine modellhafte Vorstellung davon erlangt, Konzepte von einem Gebiet auf ein anderes übertragen und Menschen einen Zusammenhang erklären kann.

Damit KI menschlichen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen ebenbürtig wäre, müsste sie selbst aus gesellschaftlichen Bedürfnissen Fragen ableiten können. Davon ist sie noch sehr weit entfernt.

stimmte neuronale Verbindungen stärken und andere abschwächen. „Allerdings sind künstliche neuronale Netze nur *eine* Methode, das Spektrum von KI ist wesentlich breiter“, betont Florian Marquardt: „Allen KI-Methoden ist aber gemeinsam, dass sie helfen, Komplexität zu beherrschen.“ Dazu gehört, sagt Marquardt, dass KI versteckte Muster entdecken und mathematische Optimierungsaufgaben lösen kann. So lernt KI etwa durch das Training an Millionen von Bildern, Objekte wie „Auto“ oder „Adler“ in den unterschiedlichsten Perspektiven und Situationen zu identifizieren.

## Lösungen für die Quantenfehlerkorrektur

Genau diese Fähigkeit, Muster zu erkennen, nutzt Florian Marquardt. Vor einigen Jahren hat eines seiner Teams eine KI so trainiert, dass sie Lösungen für die Quantenfehlerkorrektur findet. Auf eine solche Korrektur werden kommende Quantencomputer angewiesen sein, da ihre hochempfindlichen Quantenbits unvermeidlich Störungen aus der Umgebung ausgesetzt sind. Zu den Eigenheiten der Quantenwelt gehört, dass man während einer Quantenrechnung nicht durch Messungen überprüfen darf, ob die Qubits noch die korrekten Werte enthalten. Folglich muss eine Quantenfehlerkorrektur eine direkte Messung trickreich umgehen. Es ist ein bisschen so, als würde man Go gegen einen Gegner spielen, dessen weiße Steine man nicht sehen kann, sodass man deren Lage durch vorsichtiges Setzen der eigenen Steine erspüren muss. Es geht also auch bei der Quantenfehlerkorrektur um das Erkennen von Mustern. Darüber hat das KI-basierte Programm der Erlanger für bestimmte Korrekturalgorithmen neue Sequenzen von Quantenoperationen aufgespürt.

Florian Marquardts Gruppe hat mithilfe von KI zudem weitere fehlertolerante Programmierungen für Quantencomputer entdeckt sowie Designs für photonische Schaltkreise – optische Gegenstücke zu elektronischen



Schaltkreisen. Außerdem entwickelt seine Gruppe Ansätze für sogenannte neuromorphe Computerarchitekturen. Wegen der Arbeitsweise heutiger Computer benötigt KI aktuell viel Energie. Wesentlich nachhaltiger wären neuromorphe Chips, die vom Gehirn inspiriert sind. Immerhin benötigt unser Gehirn nur die Leistung einer 20-Watt-Glühbirne.

Mario Krenn ließ sich bei seinem erhellenden Erlebnis im Jahr 2014 ebenfalls von KI leiten. Damals wollte sein Team bei Anton Zeilinger eine besonders komplexe Form von Verschränkung zwischen Lichtquanten, Photonen, erzeugen. Die Verschränkung ist ein zentrales Werkzeug der Quanteninformationstechnik. Grob gesagt, werden die Quantenzustände einzelner Quantenobjekte, zum Beispiel Photonen, so überlagert, dass sie ein gemeinsames, großes Quantensystem formen. Ein bisschen kann man sich das wie einen Ruderachter vorstellen, dessen Mannschaft sich so gut synchronisiert hat, dass sie wie ein einziger Superathlet rudert.

72

## KI konzipiert Quantenexperiment

Es war unklar, welcher experimentelle Aufbau die spezielle Verschränkung zwischen Photonen am besten erzeugen kann. Krenn hatte dazu ein Programm namens Melvin entwickelt, das alle nötigen optischen Bauelemente simulierte, darunter Laser, Linsen, Spiegel und Detektoren. Damit probierte es in kurzer Zeit Millionen von Kombinationen aus, bis es Experimente gefunden hatte, die diese Verschränkung herstellen. Weil Melvin lernte, welche Kombinationen sinnvoll sind, schaffte das Programm innerhalb von Stunden das, woran vier Physiker – drei Experimentatoren und ein Theoretiker – drei Monate vergeblich gearbeitet hatten: Es lieferte einen funktionierenden Aufbau des Experiments.

