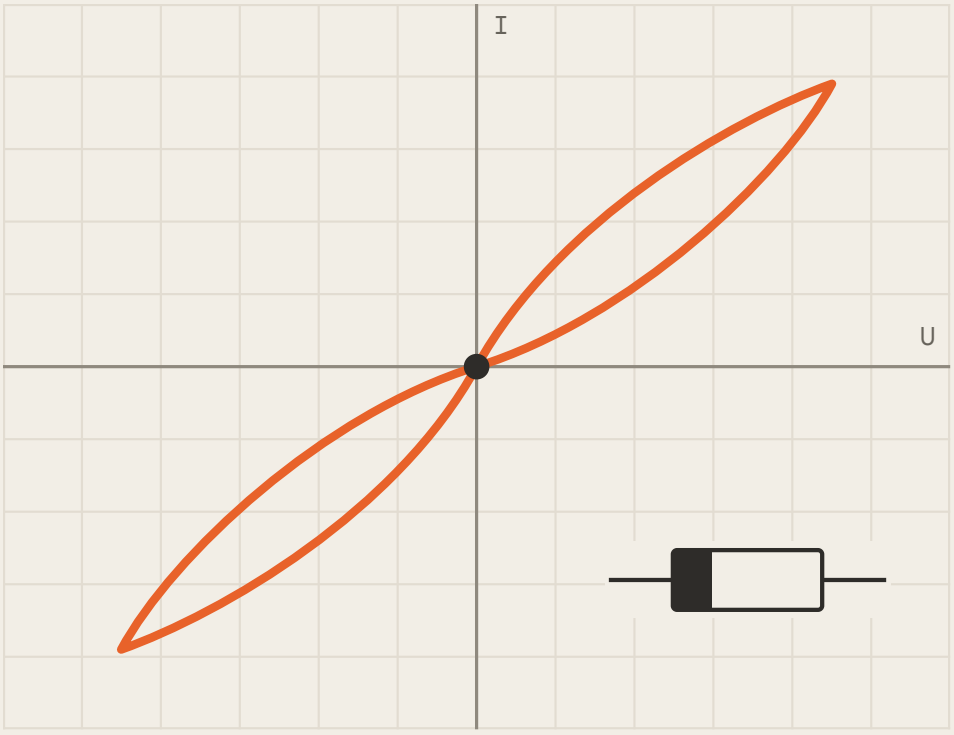


L. O. CHUA · IEEE TRANS. CIRCUIT THEORY · 1971

Der Memristor

Das fehlende Bauelement

Reibold

Brain-Media.de

Holger Reibold

Der Memristor

Das fehlende Bauteil

Wie Computer lernen,
sich zu erinnern

BRAIN-MEDIA.DE

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche, schriftliche Genehmigung des Verlags ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus in irgendeiner Form durch Fotokopien oder ein anderes Verfahren zu vervielfältigen oder zu verbreiten. Dasselbe gilt auch für das Recht der öffentlichen Wiedergabe. Der Verlag macht darauf aufmerksam, dass die genannten Firmen- und Markennamen sowie Produktbezeichnungen in der Regel marken-, patent- oder warenrechtlichem Schutz unterliegen.

Verlag und Autor übernehmen keine Gewähr für die Funktionsfähigkeit beschriebener Verfahren und Standards.

Das **Umschlagmotiv** zeigt die gekniffene Hysterese-Schleife im Strom-Spannungs-Diagramm. Diese Kennlinie verläuft immer durch den Nullpunkt und gilt als Erkennungsmerkmal eines Memristors. Rechts unten ist das Schaltzeichen des Bauelements abgebildet, das Leon Chua 1971 theoretisch beschrieben hat.

