



Fotos: Heddergott / TUM

# „Unser Gehirn besteht aus Memristoren“

**Diese provozierende These vertritt Leon Chua, der zurzeit am TUM-IAS als Fellow tätig ist, und er kann sie eindrucksvoll belegen**

Links

[www.tum-ias.de](http://www.tum-ias.de)  
[www.cvl-a.de](http://www.cvl-a.de)



Klaus Mainzer (l.), Leon O. Chua (M.), Patrick Dewilde (r.)

**M**anchmal sind Querdenker nötig, um frischen Wind in festgefahrene Diskussionen zu bringen. Leon Chua ist einer von ihnen. Schon 1971 hat der heute 74-jährige Professor an der University of California in Berkeley das noch fehlende vierte Schaltelement der passiven Schaltungstechnik vorhergesagt, den Memristor. Erst kürzlich wurde seine Prognose großartig bestätigt, als Hewlett Packard einen solchen Memristor erstmals baute. Chuas Komplexitätstheorie, die die Welt als Rechenmaschine erklärt, die auf einfachsten Prinzipien aufbaut, konnte sich bisher jedoch noch nicht allgemein durchsetzen. Bei seinem Besuch am Institute for Advanced Study der TU München (TUM-IAS) sprach Faszination Forschung mit dem Wissenschaftler, mit IAS-Direktor Professor Patrick Dewilde und Professor Klaus Mainzer, Direktor der Carl von Linde-Akademie.

**Herr Professor Chua, fühlen Sie sich mehr als Ingenieur, als Physiker, als Biologe oder als Philosoph?**

**Chua:** Eigentlich von allem ein bisschen. Ich betätige mich auf all diesen Feldern, und ich finde alle gleich wichtig. Die Zukunft wird interdisziplinär sein. Man sollte keine Mauern um sich aufbauen, indem man sagt, ich mache nur Elektrotechnik oder Physik oder Biologie. Wenn es nicht gelingt, die Probleme anderer Fachrichtungen zu verstehen, wird es keinen Fortschritt geben.

**Dewilde:** Seine Vielseitigkeit ist einer der Gründe, warum wir Professor Leon Chua ans IAS eingeladen haben. Wir bemühen uns, eine interdisziplinäre Sicht der Dinge zu fördern. Jeder gute Forscher informiert sich über seine Fachgrenzen hinaus; er sollte immer ▶