Nach diesem Aha-Erlebnis widmete sich Krenn ganz der Entwicklung von KI, die Vorschläge für physikalische Experimente kreiert. Dabei half eine



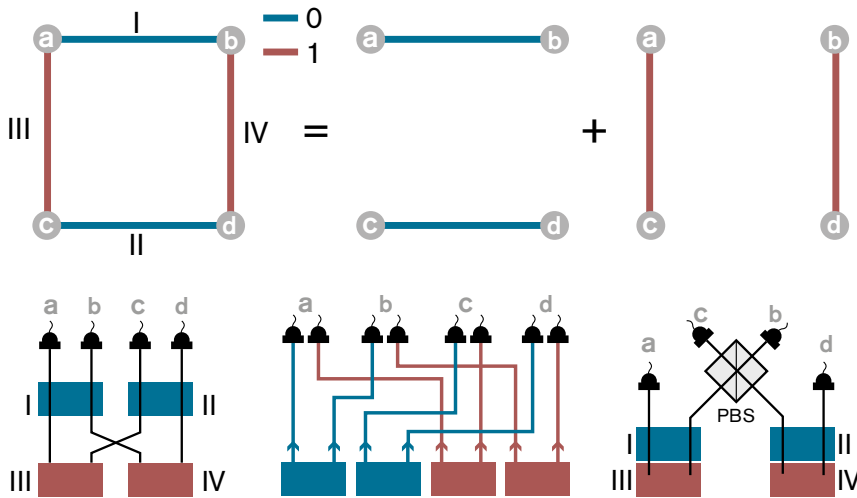
FOTO: STEFAN SPANENBERG

Schöpfer einer künstlichen Kollegin: Das Team von Mario Krenn (Mitte) entwickelt künstliche Intelligenz, die mit überraschenden Lösungen für Experimente aufwartet und das physikalische Verständnis voranbringt.

wichtige Erkenntnis: „Wir haben zufällig bemerkt, dass diese Quantenoptik-Experimente stark abstrahiert werden können.“ Und zwar lassen sie sich als Netzwerk mathematischer Graphen aus Linien, sogenannten Kanten, und Knoten darstellen. Zwei Knoten stehen dann etwa für zwei Photonen und eine Linie zwischen ihnen für deren Verschränkung. „In diesem abstrakten Raum kannst du wesentlich einfacher zum Beispiel

nach neuen Quantenexperimenten suchen“, erklärt Krenn begeistert. Vor allem lässt sich so die optimale Lösung mit einem Minimum an Knoten und Kanten finden, die sich dann in einen besonders ökonomischen Aufbau mit möglichst wenigen Bauteilen in der Realität umsetzen lassen sollte. Allerdings benutzt Krenn für seine KI-Programme keine künstlichen neuronalen Netze: Die müssten ja mit vorhandenen experimentellen

GRAPHIK: GCO NACH MARIO KRENN / MPI FÜR DIE PHYSIK DES LICHTS



Radikale Vereinfachung: Ein Quantenexperiment (unten) lässt sich als Graphen-Netzwerk (oben) darstellen. Das Experiment soll vier Photonen a bis d (Knoten des Netzwerks oben) miteinander verschränken, wobei die farbigen Linien I bis IV Paarungen für die Verschränkung darstellen. Das Quadrat oben links entspricht der Verschränkung aller vier Photonen, die sich aus der Kombination der beiden Graphen daneben ergibt und sich in den drei unten dargestellten Experimenten realisieren lässt. Die blauen und roten Kästen entsprechen Lichtquellen, die einzelne Photonenpaare erzeugen, die schwarzen, kapfenförmigen Symbole Detektoren für die ankommenden Photonen. PBS steht für ein optisches Bauelement, das Strahlen nach bestimmten Regeln aufteilen kann.

