



Themenkurzprofil Nr. 76  
Dezember 2024

## Technologische Ansätze zur Langzeitarchivierung von Daten

Christoph Bogenstahl

### In Kürze

Das über längere Zeit zu speichernde Datenvolumen wächst in Deutschland und weltweit aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung kontinuierlich an: Nach jüngsten Schätzungen entstehen global jeden Tag etwa 330 Mio. Terabyte an neuen Daten, wobei 90 % der weltweiten Datenmenge allein auf die letzten beiden Jahre entfielen. Ein Teil dieser Daten ist für die Entstehung, Kommunikation und Verbreitung von Wissen oder das gesellschaftliche Miteinander für gegenwärtige und künftige Generationen von besonderer Bedeutung als wissenschaftliches und kulturelles Erbe. Diese besonders schützenswerten Daten sollen u. a. in Forschungseinrichtungen, Museen, Bibliotheken oder Archiven möglichst unbefristet aufbewahrt und zugänglich gemacht werden.

Die Langzeitarchivierung von Daten ist technisch und organisatorisch sehr anspruchsvoll. Daten sind an Archivmedien gebunden, die eine unterschiedlich lange Lebensdauer haben, darunter Mikrofilme und Magnetbänder. Die verwendete Hard- und Soft-

ware sowie die verwendeten Dateiformate unterliegen dem technologischen Wandel und veralten rasch. Auch müssen vielfältige Informationen über die jeweiligen Datensätze (Metadaten) aufbewahrt werden, um Letztere auch nach Jahren noch lesen und weiterverwenden zu können. Zudem ist die elektronische Archivierung großer Datenbestände in der Regel ressourcen- und energieintensiv. Insbesondere die Langzeitarchivierung selten genutzter Daten in den weltweit wachsenden Serverfarmen ist unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten problematisch.

Für die Langzeitarchivierung von Daten des kulturellen und wissenschaftlichen Erbes werden Archivmedien mit hoher Speicherdichte, geringem Energieverbrauch und einer möglichst langen Lebensdauer benötigt. An technologischen Ansätzen, wie der Datenspeicherung mittels DNA, Glas oder Phasenwechselspeichern (PCM) sowie atomaren Datenspeichermöglichkeiten, wird geforscht.

## Hintergrund und Entwicklungsstand

Bis heute ist Pergament eines der langlebigsten analogen Speichermedien: Schriftstücke sind bei richtiger Lagerung auch nach 5.000 Jahren noch lesbar. Aus diesem Grund druckt das britische Oberhaus Urschriften von Gesetzestexten bis heute auf Pergament und lagert sie im Parlaments- und als redundante Sicherung im Nationalarchiv (Willeitner 2016).

Bei digitalen Speichermedien hingegen spricht man bereits ab einer zehnjährigen Aufbewahrungsfrist von Langzeitarchivierung. Viele Dateiformate sind bereits nach wenigen Jahren veraltet, mitunter können die gespeicherten Daten nur mit hohem Aufwand reproduziert werden. Beispielsweise stellte die NASA 1999 fest, dass sie das auf den Magnetbändern der Viking-Mars-Mission von 1975 verwendete Dateiformat nicht mehr lesen konnte. Da die ursprünglichen Programmierer/innen verstorben oder nicht mehr auffindbar waren, gelang die Datenrekonstruktion erst nach monatelanger Untersuchung der verwendeten Aufnahmegeräte. In einem ähnlichen Fall konnten die Aufzeichnungen von Apollo-Experimenten der Jahre 1969 bis 1972 erst 2010 durch aufwendige Wiederherstellung der auf 440 Magnetbändern gespeicherten Rohdaten für die NASA wieder nutzbar gemacht werden (Nagihara et al. o. J.).