© 2026 Brain-Media.de

ISBN: 978-3-95444-386-4

Cover: Brain-Media.de

Brain-Media.de

Dr. Holger Reibold – Huber-Müller-Str. 52 – 66113 Saarbrücken

info@brain-media.de – www.brain-media.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....I

Vorwort.....1

Die Frage hinter der Frage.....2

Eine Entscheidung aus dem Jahr 1945.....2

20 Watt.....3

Worum es in diesem Buch geht.....4

Chua-Intermezzo I.....5

1 Die Krise des Computers.....7

1.1 Die Erfolgsgeschichte des Transistors.....8

1.2 Die Geburt des modernen Computers.....12

1.3 Die Architektur von John von Neumann.....15

1.4 Der unsichtbare Flaschenhals.....19

1.5 Warum KI immer mehr Energie verschlingt.....22

1.6 Die Suche nach neuen Konzepten.....26

1.7 Management Summary.....29

2 Das fehlende Bauelement.....33

2.1 Die drei klassischen Grundbauelemente.....36

2.2 Eine überraschende Lücke.....39

2.3 1971 – eine Nacht, ein Diagramm.....42

2.4 Jahrzehntelang unbeachtete Idee.....45

2.5 Stanley Williams und das HP-Labor 2008.....47

2.6 Debatten und Missverständnisse....50
2.7 Management Summary....53
3 Der Widerstand, der sich erinnert....55
3.1 Was ein Memristor eigentlich ist....55
3.2 Warum Strom Spuren hinterlassen kann....57
3.3 Wie ein Bauelement ein Gedächtnis bekommt....59
3.4 Die Physik hinter dem Effekt....62
3.5 Erinnerung und Berechnung im selben Bauteil....64
3.6 Warum Memristoren mehr als nur Speicher sind....66
3.7 Management Summary....68
4 Warum das Gehirn anders rechnet....71
4.1 Das erstaunlich effiziente Organ im Kopf....71
4.2 Nervenzellen und Synapsen....73
4.3 Wie Lernen biologisch funktioniert....75
4.4 Warum das Gehirn so wenig Energie benötigt....77
4.5 Die Geburt des neuromorphen Computings....78
4.6 Memristoren als künstliche Synapsen....80
4.7 Management Summary....83
5 Wenn Speicher und Rechnen verschmelzen....85
5.1 Die Trennung von Speicher und Prozessor....85
5.2 Warum diese Trennung zum Problem geworden ist....87
5.3 Rechnen im Speicher: eine neue Idee....89
5.4 Crossbar-Arrays: das Herzstück der Technologie....91

5.5 Wie neuronale Netze direkt in Hardware arbeiten.....93
5.6 Das Potenzial für energieeffiziente KI.....95
5.7 Management Summary.....97
6 Warum die Zukunft noch nicht begonnen hat.....99
6.1 Von der Theorie zur industriellen Forschung.....99
6.2 Warum aus einer Entdeckung noch kein Produkt wird.....101
6.3 Die Milliardenwette der Chipindustrie.....102
6.4 Die drei großen Hürden.....104
6.5 Was heute bereits funktioniert.....106
6.6 Die Lektion der Halbleitergeschichte.....107
6.7 Management Summary.....108
7 Wo Intelligenz entsteht.....111
7.1 Warum komplexe Systeme faszinieren.....111
7.2 Zwischen Ordnung und Chaos.....113
7.3 Das Gehirn als Grenzgänger.....115
7.4 Memristoren und emergentes Verhalten.....116
7.5 Können Maschinen sich selbst anpassen?.....118
7.6 Die Wissenschaft hinter dem Edge of Chaos.....120
7.7 Management Summary.....122
8 Die Zukunft des Computers.....123
8.1 KI jenseits heutiger Rechenzentren.....123
8.2 Intelligenz am Rand des Netzes.....125
8.3 Die nächste Generation autonomer Maschinen.....126

8.4 Die Konkurrenten des Memristors....128
8.5 Drei mögliche Zukünfte....129
8.6 Die Frage, die noch niemand beantworten kann....131
8.7 Management Summary....132
Zum Schluss....134
Rückkehr nach Berkeley....134
Was wir wissen....135
Was wir noch nicht wissen....136
Schlussgedanke....136
Anhang A – Glossar....138
Anhang B – Die Geschichte des Memristors in Daten....144
Anhang C – Die wichtigsten Forscher und Unternehmen....148
Forscher....148
Unternehmen und Labore....149
Deutsche Forscher und Institute....150
Anhang D – Für Neugierige: Die Physik hinter dem Memristor....152
Die vier Grundgrößen und der Memristor....152
Hysterese und Pinched-Hysteresis-Loops....153
Filamentbildung in Oxidmaterialien....154
Volatile und non-volatile Memristoren....154
Crossbar-Architekturen....155
Dynamic Route Maps....156
Lokale Aktivität....156