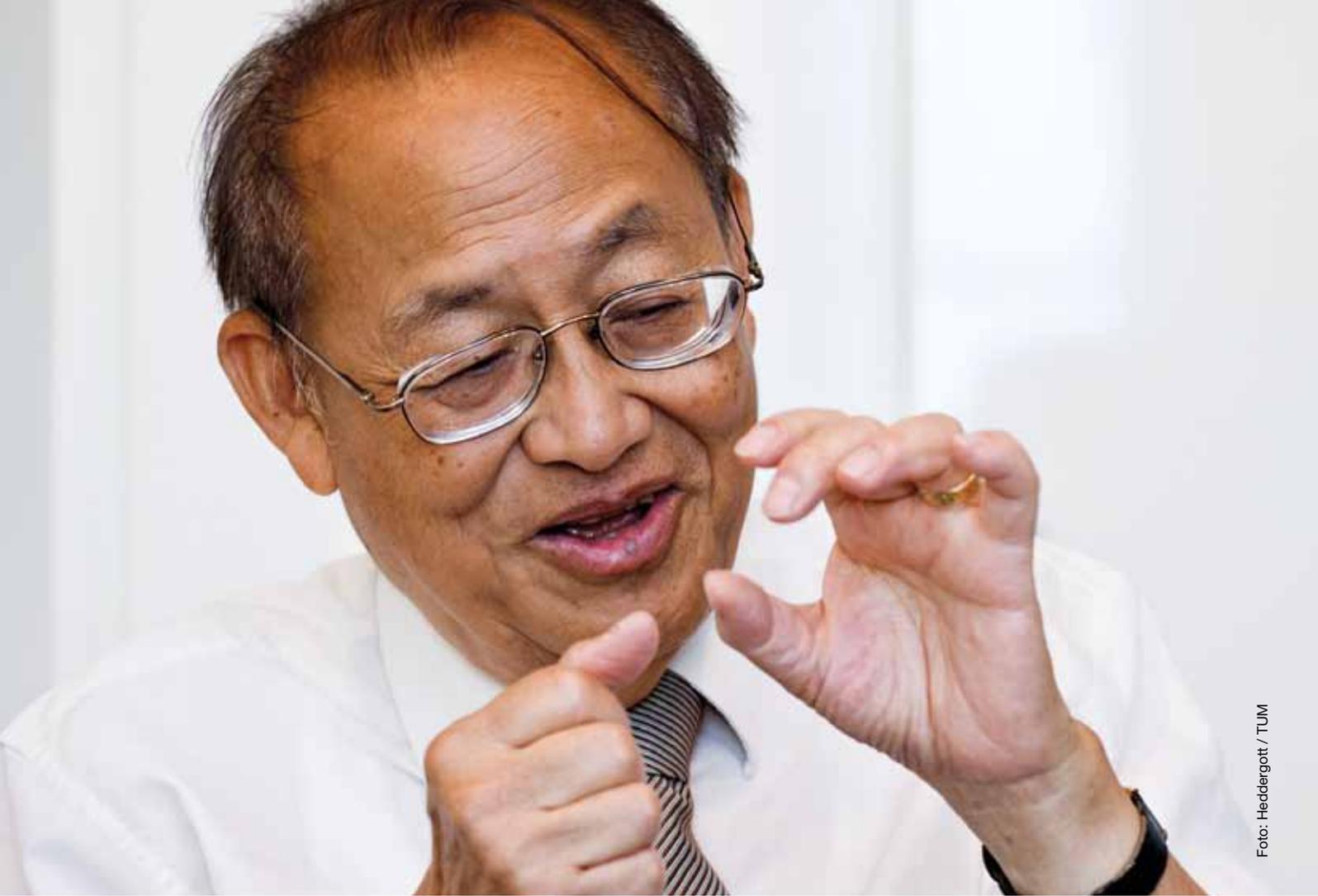


Foto: Heddergott / TUM

auch wissen, was außerhalb seines Gebiets vor sich geht. Außerdem hat Leon so beeindruckende Arbeiten aufzuweisen, dass jede technisch orientierte Universität daran interessiert sein muss. Was er macht, ist extrem wichtig für die Grundlagen der Technik. Und für mich persönlich lag die Hauptmotivation, ihn einzuladen, darin, dass er grundlegende Modelle erarbeitet hat, sei es für mechanische oder elektrische Phänomene, sei es für Nerven, das Gehirn, Biologie oder Kosmologie. Und ich finde, gute Modelle sind das Wichtigste überhaupt.

**Chua:** In der Tat beruht ja alles, was wir machen, auf Modellen. Die Wirklichkeit ist so komplex, dass wir zwangsweise darauf zurückgreifen müssen. Die Kunst liegt darin: Wie führe ich einen komplizierten Sachverhalt auf einfache Prinzipien zurück? Wie kann ich Gleichungen formulieren, deren Lösung schließlich das richtige Ergebnis für mein Problem ergibt? Ich suche immer das einfachste Modell, die einfachste Gleichung, die alles erklären kann, was man bei Experimenten beobachtet. Ich nenne sie auch „Stammzellen-Gleichung“, weil sich alles aus ihr entwickeln kann. In meiner Komplexitätstheorie sind es die Rechenvorschriften für einen zellulären Automaten.