Probleme gab es auch beim „BBC Domesday Project“, einem 1986 gestarteten multimedialen Vorhaben der British Broadcasting Corporation (BBC 2018). Anlässlich des 900-jährigen Jubiläums des historischen „Domesday Book“<sup>1</sup> sollte eine umfassende Bestandsaufnahme des Lebens in Großbritannien erstellt und digital dokumentiert werden. Über eine Million Freiwillige, darunter Repräsentant/innen von Schulen und Gemeinden, trugen Informationen, Bilder und Berichte über ihr lokales Umfeld bei. Im Projekt wurde eine damals neue Technologie genutzt, um die eingesendeten Beiträge auf optischen Datenträgern zu speichern.<sup>2</sup> Die erforderlichen Soft- und Hardwarekomponenten veralteten jedoch rasch, bereits nach 16 Jahren schienen die Daten verloren (McKie/Thorpe 2002). Erst 2011 gelang es, die Aufzeichnungen zu retten und in einer modernen Webversion zugänglich zu machen. Das „BBC Domesday Project“ gilt heute als Pionierprojekt der digitalen Archivierung, das früh die Herausforderungen bei der Langzeitbewahrung digitaler Daten aufzeigte.<sup>3</sup>

1 Ein umfassendes Grundbuch Englands, das 1086 unter König Wilhelm dem Eroberer erstellt wurde.

2 Für das Project wurden speziell angepasste Laserdiscs verwendet, mit einem ebenfalls speziellen Format, dem LaserVision Read Only Memory (LV-ROM). Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Hard- und Softwarekomponenten findet sich unter (Domesday86.com o. J.).

3 Weitere Beispiele sind im Artikel von Rothenberg (1995) enthalten, der bereits auf die Herausforderungen der Langzeitarchivierung hinweist und „besondere Erhaltungsmaßnahmen“ fordert (wie die regelmäßige Datenmigration aufgrund der „Unbeständigkeit digitaler Speichermedien“ oder „bei Bedarf ein längst obsoletes System zu simulieren“).

## Aufgaben der digitalen Langzeitarchivierung

Archive sollen materielle und immaterielle Güter, die von historischem, rechtlichem, kulturellem oder wissenschaftlichem Wert sind, für die Nachwelt aufbewahren und zugänglich machen (Destatis 2017). In der von der UNESCO am 10. November 2011 verabschiedeten „Declaration on Archives“ sowie der am 17. Oktober 2003 verabschiedeten „Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes“<sup>4</sup> werden zwei zentrale Aufgaben von Archiven benannt: Zum einen sollen sie das digitale kulturelle und wissenschaftliche Erbe bewahren und der Öffentlichkeit zugänglich machen. Zum anderen sollen sie durch die Dokumentation des Verwaltungshandelns als Säule des demokratischen Rechtsstaats wirken und als Dienstleister den Bürger/innen, der Verwaltung und der Forschung die archivierten Informationen unter Beachtung gesetzlicher Vorschriften zur Verfügung stellen (ICA 2011). In Deutschland hat das Bundesarchiv als selbstständige Bundesoberbehörde den gesetzlichen Auftrag, das Archivgut des Bundes auf Dauer zu sichern, wissenschaftlich zu verwerten und nutzbar zu machen. Die Bewahrung des kulturellen Erbes – also der Kulturgutschutz – ist Aufgabe von Bund und Ländern. In Deutschland ist dafür das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) verantwortlich (siehe nachfolgendes Praxisbeispiel).

Viele Archive, aber auch Museen, Bibliotheken und Kunstsammlungen digitalisieren ihre physischen Bestände, um sie als Digitalisate leichter einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und die Originale besser zu schützen. Damit gewinnt die Langzeitarchivierung von Daten, unter der das systematische und langfristige Verlagern schützenswerter Daten auf digitale oder analoge Archivmedien verstanden wird, zunehmend an Bedeutung. Das Ziel ist, dass diese Daten für zukünftige Generationen zugänglich bleiben und zur Forschung, Bildung sowie zur Wahrung des kollektiven Gedächtnisses beitragen können (UNESCO 2003).

## Herausforderungen bei der Langzeitarchivierung von Daten

Die UNESCO-Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes benennt als Herausforderungen u. a. „das schnelle Veralten von Hard- und Software“ (UNESCO 2003). Bestehende Speichertechnologien gelten technologisch als weitgehend ausgereizt. Die US-amerikanische Nationale Akademie der Wissenschaften schätzt, dass bereits gegen Ende des Jahrzehnts eine Angebotslücke bei der Speicherkapazität im Zettabyte-Bereich<sup>5</sup> entste-

4 Die UNESCO-Charta hält in Artikel 1 fest: „Das digitale Erbe besteht aus einzigartigen Quellen menschlichen Wissens und menschlicher Ausdrucksweisen. Es umfasst Quellen aus Kultur, Bildung, Wissenschaft und Verwaltung ebenso wie technische, rechtliche, medizinische und andere Arten von Informationen, die digital erstellt oder von existierenden analogen Datenträgern in digitale Form konvertiert wurden. Falls diese Quellen originär digital erzeugt wurden, existiert kein anderes als das digitale Format.“ (UNESCO 2003).