Edge-of-Chaos-Konzepte....157
Periphere Schaltungstechnik (DAC, ADC, Sensing)....158
Literatur und Quellenverzeichnis....160
Bücher....160
Übersichtsarbeiten....160
Fachartikel....161
Online-Ressourcen....164
Historische Originalarbeiten....165
Stichwortverzeichnis....167
Mehr von Brain-Media.de....170

Vorwort

Berkeley, Kalifornien, 1971. Leon Chua, Professor an der University of California, sitzt an seinem Schreibtisch und zeichnet ein Diagramm. Vier Ecken, vier Verbindungen. Drei Ecken sind besetzt: Widerstand, Kondensator, Spule. Die vierte Ecke bleibt leer.

Chua ist kein Bastler, er ist Mathematiker. Und die Mathematik sagt ihm, dass diese vierte Ecke existieren muss – nicht bloß als theoretische Möglichkeit, sondern zwingend, so zwingend wie die vierte Seite eines Quadrats. Er nennt das fehlende Bauelement Memristor, eine Wortschöpfung aus Memory und Resistor, also Erinnerung und Widerstand. Dann publiziert er seine Idee und wartet.

Die Antwort der Fachwelt: Schweigen. Kein Labor baut den Memristor nach. Kein Unternehmen zeigt Interesse. 37 Jahre lang bleibt die vierte Ecke leer.

Dann, im Jahr 2008, meldet sich ein Forscherteam der Hewlett-Packard-Labore in Palo Alto. Die Wissenschaftler um R. Stanley Williams haben ein Bauelement untersucht, das sich merkwürdig verhält. Sein Widerstandswert hängt nicht nur vom aktuellen Strom ab, sondern von allem Strom, der jemals durch es geflossen ist. Das klingt nach einem Defekt. Es ist das fehlende vierte Bauelement.

Dieses Buch erzählt, warum das mehr ist als eine Kuriosität der Elektronik.

Die Frage hinter der Frage

Wir leben in einer Zeit, in der künstliche Intelligenz mehr Strom verbraucht als ganze Länder. Ein einziges Gespräch mit einem großen Sprachmodell kostet ein Vielfaches dessen, was eine einfache Suchanfrage benötigt. Die Rechenzentren wachsen, die Energiekosten steigen, und irgendwo in diesem Wachstum steckt eine grundlegende Frage: Haben wir die richtige Architektur für das gewählt, was wir von Computern verlangen? Das Problem sitzt nicht in der Software. Es sitzt tiefer.

Eine Entscheidung aus dem Jahr 1945

John von Neumann beschrieb 1945 in einem internen Bericht die Grundstruktur des modernen Computers. Prozessor und Speicher sind getrennte Einheiten, verbunden durch einen Bus, über den Daten transportiert werden. Diese Architektur war für die damalige Zeit brillant. Sie war klar, sie war beherrschbar, und sie setzte sich durch.

Achtzig Jahre später ist sie zum Engpass geworden. Der Prozessor rechnet schnell. Der Speicher ist groß. Aber der Bus zwischen beiden ist schmal im Verhältnis zu dem, was beide leisten könnten. Bei jeder KI-Berechnung müssen riesige Datenmengen aus dem Speicher in den Prozessor transportiert, dort verarbeitet und wieder zurückgeschrieben werden. Dieser Transport kostet Zeit. Er kostet Energie. Und er kostet beides in einem Maß, das mit jedem neuen Modell weiter steigt.