**Mainzer:** Um Leons Arbeit zu verstehen, müssen wir in der Geschichte zurückgehen. Dass das Universum eine Art Rechenmaschine sei, faszinierte Wissenschaftler schon seit den Tagen des Universalgelehrten Gottfried Wilhelm Leibniz im 17. Jahrhundert. Er stellte sich alle Abläufe der Natur wie ineinandergreifende Zahnräder vor, die im Prinzip vollständig berechenbar seien. Konrad Zuse griff 1945/46 diesen Gedanken von Leibniz auf und postulierte, der Kosmos selbst lasse sich als gigantische Rechenmaschine auffassen. Zuse baute diesen Einfall zur Idee des „Rechnenden Raums“ aus und schrieb 1969 unter diesem Titel ein Buch, in dem er sein Konzept rechnender Module auf die Kosmologie anwandte. Bemerkenswert ist, dass sein großer Rivale John von Neumann, der an der Entwicklung des ersten amerikanischen programmgesteuerten Computers beteiligt war, Ende der 1950er-Jahre die Theorie zellulärer Automaten begründete.

#### **Was kann man sich darunter vorstellen?**

**Mainzer:** Einen zellulären Automaten können wir uns wie ein Schachbrett vorstellen, dessen Felder („Zellen“)

<b>Kurzbiografie</b>	<b>Prof. Dr. Leon O. Chua</b>
<p>Prof. Dr. Leon O. Chua wurde am 28. Juni 1936 auf den Philippinen geboren. 1959 erlangte er am Mapua Institute of Technology in Manila seinen Bachelor of Engineering, 1961 am MIT seinen Master und 1964 seinen Ph. D. an der University of Illinois, Urbana-Champaign. Danach war er Assistenzprofessor an der Purdue University, wo er 1967 zum Dozenten ernannt wurde. 1970 ging er an die University of California in Berkeley, wo er seither als Professor tätig ist. 1971 postulierte er den Memristor. 1983 beschrieb er den Chua's Circuit. 1988 führte er Zellulare Nichtlineare Netzwerke (CNN) ein. Er ist international bekannt für seine Beiträge zur Chaostheorie, zu Zellularen Nichtlinearen Netzwerken und zur Komplexitätstheorie.</p>	

*„In den nächsten Jahren wird es große Fortschritte in der Hirnforschung und beim Bau von hirnähnlichen Computern geben“*

Leon O. Chua

ihre Zustände – die zum Beispiel durch unterschiedliche Färbung charakterisiert sind – nach einfachen Regeln verändern. So entstehen Muster, die wie zelluläre Organismen wachsen und sich sogar reproduzieren können. John Conway entwickelte daraus eine Simulation der biologischen Evolution – er nannte sie Game of Life –, von der sich mathematisch beweisen lässt, dass sie auf einer sogenannten universellen Turing-Maschine verwirklicht werden kann, die erdacht wurde von dem britischen Logiker und Mathematiker Alan M. Turing. Sie ist der theoretische Prototyp eines universell programmierbaren Computers und der Ausgangspunkt für Leons Theorie.

**Chua:** Das ist richtig. Es ist mir gelungen, mithilfe dieses Modells Regeln zu entwickeln, die viele Phänomene unserer Welt erklären, etwa Regeln der Symmetrie oder des Chaos. Alles ergibt sich aus den ursprünglichen, einfachsten Rechenschritten eines solchen Automaten. 90 Prozent von dem, was ich erzähle, verstehen sogar Schüler. Ein neues Konzept muss nicht unbedingt kompliziert sein. Und ich sage voraus, dass in 30 Jahren Schulkinder aus ihren Büchern das lernen werden, was

ich heute erzähle. Mit meiner Theorie kann ich erklären, was ein Attraktor ist, wie Dynamik, Oszillation oder Chaos entstehen. Man kann das alles verstehen, auch ohne fortgeschrittene Mathematik.