5 Ein Zettabyte entspricht 1.048.576 Terabyte.

hen könnte (Fullerton et al. 2024). Die Entwicklung ressourcenschonender, energieeffizienter und langlebiger Archivmedien mit hoher Speicherdichte – eine Art Pergament für das digitale Zeitalter – erscheint wichtiger denn je.

Für die Langzeitarchivierung von Daten werden unterschiedliche Speichermedien mit jeweils spezifischer Lebensdauer eingesetzt: Etliche analoge Speichermedien haben bei richtiger Lagerung eine lange Haltbarkeit, wie das geschilderte Beispiel von Papyrus zeigt. Auch Mikrofilme gelten als analoge Datenträger mit einer recht langen Haltbarkeit, man geht von ca. 500 Jahren aus (siehe Praxisbeispiel des BBK). Gepresste optische Datenträger halten über 50 Jahre<sup>6</sup>, Magnetbänder ca. 30 bis 50 Jahre. Festplatten haben die geringste Lebensdauer: SSD-Festplatten<sup>7</sup> halten 5 bis 10 Jahre, HDD-Festplatten<sup>8</sup> nur 3 bis 5 Jahre (Reder 2014).

Um Datensätze langfristig nutzen zu können, müssen auch Informationen zum Inhalt (z.B. Autorin bzw. Autor, Schlagworte, Inhaltsbeschreibung etc.), Speicherort, Dateiformat, Datenmenge, verwendeter Software oder Verknüpfungen mit anderen Dateien als Metadaten systematisch angelegt und gespeichert werden (Weber/Piesche 2021).

- 6 Die Haltbarkeit optischer Datenträger, wie Compact Discs (CD) oder Digital Versatile Discs (DVD), kann bisher nur geschätzt werden, man geht derzeit von deutlich unter 30 Jahren aus. Da bisher noch keine Langzeitstudien existieren, wird die Haltbarkeit basierend auf in Klimakammern durchgeführten Tests, die Alterungsprozesse simulieren, geschätzt (Reder 2014). Unterschiede in der Haltbarkeit ergeben sich ja nach Herstellverfahren: Gepresste DVDs oder CDs werden in einem industriellen Verfahren erstellt und sind unveränderlich, während gebrannte DVDs individuell erstellt werden, z. B. auf Heim-PCs in Privathaushalten. Gepresste optische Datenträger sind länger haltbar, weil die Informationen als physische Vertiefungen in die Disc gepresst werden, die sich kaum abnutzen. Die lichtempfindliche Farbschicht gebrannter Discs hingegen kann mit der Zeit verblassen oder durch Umweltfaktoren wie Licht und Wärme beschädigt werden.
- 7 Solid State Drive (SSD) haben einen Chip und kommen ohne mechanische Elemente aus.
- 8 Hard Disc Drive (HDD) verfügen über einen mechanischen Schreibkopf.



Auch die technologische Obsoleszenz (Alterung) der Komponenten – Hardware (z. B. Datenträger und Lesegeräte), Software und der verwendeten Dateiformate – ist eine Herausforderung bei der Langzeitarchivierung von Daten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die bestehenden Herausforderungen bei der derzeitigen Langzeitarchivierung von Daten und damit verbundene Aufgaben/Lösungsansätze.

