

Forschungsschwerpunkte – Professor Rainer Waser

Fortschritte in der Elektrotechnik und Informationstechnik basieren überwiegend auf neuen Erkenntnissen auf dem Gebiet elektronischer Materialien. In diesem Sinne befasst sich die Arbeitsgruppe von Rainer Waser mit physikalischen und chemischen Phänomenen in **elektronischen Materialien**, die für künftige Informationsspeicher, neuartige Logikbauelemente, Sensoren oder zur Energiewandlung eingesetzt werden können. Ziel ihrer Forschung ist es, die Phänomene grundlegend besser zu verstehen, um so neue oder optimierte Bauelemente entwickeln zu können.

Forschungsschwerpunkt von Rainer Waser ist seit rund zehn Jahren das Phänomen des sogenannten **resistiven Schaltens** in Oxiden, insbesondere in Übergangsmetalloxiden und höheren Chalkogeniden. Bei resistiven Schaltern, die auch memristive Schalter genannt werden, lässt sich der elektrische Widerstand durch geeignete elektrische Signale permanent und reversibel ändern. Dabei kann ihr Energieumsatz um Größenordnungen kleiner sein als der von heutigen Speicher- und Logikelementen.

Das Grundprinzip des resistiven Schaltens ist bereits seit den 1960er-Jahren bekannt, wurde aber über Jahrzehnte hinweg nicht verstanden. Rainer Waser und seinen Mitarbeitern blieb es vorbehalten, dieses Prinzip aufzuklären. Der Schlüssel dazu waren frühere Erfahrungen mit **Ionentransport- und Redox-Prozessen** in oxidischen Dielektrika. Außerdem konnten sie zeigen, dass sich die schaltbare Region auf einen filamentären Bereich von ein bis zwei Nanometer Durchmesser beschränken lässt. Daraus ergibt sich ein enormes Potenzial für die weitere Miniaturisierung von Speicherelementen (K. Szot et al., Nature Materials 2006). Mit den nachfolgenden Arbeiten gaben Rainer Waser und seine Mitarbeiter dem Forschungsfeld des resistiven Schaltens, das sich inzwischen stürmisch entwickelt, entscheidende Impulse. Sie stellten eine neue Klassifizierung der wichtigsten Varianten des resistiven Schaltens vor. Die Varianten führten sie dabei erstmals auf verschiedene Grundtypen von Redox-Prozessen zurück (R. Waser und M. Aono, Nature Materials, 2007). Im Nachhinein kann man erahnen, warum es so lange dauerte, bis der Mechanismus des resistiven Schaltens aufgeklärt wurde. Zum einen hatte die Komplexität des Phänomens und die verwirrende Vielfalt an Varianten die Aufklärung verhindert. Zum anderen hatte der entscheidende interdisziplinäre Ansatz gefehlt, der Rainer Waser schließlich zum Durchbruch verhalf: Hinter einem scheinbar rein festkörperphysikalischen Phänomen eines künftigen Nanoelektronik-Bauelements verbarg sich eine elektrochemische Ursache. Den Forschern half ihre umfassende und tiefe Kenntnis der Redox-Vorgänge in Metalloxiden, um dies zu erkennen und die richtigen Schlussfolgerungen zu ziehen.

Ein weiterer Meilenstein war die Erfindung des sogenannten **Complementary-Resistive-Switch-Konzepts**, das ein bereits seit über 20 Jahren bekanntes Problem in der Schaltungstechnik löst. Alle Halbleiterspeicher sind auf der innersten Ebene matrixförmig verschaltet. Normalerweise benötigt man einen Auswahltransistor an jedem Kreuzungspunkt der Matrix, also für jede Speicherzelle. Könnte man auf diese Transistoren verzichten, würde man ganz erheblich Fertigungskosten sparen. Das war lange nicht möglich, weil sich eine Informa-

tionsüberlagerung zwischen den Zellen – das Übersprechen – nicht vermeiden ließ. Die Gruppe um Rainer Waser überwand dieses Hindernis durch eine geniale antiserielle Verschaltung der Zellen (E. Linn et al., Nature Materials 2010).

Resistive Speicherelemente ändern sehr schnell ihren Widerstand: Sie schalten mit Spannungspulsen von einigen Volt innerhalb einiger Nanosekunden. Andererseits können sie bei einem Bruchteil dieser Spannung den Widerstandswert bis zu zehn Jahre halten. Rainer Waser und seine Mitarbeiter konnten die Ursache für diese hochgradig **nichtlineare Schaltkinetik** experimentell ermitteln und theoretisch über die sogenannte Defektchemie, d. h. die Gitterfehlordnung des Materials erklären: Die lokale Erwärmung durch einen elektronischen Strom auf der Nanometerskala erhöht die Beweglichkeit der Sauerstoff-Ionen im Metalloxid und führt zu lokalen Redox-Prozessen (S. Menzel et al., Adv. Funct. Mat., Nov. 2011). Dies steht im engen Zusammenhang mit der neu gewonnenen Erkenntnis, dass resistive Schalter als kleine elektrochemische Zellen, d. h. als eine Art **Nanobatterien**, beschrieben und in der Schaltungstechnik entsprechend modelliert werden müssen (I. Valov et al., Nature Communications 2013).

Aktuell untersucht die Arbeitsgruppe spektroskopisch auf einer kleinen Längen- und Zeitskala den Valenzwechsel der Ionen während des Redox-Prozesses. Dies ist eng verknüpft mit der Wechselbeziehung zwischen punktförmigen Defekten im Kristallgitter und ausgedehnten, strukturellen Defekten in Oxiden und der Bildung elektronisch leitender Filamente beim resistiven Schalten. Die **theoretische Beschreibung** der resistiven Zustände und der Schaltprozesse soll durch eine Simulation erfolgen, die von atomistischen Ab-initio-Modellen und molekulardynamischen Ansätzen über Finite-Elemente-Methoden bis hin zum kompakten Modell des gesamten Bauelementes reicht. Diese Beschreibung soll die Details des Elektronen- und Ionentransports, der thermischen und mechanischen Verhältnisse und der Struktur der beteiligten Grenzflächen umfassen – und letztlich materialspezifische Vorhersagen ermöglichen.

Auf der Seite der Schaltungstechnik forscht die Arbeitsgruppe von Rainer Waser an Konzepten für künftige Computer, die nach dem Vorbild von biologischen Nervensystemen aufgebaut sind. Solche **neuromorphen Computer-Architekturen** sind möglicherweise eine energieeffiziente Alternative zu den heutigen Von-Neumann-Architekturen.

Die Kenntnis der Redox-Prozesse in resistiv schaltenden Metalloxid-Zellen soll genutzt werden, um künftig eine Brücke zu schlagen zu verwandten **elektrokatalytischen Prozessen**, die unter anderem in der Wasserelektrolyse für die Energietechnik bedeutsam sind.

Charakteristisch für die Forschungsstrategie von Rainer Waser ist, dass er die Sichtweise der Physik, der Chemie und der Elektro- und Informationstechnik bewusst verknüpft, um aus scheinbar zusammenhanglosen oder widersprüchlichen Darstellungen neue Erkenntnisse zu gewinnen. Diesen **interdisziplinären Ansatz** verfolgt die Gruppe um Rainer Waser auch bei weiteren Forschungsthemen, beispielsweise bei der Untersuchung der polaren Eigenschaften ungewöhnlicher Ferroelektrika oder beim Studium des Ladungstransports und des Redox-Verhaltens elektronisch aktiver Einzelmoleküle auf Oberflächen.