

DNA-Datenspeicher

Nachdem das 20. Jahrhundert als das der Festkörperphysik mit ihren revolutionären Auswirkungen auf die Hardware von Informations- und Kommunikationssystemen galt, spricht man im Fall des 21. Jahrhunderts auch vom Jahrhundert der Lebenswissenschaften bzw. der Biologie. Auch dieser werden weitestreichende Auswirkungen auf unser tägliches Leben vorausgesagt, vom biotechnologisch erzeugten Kraftstoff über gentechnisch basierte Fortschritte z.B. in der Medizin bis hin zu neuartigen Systemen der Informations- und Kommunikationstechnik. Im letzteren Bereich gehören die Bemühungen um die Realisierung von technischen Datenspeichern auf Basis der Desoxyribonukleinsäure (DNS bzw. englisch DNA), die in allen Lebewesen der Träger der Erbinformationen ist. Hier hat es in letzter Zeit bemerkenswerte Entwicklungsfortschritte gegeben. Vielleicht schon mittelfristig verspricht man sich davon die Nutzbarmachung von Informationsträgern mit höchsten Speicherdichten und besonders großen Alterungsbeständigkeiten.

Konventionelle Datenspeicher basieren typischerweise auf der Änderung physikalischer Eigenschaften von Werkstoffen. In Magnetbändern oder Festplattenlaufwerken sind dies magnetische, in DVDs oder Blu-Ray Disks optische und in normalerweise auf sogenannten flash-memories basierenden USB-Sticks oder Festkörperspeichern (Solid-State-Drive, SSD) elektrische Eigenschaften.

Im Fall der DNA sind die Informationen in der Molekülstruktur gespeichert und hier in der Abfolge der vier organischen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin (oft abgekürzt mit A, T, G und C). Die wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen der allgemeinen Gentechnik richten sich auf die Schaffung technischer Möglichkeiten zur Entschlüsselung und schließlich Manipulation der hier abgelegten Codes. Sowohl bei der DNA-Sequenzierung, also quasi beim Auslesen der Informationen, als auch beim sogenannten Genome Editing, also dem zielgerichteten Verändern der DNA, konnten inzwischen enorme Fortschritte gemacht werden. Zur Nutzung der DNA als technischer Da-

tenspeicher geht es nun „lediglich“ darum, einen binären Code aus Nullen und Einsen, wie er in jedem konventionellen Speichermedium abgelegt würde, einzusetzen in eine geeignete Abfolge der Nukleotide A, C, G und T und aus dieser Vorlage künstliche DNA herzustellen. Der so geschaffene Datenspeicher kann dann mit Standard-Gensequenziermaschinen wieder entziffert und schließlich mit dem eingangs genutzten Kodierungsverfahren wieder in die binären Ausgangsdaten zurückübersetzt werden. Außerdem ist es möglich, relativ schnell große Mengen von Kopien des Datenspeichers DNA herzustellen, z.B. mit Verfahren der sogenannten Polymerase-Kettenreaktion (polymerase chain reaction, PCR). Die DNA-Speichertechnik profitiert damit direkt von den Entwicklungen der allgemeinen Gentechnik. Wichtige Kenngrößen von digitalen Speichermedien sind die Speicherdichte (gemessen z.B. in bytes pro Volumeneinheit), die Zeitdauer der fehlerfreien Datenhaltung (Retention bzw. Alterungsbeständigkeit), die Zugriffsgeschwindigkeit (ergibt sich aus interner Zugriffszeit und der Datenübertragungsrate) sowie der Energieverbrauch (sowohl während des Zugriffs als auch im „Ruhezustand“). Bezüglich jeder dieser Kenngrößen haben die konventionellen Speichertypen teilweise rasante Entwicklungsfortschritte hinter sich, können aber in absehbarer Zeit nicht mehr mit dem Bedarf mithalten, wenn es um die Archivierung größter Datenmengen über lange Zeiträume hinweg geht. Vor allem ihre Alterungsbeständigkeit macht hier Probleme. Gegenwärtige Speichermedien haben allenfalls Alterungsbeständigkeiten von wenigen Jahrzehnten, und auch das nur, wenn die sich weiterentwickelnde Informationstechnik dauerhaft Schnittstellen (und die nötige Software) für ihre Nutzung bereitstellt. Bis heute werden für die Archivierung häufig Magnetbänder eingesetzt, die allerdings regelmäßig aufgefrischt werden müssen. Der molekulare Speicher DNA dagegen ist bei geeigneter Lagerung (kühl und lichtgeschützt) nahezu beliebig lange haltbar, wie z.B. die erfolgreiche Untersuchung der DNA in Neandertalerknochen gezeigt hat. Außerdem ist nicht

damit zu rechnen, dass die Menschheit irgendwann das Interesse an das Erbgut betreffenden Fragen verliert. So ist gewährleistet, dass es immer passende Lesegeräte für DNA-Datenspeicher geben wird.

Auch bezüglich der Speicherdichte sind DNA-Datenspeichern ihren konventionellen Konkurrenten weit überlegen. So ist es im Prinzip möglich, in einem Kubikmillimeter DNA 10¹⁸ Bytes an Daten zu speichern (1 Million Terabyte, TB). Damit werden die besten konventionellen Speicher um mindestens den Faktor 10⁶ übertroffen.

Dem großtechnischen Einsatz von DNA-Datenspeichern stehen allerdings auch einige mehr oder weniger entscheidende Probleme entgegen. So müssen Korrekturmechanismen für die Fehler entworfen bzw. verbessert werden, die bei der Synthetisierung und Sequenzierung von DNA immer wieder auftreten. Auch müssten die hierbei möglichen Geschwindigkeiten gegenüber heutigen Verfahren um mehrere Größenordnungen steigen, um mit konventionellen Datenspeichern konkurrenzfähige Zugriffsgeschwindigkeiten beim Ein- und Auslesen zu erreichen. Nicht zuletzt müssten die Kosten stark sinken und je nach gedachtem Einsatzprofil die Schaffung geeigneter Aufbewahrungsbedingungen für DNA praktikabel dargestellt werden.

So sind im Prinzip also alle Technologien zur Nutzbarmachung von DNA als Datenspeicher bereits vorhanden und werden schon im Rahmen der allgemeinen Gentechnik ständig weiterentwickelt und verbessert. Ihren weiteren Vorteilen (insbesondere extreme Alterungsbeständigkeit und höchste Speicherdichten) stehen aber auch Nachteile gegenüber. Im Vergleich mit konventionellen Speichermedien sind die Verfahrensschritte aufwendig bzw. teuer sowie relativ schwierig zu automatisieren und in praktikabel nutzbare mobile Systeme einzubinden. Deshalb sind sie vor allem für die stationäre Archivierung größter Datenmengen über lange Zeiträume hinweg geeignet. Aus technischer Sicht sollten sie hier bereits mittelfristig praktikabel einsetzbar sein.

Jürgen Kohlhoff