### Praxisbeispiele zur Langzeitarchivierung von Daten

#### *Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und die Bundessicherungsverfilmung*

Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) sichert im Rahmen der Bundessicherungsverfilmung seit 1961 historisch bedeutsame Dokumente, wie beispielsweise die Entstehungsakte des Grundgesetzes der Bundesrepublik Deutschland. Diese Dokumente sollen insbesondere für den Fall bewaffneter Konflikte katastrophensicher aufbewahrt werden. Dazu werden die Originaldokumente (Archivalien) kopiert und die Kopien auf Mikrofilm ausbelichtet. Die Mikrofilme werden in einem stillgelegten Bergwerksstollen eingelagert. Dieser Stollen ist der Zentrale Bergungsort der Bundesrepublik (ZBO), er steht als einziger Ort in Deutschland unter dem Sonderschutz der Haager Konvention.<sup>9</sup> Die Mikrofilmaufnahmen können durch eine optimierte Lagerung mit eigens konzipierten Behältern bis zu 500 Jahre aufbewahrt und ohne technische Mittel, nur mithilfe einer Lichtquelle, ausgelesen werden (Feltes 2024; Pro-Physik 2019). Bislang wurden laut Angaben des BBK über 1 Mrd. Aufnahmen auf 32.000 km Mikrofilm ausbelichtet und in rund 1.600 Edelstahlbehältern eingelagert (BBK o. J.a).<sup>10</sup> Nachteile des Verfahrens sind die hohen Kosten bei gleichzeitig sehr geringer Speicherdichte, was den

9 Die Haager Konvention zum Schutz von Kulturgut ist „das zentrale internationale Abkommen, das den Erhalt kulturellen Erbes auch in Kriegszeiten sicherstellen soll.“ Mit dem Abkommen sollen Kulturgüter vor Zerstörung bei bewaffneten Konflikten geschützt werden (BBK o. J.b).

10 Da Mikrofilm ein analoges Speichermedium ist, können keine Mengenangaben in Byte gemacht werden.



Tabelle 1 Herausforderungen bei der Langzeitarchivierung von Daten

Herausforderung	Beschreibung	Lösungsansätze
Haltbarkeit der Speichermedien	Speichermedien wie Festplatten, CDs oder Magnetbänder, auf denen Daten digital gespeichert werden, haben eine begrenzte Lebensdauer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Speichermedien müssen regelmäßig ausgetauscht oder dupliziert werden, um Datenverluste zu vermeiden.</li> <li>▶ Entwicklung von Migrationsstrategien (adäquate Archivierungssysteme; automatisierte Migrationsprozesse etc.)</li> <li>▶ Verwendung von mindestens drei redundanten Kopien der Daten*</li> </ul>
Datenintegrität und -authentizität	Sicherstellen der Genauigkeit, Konsistenz und Zuverlässigkeit von Daten über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ digitale Signaturen und Prüfsummen verwenden</li> <li>▶ Versionierung von Daten</li> <li>▶ Verwendung von Audit-Logs zur Nachverfolgbarkeit</li> <li>▶ Bewahrung der entsprechenden Softwareumgebung</li> <li>▶ Pflege der Metadaten</li> </ul>
technologische Obsoleszenz	Hardware inklusive Lesegeräte, Software und Dateiformate können veralten, sodass archivierte Daten möglicherweise nicht mehr zugänglich sind oder der Zugriff zumindest erschwert ist.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ regelmäßige Formatmigrationen durchführen</li> <li>▶ Nutzung offener, standardisierter Formate</li> <li>▶ Simulation veralteter Systeme (Emulation)**</li> </ul>
Nachhaltigkeit und Energieverbrauch	Die dauerhafte Speicherung inklusive notwendiger Datenmigrationen von Daten ist energie- und ressourcenaufwendig (negativ hinsichtlich Nachhaltigkeit und Resilienz).	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ regelmäßige Überprüfung des Energieverbrauchs</li> <li>▶ Umstieg auf energieschonendere Alternativen</li> <li>▶ Datensparsamkeit***</li> <li>▶ Berücksichtigen energieunabhängiger Archivmedien (z. B. Magnetbänder, Mikrofilm)</li> </ul>

\* Das BSI (2023) empfiehlt, bei der Datenarchivierung mindestens drei redundante Kopien anzulegen auf zwei unterschiedlichen Medientypen und davon eine Kopie an einem anderen Lagerort.

\*\* Emulation ist der Vorgang, bei dem ein – beispielsweise neueres – System die Funktionen eines anderen (älteren) Systems nachahmt oder imitiert. Damit können auftretende Verluste einer Datenformatübertragung vermieden werden.

\*\*\* Der Begriff stammt ursprünglich aus dem Datenschutz, vor allem zum Schutz personenbezogener Daten. Im Kontext der Langzeitarchivierung von Daten sprechen auch Nachhaltigkeitsaspekte unter dem Stichwort Green IT für eine Reduzierung zu speichernder Daten im Sinne der Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks (Heber et al. 2024).