Ingenieure nennen diesen Engpass den Von-Neumann-Flaschenhals. Er lässt sich nicht durch schnellere Prozessoren beheben. Er lässt sich nur durch eine andere Architektur beheben.

20 Watt

Das menschliche Gehirn rechnet mit 20 Watt. Nicht 20 Kilowatt. Nicht 20 Megawatt. 20 Watt, etwa so viel wie eine Glühbirne. Es verarbeitet dabei mehr Informationen als jeder heutige Computer, und es lernt dabei. Das Gehirn trennt Speicher und Verarbeitung nicht. Es speichert dort, wo es verarbeitet. In den Synapsen.

Eine Synapse, die häufig benutzt wird, verändert sich. Sie wird stärker. Eine Synapse, die selten benutzt wird, schwächt sich ab. Das Gehirn schreibt seine Erfahrungen direkt in seine Hardware. Es gibt keinen separaten Bus, der Daten von einem Ort zum anderen transportiert. Speicher und Rechner sind dasselbe.

Der Memristor ist, soweit wir heute wissen, das erste elektronische Bauelement, das dieses Prinzip nachbilden kann. Er speichert und verarbeitet im selben Element. Er verändert seinen Widerstand abhängig von seiner Geschichte. Er erinnert sich.

Das klingt nach Zukunftsmusik. Es ist Physik.

Worum es in diesem Buch geht

Dieses Buch ist für Leser geschrieben, die verstehen wollen, wie Computer wirklich funktionieren und warum sie so gebaut sind, wie sie gebaut sind. Es setzt keine Vorkenntnisse in Elektrotechnik voraus. Es setzt Neugier voraus.

Wer tiefer einsteigen will, findet im Anhang die Physik: Hysterese, Filamentbildung, Crossbar-Architekturen, Edge-of-Chaos-Mathematik. Der Haupttext kommt ohne Formeln aus. Nicht weil die Mathematik unwichtig wäre, sondern weil die Geschichte ohne sie funktioniert.

Jedes Kapitel endet mit einem kurzen Management Summary für Leser, die einzelne Abschnitte später nachschlagen wollen.

Herzlichst

Holger Reibold

Chua-Intermezzo I

Berkeley, 1971.

Leon Chua sitzt an seinem Schreibtisch und zeichnet ein Diagramm. Vier Ecken. Vier Verbindungen. Drei Ecken sind besetzt. Die vierte bleibt leer.

Er schreibt das Paper in wenigen Wochen. Es ist mathematisch sauber, formal korrekt, logisch zwingend. Er schickt es an das IEEE Transactions on Circuit Theory. Die Redaktion nimmt es an.

Chua wartet.

Die Fachwelt liest. Nickt vielleicht. Und wendet sich wieder den eigenen Projekten zu.

Niemand ahnt, dass diese leere Ecke 37 Jahre später ein Forscherteam in einem Hewlett-Packard-Labor in Palo Alto beschäftigen wird. Dass sie

Debatten über die Zukunft der künstlichen Intelligenz auslösen wird. Dass Forscher auf vier Kontinenten ihre Karrieren darauf aufbauen werden.

An diesem Abend in Berkeley ist sie nur eine leere Ecke in einem Diagramm.

Sonst nichts.

1 Die Krise des Computers

Im Jahr 1947 schraubten drei Physiker in einem Labor in New Jersey einen kleinen Metallstreifen auf ein Stück Germanium. Was sie dabei bauten, war kleiner als ein Fingernagel und unscheinbarer als ein Radiobauteil. Es funktionierte. Und es veränderte alles.

Der Transistor war keine Erfindung, die jemand bestellt hatte. Er war das Ergebnis einer Suche nach einem besseren Schalter, einem zuverlässigeren Verstärker, einem haltbareren Ersatz für die Elektronenröhre. William Shockley, John Bardeen und Walter Brattain bekamen dafür 1956 den Nobelpreis. Was sie nicht bekamen, war eine Ahnung davon, was aus ihrer Erfindung werden würde.