### **Könnten Sie das etwas genauer erklären?**

**Chua:** Stellen Sie sich vor, unser zellulärer Automat besteht aus einem Band mit Zellen, die entweder rot oder blau sein können. Jede Zelle verändert sich nun gemäß vorher festgelegter Regeln, die durch die Farbe der Nachbarzellen bestimmt werden. Je nachdem, welche Farbe diese haben, ändert sich die mittlere Zelle oder bleibt gleich. Für die drei Zellen gibt es also acht verschiedene Möglichkeiten. Das ergibt genau  $2^3$ , also 256 mögliche Regeln, nach denen sich die Zellen verändern können. Nun kann man diese Regeln in vielen Schritten hintereinander immer wieder anwenden, und so entstehen im Lauf der Zeit Muster. Je nach Regel sind sie ganz unterschiedlich: So gibt es Fälle, wo sich die Farben nach und nach völlig durchmischen. In anderen Fällen kann es sein, dass Symmetrien entstehen. Und wieder in anderen Fällen kann es passieren, dass sich das Ergebnis einem ganz bestimmten Wert annähert, der dann konstant bleibt. Man spricht dann von einem Attraktor. Dies ist eine Weiterentwicklung der Arbeiten von Stephen Wolfram, die er 2002 in seinem großartigen Buch „A New Kind of Science“ dargestellt hat.

### **Inwiefern kann dieses Modell die Welt abbilden?**

**Chua:** Wir finden viele Analogien zwischen dem Verhalten des zellulären Automaten und den physikalischen Phänomenen. So entsprechen bestimmte Regeln sehr genau den Symmetrien, die wir in der Teilchenphysik und in der Kosmologie finden. Die Theorie zeigt auch, wo eine Zeitumkehr möglich ist und wo nicht. Überall dort nämlich, wo die Rechenregeln eine Erhöhung der Unordnung – die wir Entropie nennen – verursachen, überall dort ist eine Zeitumkehr nicht möglich. Das entspricht genau unseren Beobachtungen in der Physik. Ein weiteres Beispiel ist die Vernichtung von Materie mit Antimaterie unter Entstehung von Energie. Auch das lässt sich mit den Rechenregeln in zellulären Automaten nachbilden. Und ich will sogar so weit gehen zu behaupten, dass man selbst den Urknall durch eine passende Regel nachahmen kann. Aus einem einzigen Punkt entsteht mit dieser Regel alles, und es wiederholt sich nie.

**Mainzer:** Die Abbildung der physikalischen Welt in zellulären Automaten ist aber nicht bloß eine Metapher. Sie setzt voraus, dass wir zelluläre Automaten wie in der Physik als dynamische Systeme durch Differenzial- ▷

**Wie ein Memristor funktioniert**

Im Jahr 2008 bauten Forscher des Computerherstellers Hewlett Packard in Kalifornien zum ersten Mal einen Memristor, wie ihn Leon Chua schon 1971 vorhergesagt hatte. Sie realisierten das „Gedächtnis“ mithilfe eines Bauelements aus Titan-Dioxid. Dazu packten sie zwei Schichten des Materials übereinander, die unterschiedlich mit Sauerstoff-Fehlstellen besetzt sind. Je nach Richtung und Höhe der Spannung, die man anlegt, breiten sich diese Sauerstoff-Fehlstellen im gesamten Material aus oder konzentrieren sich in der Nähe der Oberfläche. Dort bleiben sie und verändern den Widerstand des Materials, auch wenn der Strom nicht mehr fließt.

Analogie mit einer Flüssigkeit: Je nach Durchflussmenge erweitert oder verengt sich die Dicke des Rohrs, damit ändert sich auch der Widerstand, den das Rohr der Flüssigkeit entgegensetzt.