Quellen: Neuroth et al. (2010); Weber/Piesche (2021)

Einsatzbereich auf besonders wichtige Informationen eingrenzt (Weber/Piesche 2021).

### Das CERN mit dem LHC-Projekt

Das CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) zählt zu den bekanntesten Forschungseinrichtungen der Welt. Am Large Hadron Collider (LHC) werden große Datenmengen generiert, durchschnittlich 1 Petabyte<sup>11</sup> pro Tag. Die Rohdaten fließen in das speziell entwickelte Speichersystem Elastic Object Store (EOS) und werden in mehreren Schritten gefiltert, reduziert, aufbereitet und analysiert. Nur die aufbereiteten Daten werden auf Magnetbändern im CERN Tape Archive (CTA) langzeitarchiviert. Mit seinen fünf automatisierten Bibliotheken mit 60.000 Magnetbändern ist CTA das weltgrößte Magnetbandarchiv (Wolski 2024). Im Rahmen der Langzeitarchivierung werden die Inhalte älterer Magnetbänder kontinuierlich auf Bänder mit neuerer Technologie und höherer Dichte migriert. Ziel des CERN ist es, die Daten über Jahrzehnte zu erhalten und sicherzustellen, dass diese der wissenschaftlichen Gemeinschaft weltweit auch für zukünftige Experimente und Vergleiche zugänglich bleiben (CERN o. J.).

<sup>11</sup> Ein Petabyte entspricht 1.024 Terabyte.

### Mögliche zukünftige Langzeitspeichermedien

Um den kontinuierlich wachsenden Bedarf an Speicherkapazitäten zu decken, wird an unterschiedlichen Speichertechnologien und Langzeitspeichermedien geforscht. Nachfolgend werden vier dieser Technologien in Bezug auf den zukünftig möglichen Einsatz zur Langzeitspeicherung von Daten dargestellt.

#### DNA-Datenspeicherung

Ein Forschungsansatz zur Langzeitarchivierung von Daten basiert auf synthetischer DNA. Das Prinzip der DNA-Datenspeicherung beruht darauf, digitale Informationen als DNA-Basen (A, T, C, G) zu kodieren, synthetisch herzustellen und bei Bedarf durch Sequenzierung wieder auszulesen. Da DNA eine sehr hohe Speicherdichte hat, ist sie ein vielversprechendes Medium für die Langzeitspeicherung. In einem Gramm DNA können bis zu 215 Petabyte Daten gespeichert werden (Universität Marburg 2023). Für die Langzeitarchivierung wird synthetische DNA in Mikrokapseln eingeschlossen, die Schutz vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, Sauerstoff und UV-Strahlung bieten. Die in der DNA gespeicherten Daten können so auch bei Raumtemperatur über lange Zeiträume hinweg stabil gehalten werden – unabhängig von Stromversorgung und Betriebssystemen (Bonnet et al. 2010). Ergebnisse von Simulationsstudien der ETH Zürich

deuten auf eine Haltbarkeit von mehreren hundert Jahren unter diesen Bedingungen hin (Blume 2021).

Inzwischen gibt es erste prototypische Anwendungstests. 2021 wurde der Abschlussbericht des Hightech-Forums auch als synthetische DNA übergeben (Universität Marburg 2021). Die Teilnehmer/innen des Hightech-Forums erhielten Röhrchen, in denen die mit dem Ergebnisbericht kodierte synthetische DNA enthalten war. Die Röhrchen sollen 4 Jahre lang aufbewahrt, dann zurückgesandt und anschließend wieder dekodiert werden, um Rückschlüsse auf die Haltbarkeit von DNA-Speichern unter Realbedingungen ziehen zu können.