Designs trainiert werden, was kaum grundlegend neue Ideen hervorbrächte. „Wir setzen sogenannte Explorationsalgorithmen ein“, erläutert Krenn, „die den riesigen abstrakten Raum an Kombinationen sehr effizient auf neue Lösungen durchsuchen.“

Inzwischen ist Mario Krenn mit seiner Forschung erheblich weitergekommen. In einer derzeit auf dem Server Arxiv vorveröffentlichten Arbeit zeigt ein internationales Team, an dem er beteiligt war, zum Beispiel, dass sich mit KI neue Designs für Gravitationswellendetektoren entwickeln lassen. Verblüffenderweise wären diese Konzepte der derzeit geplanten nächsten Generation des amerikanischen Ligo-Gravitationswellendetektors überlegen. Ligo wurde berühmt, weil es damit gelang, die Gravitationswellen zu entdecken, deren Existenz Einstein hundert Jahre zuvor postuliert hatte. Das wurde 2017 mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigt. Heute sind Gravitationswellen ein wichtiges neues Werkzeug der Astrophysik, um beispielsweise Schwarze Löcher aufzu-

spüren. Nun ist ein Team um Rana X. Adhikari mit dem Design der nächsten Generation, Ligo Voyager, beschäftigt. Dieses Team stieß darauf, dass Mario Krenn mit KI neue quantenoptische Experimente entwickelte. Also fragte man bei Krenn an, ob er seine Methode auch für die Suche nach neuen Designs für Gravitationswellendetektoren einsetzen wolle. So kam es zur Zusammenarbeit. Was aber die Detektordesigns der KI angeht, müsste sich in der Praxis erst noch zeigen, ob nicht irgendwelche unerwarteten Effekte verhindern, dass sie ihre theoretischen Vorteile ausspielen können. Bei einem Experiment, das Milliarden Dollar kostet, ist man allerdings eher vorsichtig mit radikalen Neuerungen.

## Ein Nobelpreis für künstliche Intelligenz?

Bei solchen Beispielen künstlicher Kreativität stellt sich die Frage: Erhaschen wir hier schon eine Vorahnung vom

künstlichen Physiker? „Wir sind jetzt auf dem Level, wo wir Ideen erzeugen können“, zeigt sich Mario Krenn optimistisch: „Bei bestimmten Themen können unsere KI-Systeme vollkommen neue Lösungen finden, die im Vergleich mit Ideen von Menschen schon wesentlich kreativer sind, im Sinne des Neuigkeitsgrads und der Nützlichkeit!“

Florian Marquardt ist ebenfalls optimistisch, was Anwendungen von KI betrifft, aber doch vorsichtiger bei der ganz großen Vision. So bleibt die Frage, wann eine KI in der Lage sein wird, eine echte physikalische Theorie aufzustellen. Eine solche Theorie müsste elegant in übersichtlichen mathematischen Formeln darstellbar sein, an die bestehende Physik anknüpfen und Vorhersagen für physikalische Systeme ermöglichen. Trotz dieses hohen Anspruchs ist Mario Krenn zuversichtlich, dass schon in den nächsten Jahren eine KI die entscheidende Idee zu einer nobelpreiswürdigen Entdeckung liefern könnte. Schon bald könnte das Nobelkomitee mit der Frage konfrontiert sein, ob auch eine KI oder deren Schöpfer den höchsten Preis in der Wissenschaft erhalten kann.

73

## GLOSSAR

### KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE

simulieren auf herkömmlichen Computern Nervenzellen, die miteinander vernetzt und lernfähig sind, indem sie durch Training bestimmte neuronale Verbindungen stärken und andere abschwächen. Sie sind nur eine Methode der KI.

### NEUROMORPHE COMPUTER

sollen die physikalische Funktionsweise des menschlichen Gehirns nachahmen, das viel energieeffizienter arbeitet als die Transistoren heutiger Prozessoren. Künstliche neuronale Netze ließen sich auf neuromorphen Computern mit weniger Energieaufwand simulieren, sind mit diesen aber nicht gleichzusetzen.