<b>Kurzbiografie</b>	<b>Prof. Dr. Patrick Dewilde</b>
<p>Prof. Dr. Patrick Dewilde ist einer der weltweit führenden Ingenieure auf den Gebieten System-Netzwerktheorie, Signalverarbeitung und Elektronische Designautomation. Mit zahlreichen Gastprofessuren (u. a. an der Stanford University, in Berkeley und am Weizmann Institute in Israel) hat Dewilde sein internationales Netzwerk gekräftigt und kam 2003 als Preisträger der Alexander von Humboldt-Stiftung an die Technische Universität München. Seit 2008 ist er Direktor des Institute for Advanced Study der TUM. Bis 2007 war Professor Dewilde Chef der niederländischen Technologiestiftung STW und Direktor des Delft Institute for Microelectronics and Submicrotechnologies an der Universität Delft. Seit 1981 ist Dewilde IEEE Fellow, seit 1995 ordentliches Mitglied der Königlichen Niederländischen Akademie der Wissenschaften, 2006 wurde er „Knight of the Order of the Dutch Lion“.</p>	

*„Naturwissenschaftler versuchen zu verstehen, Ingenieure versuchen, nützlich zu sein. Das TUM-IAS will beides gleichzeitig ermöglichen“*

Patrick Dewilde

gleichungen beschreiben. So werden exakte Prognosen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede deutlich. Daran arbeiten wir derzeit in gemeinsamen Publikationen.

**Sie haben 1971 den Memristor vorhergesagt. Haben Sie auch für ihn ein einfaches Modell?**

**Chua:** Ja. Er lässt sich berechnen aus den Elementen Widerstand, Induktionsspule und Kondensator. Mir wurde 1971 klar: Im Raum der vier Größen Strom, Spannung, Ladung und magnetischer Fluss fehlte bislang bei den sechs möglichen Zweierbeziehungen ein passives Element, das Ladung und magnetischen Fluss verknüpft. Deshalb postulierte ich ein weiteres Element, das ich Memristor nannte. Es handelt sich dabei um Komponenten, die einen variablen Widerstandswert besitzen und gleichzeitig die Fähigkeit, diesen Widerstandswert zu behalten, auch wenn der Strom ausgeschaltet wird – eine Art Widerstand mit Gedächtnis. Das ist im Grunde ein ganz einfaches Modell.

**Dewilde:** Ich glaube, da gibt es noch mehr. Das Modell besteht aus Differenzialgleichungen, aber auch aus der



Foto: Heddergott / TUM

Wechselwirkung zwischen den Einzelteilen und dem Austausch von Erhaltungsgrößen wie Energie. Natürlich sind die Einschränkungen und Randbedingungen für die Gleichungen in verschiedenen Gebieten unterschiedlich, aber es gibt gemeinsame Schemata. Und ich denke, das sind die Leitideen der Wissenschaftler. In diesem Sinne mag der Memristor ein Leitmotiv auch für andere Disziplinen sein.

### **Kann Ihr revolutionäres Memristormodell die wissenschaftliche Welt verändern?**

**Chua:** So weit würde ich nicht gehen. Aber wie schon Max Planck gesagt hat: „Die Wahrheit triumphiert nie, ihre Gegner sterben nur aus.“ Deshalb dauert es oft so lange, bis sich neue Ideen durchsetzen. Die Studenten der nächsten Generation werden dieses Modell schon in ihren Lehrbüchern finden; für sie wird es bald selbstverständlich sein. Das wird noch Jahre dauern, aber ich glaube, es ist einfach wichtig, Fortschritte zu machen. Wir haben nun schon genug Zeit verloren, weil wir dieses Modell zum Beispiel nicht zur Erklärung biologischer Sachverhalte herangezogen haben.

### **Was hat es damit auf sich?**

**Chua:** Sogar primitive Lebewesen wie eine Amöbe funktionieren danach. So lässt sich beispielsweise das Verhalten der Amöbe, wenn man sie wiederholten Temperaturänderungen aussetzt, durch das Memristormodell erklären. Aber auch das menschliche Gehirn. Der Memristor ist das Missing Link, um molekulares Gedächtnis und Lernen zu verstehen.