Befürworter halten diesen Ansatz zur Archivierung sehr großer Datenmengen über lange Zeiträume für grundsätzlich geeignet (Fraunhofer INT 2020). Bisher ist die Überführung von Daten in synthetische DNA und das Auslesen von DNA jedoch sehr aufwendig, der Schreib- und der Leseprozess dauern noch mehrere Wochen. Forschungsbemühungen zielen darauf ab, diese Prozesse effizienter und kostengünstiger zu gestalten.<sup>12</sup>

#### *Glas als Speichermedium (5D-Datenspeicherung)*

Ein anderer Forschungsansatz zur Langzeitarchivierung von Daten nutzt nanostrukturiertes Quarzglas. Diese Technik wird auch als 5D-Speicherung bezeichnet, da fünf Eigenschaften genutzt werden: die Größe, die Orientierung und die Position der nanostrukturierten Punkte innerhalb des Glases sowie zwei zusätzliche optische Eigenschaften, die bei der Lichtbrechung entstehen (Klapetz 2021). Diese fünf Dimensionen bieten in Kombination die Möglichkeit, extrem hohe Speicherkapazitäten und Langzeitstabilität zu erreichen, da Daten in mehreren Schichten auf das Glas gespeichert werden können. In Voxel (dreidimensionale Pixel) können Daten sehr dicht und ohne weiteren Energieverbrauch für eine sehr lange Zeit gespeichert werden (Klapetz 2023; Microsoft o. J.). Im Projekt „Silica“ arbeiten Forscher/innen des Unternehmens Microsoft Research daran, dass mehrere Terabyte Daten in Glasplatten von der Größe eines Bierdeckels für die Dauer von – so der Anspruch des Projekts – 10.000 Jahren aufbewahrt werden können (Nordenbrock 2023). Einmal auf Glas geschriebene Daten können einfach und ohne zusätzlichen Stromverbrauch gelagert werden, bis sie wieder genutzt werden. Der Glasspeicher bleibt auch unter Extrembedingungen stabil und lesbar, was ihn für Archivzwecke ideal macht.

Auch hier gibt es erste prototypische Anwendungsbeispiele. So wurden 2016 UNESCO-Dokumente, die zum Weltkulturerbe gehören, wie die Allgemeine Erklärung der Menschenrechte, auf 5D-Quarzglas gespeichert. Ziel der UNESCO ist es, zentrale Dokumente der Menschheitsgeschichte langfristig und auch unter Extrembedingungen sicher aufzubewahren. Auch am CERN wird



für die Aufbewahrung großer wissenschaftlicher Datenmengen eine Speicherung auf Glas in Erwägung gezogen (Krichmayr 2024). Hier wäre vor allem die hohe Speicherdichte der 5D-Datensicherung ausschlaggebend, um das CTA-Magnetbandarchiv (Praxisbeispiel) abzulösen.

Auch dieser Ansatz ist noch nicht marktreif. Insbesondere der Schreibprozess ist noch sehr aufwendig, weil der dazu erforderliche Femtosekundenlaser gegenwärtig noch sehr teuer ist (Blume/Holtermann 2024). Der Leseprozess ist demgegenüber weniger aufwendig, da die für das Auslesen von Daten benötigten optischen Abtastsysteme bereits seit einigen Jahrzehnten zur Verfügung stehen und u. a. in der Materialforschung sowie der Halbleiterindustrie eingesetzt werden. Perspektivisch hat Glas als Speichermedium jedoch das Potenzial, als langlebige, nachhaltige und kostengünstige Alternative heutige Speichermedien zu ersetzen, vor allem für die Datenlangzeitarchivierung (Nordenbrock 2023).

#### *Atomare Datenspeicherung*

Forschungsgruppen arbeiten an der Entwicklung von Speichermedien, die einzelne Atome oder Moleküle als Datenträger nutzen, wobei die Position eines Atoms eine 0 oder 1 kodiert. Die atomare Datenspeicherung befindet sich im frühen Forschungsstadium, vor allem, weil der Zustand der atomaren Bits noch nicht lange stabil bleibt. Fortschritte gelangen einer Forschungsgruppe der Universität Delft, die Chloratome als einlagiges regelmäßiges Gitter auf eine Kupferunterlage aufbrachte, um Informationen über die Gitteranordnung auf atomarer Ebene zu speichern. Zur Speicherung wurden Atombits zu Blöcken von je 8 Byte zusammengefasst. 14 dieser Blöcke ergeben 1 Kilo-byte Speicher, der nur 100 Nanometer breit ist. Dies ergibt eine theoretische Speicherdichte von 502 Terabits pro Quadratzoll – theoretisch könnten so alle Bücher der Menschheit auf einen Speicher in Briefmarkengröße geschrieben werden (scinexx.de 2016). Jedoch werden hierfür mit -230 °C äußerst niedrige Temperaturen benötigt, die Anwendungsreife ist damit noch weit entfernt.