Heute stecken in einem einzigen modernen Prozessor mehr als 50 Milliarden Transistoren. Jeder einzelne kleiner als ein Virus. Jeder einzelne schaltend in einem Takt von mehreren Milliarden Zyklen pro Sekunde. Die Rechenleistung eines heutigen Smartphones übersteigt die Rechenleistung aller Computer zusammen, die die NASA 1969 für die Mondlandung einsetzte.

Das ist die Erfolgsgeschichte. Sie hat einen Haken.

Die Architektur, auf der diese gesamte Rechenleistung aufbaut, stammt aus dem Jahr 1945. Sie wurde entworfen, als ein Computer ein Zimmer füllte, als Transistoren noch nicht existierten und als künstliche Intelligenz ein Begriff war, den noch niemand kannte. Sie funktioniert. Sie hat die digitale Revolution getragen. Aber sie war nie dafür gedacht, was wir heute von ihr verlangen.

1.1 Die Erfolgsgeschichte des Transistors

William Shockley war kein angenehmer Mensch. Er war ehrgeizig, misstrauisch gegenüber seinen Mitarbeitern und neigte dazu, Erfolge für sich zu beanspruchen, die andere erarbeitet hatten. Aber er war ein außergewöhnlicher Physiker. Und im Dezember 1947 war er Teil von etwas, das die Welt verändern würde, auch wenn er in jenem Moment noch nicht wusste, wie grundlegend.

John Bardeen und Walter Brattain hatten die entscheidende Arbeit geleistet. Sie hatten den ersten funktionierenden Transistor gebaut, einen Punkt-Kontakt-Transistor aus Germanium, der elektrische Signale verstärken konnte, ohne die Hitze, die Fragilität und den Energiehunger einer Elektronenröhre. Shockley, der an jenem Tag nicht im Labor war, verbrachte die folgenden Wochen damit, eine eigene, verbesserte Version zu entwickeln. Den Bipolartransistor. Er war kompakter, stabiler und leichter herzustellen.

1956 bekamen alle drei den Nobelpreis für Physik. Die Laudatio sprach von einer Revolution in der Elektronik. Das war keine Übertreibung, aber es war auch keine vollständige Beschreibung. Es war eine Revolution in allem.

Der Transistor ersetzt die Elektronenröhre. Das klingt nach einem technischen Detail. In Wirklichkeit ist es der Unterschied zwischen einem Computer, der ein ganzes Gebäude füllt, und einem Computer, der in eine Hosentasche passt. Elektronenröhren sind groß, heiß, energiehungrig und ständig am Durchbrennen. Der ENIAC, einer der ersten elektronischen Großrechner, enthielt knapp 18.000 Röhren. Er verbrauchte 150 Kilowatt Strom. Er fiel im Schnitt alle paar Stunden aus, weil irgendeine Röhre ihren Dienst quittierte.

Der Transistor löste all diese Probleme auf einen Schlag: Da er im Vergleich zur Röhre winzig ist, kaum Wärme erzeugt und jahrzehntelang hält, ebnete er den Weg für eine völlig neue Dimension der Elektronik. Und er lässt sich miniaturisieren, immer weiter, immer kleiner, ohne dass seine Funktion darunter leidet. Das war die eigentliche Entdeckung, nicht der erste Transistor, sondern die Erkenntnis, dass er keine untere Grenze seiner Größe zu haben schien.

Gordon Moore, Mitgründer von Intel, beschrieb 1965 eine Beobachtung, die als Mooresches Gesetz die Tech-Welt prägen sollte: Er prognostizierte zunächst eine jährliche Verdopplung der Komponenten auf einem Chip – einen Rhythmus, den er zehn Jahre später selbst auf ein realistischeres Intervall von etwa alle zwei Jahre korrigierte. Das war keine physikalische Gesetzmäßigkeit. Es war eine Beobachtung der Industrie, die sich selbst zur Vorgabe machte. Und sie hielt, über Jahrzehnte, mit einer Präzision, die Ökonomen und Ingenieure gleichermaßen verblüffte.