**Dewilde:** Es gab unter Forschern eine lange Diskussion darüber, wie viel Erinnerung tatsächlich in der neuronalen Zelle steckt. Man schätzte 20.000 bis 100.000 Bits. Aber keiner konnte sagen, wo diese Bits stecken sollten. Jetzt hingegen, mit dem Memristormodell, wissen wir, wo die Bits stecken: in den Synapsen. Denn sie sind der einzige Teil, der sich ändern kann. Das ist schon eine sehr praktische Art, die Dinge zu betrachten.

**Chua:** Das ist völlig richtig. Wenn man etwas lernt, muss sich etwas verändern. Und in der Synapse ist es ein Protein, das wächst oder verschwindet. Das ist reine Chemie. ▶



Foto: Heddergott / TUM

**Dewilde:** Das gibt uns ein sehr genaues Modell, wo das Gedächtnis im Gehirn sitzt, und nicht nur da, sondern sogar in der Amöbe, die gar kein Gehirn besitzt.

**Mainzer:** Heute Morgen benutzten Sie einen wunderbaren Satz. Sie sagten: Die Amöbe hat kein Gehirn, aber sie hat „mind“, das was wir etwas unzulänglich mit „Geist“ ins Deutsche übersetzen. Das ist doch die Idee von Turing. „Mind“ beruht nicht auf dem menschlichen Gehirn, dieser biologisch-chemischen Maschinerie, sondern kann sich durch unterschiedliche Mechanismen äußern. Warum also nicht auch bei einer Amöbe? Ich finde, das ist eine großartige Idee.

**Dewilde:** Ich möchte noch ein anderes Beispiel nennen, das zeigt, was innovative wissenschaftliche Ideen bewirken können: Der große industrielle Durchbruch der Mikroelektronik kam doch mit den Arbeiten der amerikanischen Computerwissenschaftler Carver Mead und Lynn Conway, die Anfang der 80er-Jahre einfache Modelle für das Design hochintegrierter Schaltkreise entwickelten. Sie revolutionierten damit den Bau komplizierter Chips und führten deren Design auf einfache

Prinzipien zurück. Daran kann man sehen, wie erstaunlich mächtig Modelle wirken können. Denn eines kann man mit Sicherheit behaupten: Die Computer, die daraufhin entstanden, haben die Welt verändert.

**Mainzer:** Mir erscheint eines typisch für führende Forscher: Sie sind nicht nur an der technischen Konstruktion von Maschinen interessiert, sondern sie haben auch Modelle dafür. Und sie haben Visionen. Ich glaube, das trifft auch auf Leon Chua zu. Auf der einen Seite ist er Elektrotechniker, und der Transistor ist ein elektrotechnisches Gerät, das zweifellos die Welt verändert hat. Aber auf der anderen Seite steckt dahinter ein Modell, das sich auch noch auf viele andere Felder der Wissenschaft anwenden lässt und für andere Forscher fruchtbar werden kann.

**Der Memristor stellt ja sozusagen das Gedächtnis eines Computers dar. Wird er zur Entstehung neuer Qualitäten führen, die man noch nicht kennt?**

**Chua:** In gewissem Sinne schon. Es wird künstliche intelligente Maschinen geben. Die künstliche Intelligenz

„Führende Forscher sind nicht nur an der technischen Konstruktion von Maschinen interessiert, sondern sie haben auch Modelle dafür“

Klaus Mainzer

Kurzbiografie	Prof. Dr. Klaus Mainzer
<p>Prof. Dr. Klaus Mainzer ist Lehrstuhlinhaber für Philosophie und Wissenschaftstheorie und Direktor der Carl von Linde-Akademie an der Technischen Universität München (TUM). Er ist Principal Investigator und Mitglied des Boards des TUM Exzellenz-Forschungsclusters CoTeSys (Cognition for Technical Systems). Seine Forschungsschwerpunkte sind u. a. Grundlagen von Wissenschaft und Technik, künstliche Intelligenz, komplexe dynamische Systeme in Natur und Gesellschaft.</p> <p>Aktuelle Buchpublikationen: „Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz“ (Mentis, 2010), „Komplexität“ (UTB, 2008), „Der kreative Zufall: Wie das Neue in die Welt kommt“ (C. H. Beck, 2007), „Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind“ (Springer, 5. Aufl. 2007).</p> <p>Ein weiteres Interview mit Prof. Mainzer wurde in Faszination Forschung 4 (Mai 2009) veröffentlicht. Darin diskutiert er mit dem Ingenieur Prof. Dr. Martin Buss die Chancen und Grenzen des Verhältnisses von Mensch und Maschine.</p>	