<sup>12</sup> Siehe DNA Data Storage Alliance (2021) für weitere Informationen.



Eine andere internationale Forschungsgruppe unter der Leitung des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR) hat kürzlich ein Konzept vorgeschlagen, das auf atomaren Defekten im Halbleitermaterial Siliziumkarbid basiert (MDR 2024). Diese Defekte konnten durch fokussierte Ionenstrahlen erzeugt werden. Das Codierungsverfahren variiert die seitliche Position, Tiefe und Anzahl der atomaren Defekte. Die so in einem präzisen, schnellen und energieeffizienten Schreibvorgang erzeugten Informationen können beispielsweise durch Photolumineszenz optisch ausgelesen werden (Hollenbach et al. 2024). Die Forschungsgruppe unterstellt der atomaren Datenspeicherung eine lange Haltbarkeit (Pro-Physik 2024).

#### *Phase-Change-Memory*

Eine weitere, potenziell vielversprechende Speichertechnologie der nächsten Generation sind Phasenwechselfpeicher (Phase-Change-Memory – PCM). In PCM werden Materialien eingesetzt, die zwischen unterschiedlichen Phasen (z. B. amorph und kristallin) mit tiefer bzw. hoher elektrischer Leitfähigkeit wechseln können. Dieser Phasenzustand repräsentiert die Werte 0 oder 1 eines Bits. Das Auslesen des Bits erfolgt dann durch die Erkennung des Widerstands beim Anlegen eines schwachen Stromflusses (Schneider 2016).

Vorteile der Technologie liegen u. a. in der Nichtflüchtigkeit (Daten bleiben auch ohne Stromversorgung erhalten), der im Vergleich zu beispielsweise Flashspeichern<sup>13</sup> höheren Geschwindigkeit und Langlebigkeit. Die PCM-Speichertechnologie gilt daher

als Nachfolgekandidat von Flashspeichern (Eckstein 2022). In einem ersten Schritt können PCM zunächst auch mit Flashspeichern kombiniert werden (Nolte 2016). Forschungsbemühungen zielen darauf ab, die Baugröße, den Energieverbrauch und die Kosten von PCM-basierten Speichern weiter zu senken und die Integration in gängige Halbleiterbauelemente zu ermöglichen (Luber 2022). Zukünftig könnten diese Speicher auch für die Langzeitspeicherung von Daten an Bedeutung gewinnen.

## Gesellschaftliche und politische Relevanz

### **Bewahrung von wissenschaftlichem und kulturellem Erbe**

Die Bewahrung des kulturellen und wissenschaftlichen Erbes ist eine zentrale Aufgabe der Politik, da es die Geschichte, die Identität und das kollektive Gedächtnis einer Gesellschaft repräsentiert (UNESCO 2003). Dieses Erbe umfasst „einzigartige Quellen menschlichen Wissens und menschlicher Ausdrucksweisen“ aus „Kultur, Bildung, Wissenschaft und Verwaltung ebenso wie technische, rechtliche, medizinische und andere Arten von Informationen“ in Form von „Texte[n], Datenbanken, Fotografien und Filme[n], Audio, Grafiken, Software und Webseiten in einer wachsenden Vielfalt von Formaten.“ (UNESCO 2003, S. 1).

Bund und Länder erfüllen gemeinsam die Aufgabe der Bewahrung des wissenschaftlichen und kulturellen Erbes. In insgesamt 6.710 Museen, 9.117 Haupt- und Zweigstellen öffentlicher Bibliotheken sowie in 83 staatlichen Archiven des Bundes und der Länder wird Kulturgut gesammelt, aufbewahrt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht (Destatis 2017). Zu dieser Aufgabe gehört ebenso der Schutz des Kulturguts bei Katastrophenfällen

<sup>13</sup> Flashspeicher sind digitale Speicherbausteine, die häufig in Geräten wie USB-Sticks und Speicherkarten verwendet werden.