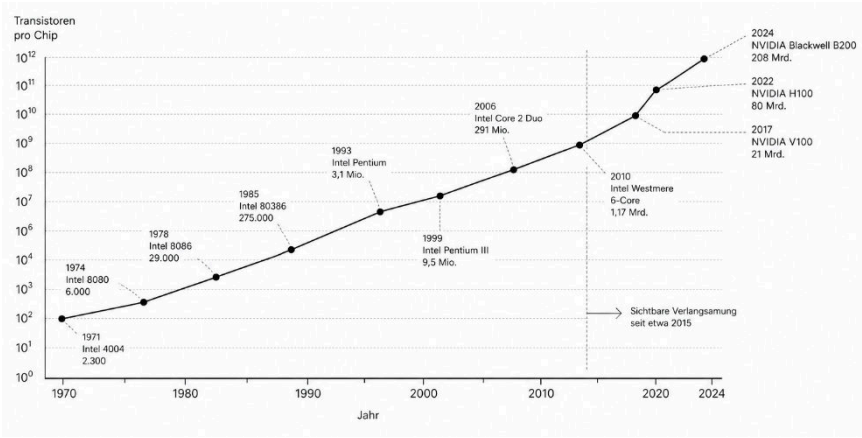


Abbildung 1: Die Entwicklung der Transistoranzahl ausgewählter Mikroprozessoren seit 1971. Auf logarithmischer Skala erscheint das jahrzehntelange exponentielle Wachstum nahezu als Gerade. Seit etwa 2015 verlangsamt sich die Entwicklung sichtbar.

Mehr von Brain-Media.de

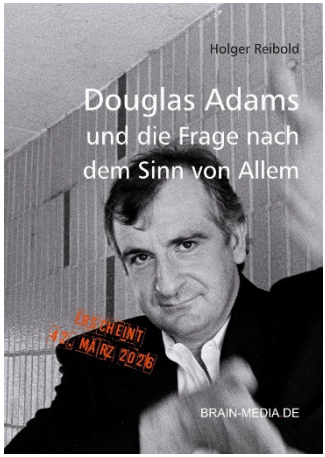
Brain-Media Compliance Complete

Der CRA steht selten allein. Wer Produkte mit digitalen Elementen herstellt, hat es meist auch mit NIS-2, der DSGVO, dem EU AI Act oder ISO 27001 zu tun. Brain-Media Compliance Complete bündelt dieses Wissen in einem Jahreszugang zur Fachbibliothek von Brain-Media.de. Ein Abonnement, ein Login, alle Titel.

Das Abonnement umfasst die aktuellen Compliance- und Zertifizierungstitel als E-Book, darunter Bücher zu NIS-2, DORA, CRA, EU AI Act, DSGVO und ISO 27001. Hinzu kommen die Bonus-Downloads zu den Büchern und die drei Research Reports zu Compliance- und ISMS-Software im DACH-Raum. Außerdem enthält es den Zugang zu den Prüfungsplattformen mit den Fragenpools für CISM, CISA, AAIA und CRISC. Alle Inhalte stehen in einer digitalen Bibliothek bereit. Das lohnt sich besonders, wenn im Unternehmen neben dem CRA weitere Regelwerke umzusetzen sind.

Details finden Sie unter folgender URL:

www.brain-media.de/compliance-complete.html



42 – Douglas Adams und die Frage nach dem Sinn von Allem

Am 11. Mai 2026 ist Douglas Adams 25 Jahre tot. Der Kultautor hat der Welt wunderbar, skurrile Werke geschenkt. Jetzt ist es an der Zeit, den Autor kennenzulernen.

Umfang: 140 Seiten

Preis: 14,99 EUR

Erschienen: 42. März 2026



Das Douglas-Adamds-Bundle:

das **Buch** Zweiundvierzig**,**

das **Handtuch** zum Towelday

und

das **Hörbuch** für unterwegs.

Mit dem Towelday, erinnern sich Fans an Douglas Adams und huldigen dem Kultautor.

100 % intergalaktisch geprüfte Baumwolle, nachhaltig Produktion.

Exklusiv bei Brain-Media.de: Bundle zum Preis von 42 EUR.