begann ja vor rund 50 Jahren am MIT und war nie so richtig erfolgreich. Das kommt daher, dass sie auf Programmen beruht. Dadurch wird sie zu kompliziert und zu langsam. Aber ein Memristor benötigt keine Software. Er macht alles von alleine. Um etwas zum Funktionieren zu bringen, benötigt man immer die richtigen Mittel. Lassen Sie mich ein Beispiel geben: Wenn Sie versuchen, ein Quadrat durch runde Figuren darzustellen, wird das nicht gelingen, weil Sie nicht die richtigen Mittel haben. Wenn Sie aber Quadrate dazu nehmen, dann gelingt das ganz einfach. Es kommt also immer darauf an, die richtigen Mittel zu verwenden. Und für intelligente Computer benötigen Sie eben auch Memristoren.

**Die künstliche Intelligenz (KI) ist also nicht tot, sondern man verwendete bisher die falschen Mittel?**

**Dewilde:** KI ist überhaupt nicht tot! Sie ist nur nach wie vor ungelöst, und das ist ein großer Unterschied.

**Chua:** KI wird immer noch als Software verstanden im Sinne von sehr klugen Programmen. Aber wenn man die Gedanken programmieren will, wird die Sache sehr

langsam, wenn man sie auf dem Computer laufen lässt. Es ist etwas ganz anderes, wenn die Intelligenz bereits in der Hardware selbst steckt. Die Synapsen im Gehirn sind diese Art von Hardware. Da gibt es niemanden, der Programme schreibt für die Nervenzellen. Wenn man das so betrachtet, wird es in den nächsten Jahren große Fortschritte geben in der Hirnforschung und beim Bau von hirnähnlichen Computern.

**Oft wird beklagt, dass sich Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachrichtungen gar nicht mehr verstehen. Wäre es nicht eine lohnende Aufgabe für das IAS, hier Brücken zu schlagen?**

**Dewilde:** Genau das versuchen wir. Wir versuchen, Leute zusammenzubringen. Aber es gibt keine absolute Wahrheit. Wir arbeiten mit Modellen, und die sind immer Vereinfachungen. Sie stellen nie die ganze Wahrheit dar. Und wir regen darüber Diskussionen an. Ein Beitrag wie der von Leon ist sehr wichtig in vielen Bereichen der Wissenschaft, deshalb versuchen wir, seine Ideen zu verbreiten.

**Mainzer:** Es ist ja eine der Visionen der TUM, Natur- und Ingenieurwissenschaften zusammenzubringen. Das ist auch hier im IAS und in der Carl von Linde-Akademie, die ich vertrete, eine der Hauptideen. Die Arbeit von Leon Chua zeigt, dass die technische Realisation und die Arbeit der Ingenieure verbunden ist mit breiten wissenschaftlichen Visionen und interdisziplinären Modellen. Und das liegt genau auf der Linie unserer Hochschule.

**Dewilde:** Die Kommunikation mit Forschern wie Leon dient nicht nur dem Verständnis, sondern ist extrem nützlich auch im praktischen Sinne. Der Unterschied zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren ist ja der: Naturwissenschaftler versuchen zu verstehen, und Ingenieure versuchen, nützlich zu sein. Und hier kann man beides gleichzeitig tun. Der Nutzen des Verstehens.

**Chua:** Ich zitiere da gerne Maxwell. Er hat gesagt: „Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie.“

Das Interview führte Brigitte Röthlein