und in Krisensituationen, für den das BBK (o. J.b) auf Basis der Haager Konvention<sup>14</sup> verantwortlich ist. Im Geiste der Haager Konvention dient diese Aufgabe auch dem Erhalt des Kulturguts für die gesamte Menschheit „in der Überzeugung, dass jede Schädigung von Kulturgut, gleichgültig welchem Volke es gehört, eine Schädigung des kulturellen Erbes der ganzen Menschheit bedeutet“.<sup>15</sup> Eine besondere Rolle hat die Deutsche Digitale Bibliothek. Ihre Aufgabe ist, das wissenschaftliche Erbe Deutschlands zu bewahren, indem sie kulturelle und wissenschaftliche Bestände aus verschiedenen Einrichtungen digitalisiert, archiviert und langfristig zugänglich macht. Die Digitalisierung soll auch die Nutzung durch Forschende, Studierende und die breite Öffentlichkeit erleichtern (DNB o. J.).

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Langzeitarchivierung von Daten spielt eine Schlüsselrolle bei der Bewahrung des kulturellen Erbes im digitalen Zeitalter, die mehr Aufmerksamkeit verdient – auch im öffentlichen Diskurs. Es gilt sicherzustellen, dass die verantwortlichen öffentlichen Einrichtungen in der Lage sind, das zunehmend in digitaler oder digitalisierter Form vorliegende Kulturgut für zukünftige Generationen zu erhalten. Entsprechende Forschungsprogramme können dazu beitragen, möglichen Archivmedien der Zukunft zur Anwendungsreife zu verhelfen.

### Nationale und internationale Aktivitäten zur Langzeitarchivierung

In Deutschland widmen sich verschiedene Institutionen dem praxisorientierten Wissenstransfer und der Weiterentwicklung der Langzeitarchivierung von Daten. Sie können in dieser Funktion auch den Transfer von Forschungserkenntnissen in die Praxis unterstützen.

Nestor e. V. (Network of Expertise in Long-Term Storage of Digital Resources) ist ein an der Deutschen Nationalbibliothek angesiedeltes Kompetenznetzwerk, das sich auf die digitale Langzeitarchivierung spezialisiert hat und gegenwärtig vierzehn aktive Arbeitsgruppen für Interessierte aus privaten und öffentlichen Einrichtungen zu Themen wie „Archivstandards“, „digitale Bestandserhaltung“ und „Forschungsdaten“ organisiert. Dem Netzwerk gehören mehrere Institutionen an, u. a. das Deutsche Bundesarchiv, die Deutsche Kinemathek, die Deutsche Nationalbibliothek und die Leibniz-Informationszentren TIB und ZBW (nestor e. V. o. J.). Nestor wurde gegründet, um nationale und internationale Standards für die langfristige Erhaltung digitaler Daten zu fördern und Institutionen wie Bibliotheken, Museen

und Archive bei der Bewältigung dieser Herausforderungen zu unterstützen. Das nestor-Handbuch stellt ein umfassendes Kompendium der Langzeitarchivierung von Daten dar, allerdings datiert die letzte Aktualisierung auf das Jahr 2010.

### Ökologische Aspekte der Langzeitarchivierung

Bei der Weiterentwicklung der Langzeitarchivierung von Daten muss auch der jeweils notwendige Energie- und Ressourcenverbrauch bedacht werden.

Bei der Nutzung von Magnetbändern zur Langzeitarchivierung von Daten (siehe Praxisbeispiel CERN) ist beispielsweise der Energieverbrauch vergleichsweise gering, da nur beim Schreiben und Auslesen von Daten sowie gegebenenfalls für die Lagerung der Bänder in einer klimatisierten Umgebung Strom verbraucht wird. Zudem ist die Lebensdauer von Magnetbändern relativ hoch. Ähnlich verhält es sich mit optischen Speichermedien, wie beispielsweise Mikrofilm (siehe Praxisbeispiel BBK): Nach der Ausbelichtung des Mikrofilms wird keine konstante Stromversorgung mehr für die Aufrechterhaltung des Speicherzustands (passiver Zustand) benötigt. Auch Mikrofilm hat, wie bereits dargestellt, eine hohe Lebensdauer. Allerdings ist dessen Herstellung ressourcenintensiv und die Speicherdichte ist für die Archivierung größerer Datenmengen zu gering, sodass der Anwendungsbereich von Mikrofilmen begrenzt bleibt.

Der unter ökologischen Gesichtspunkten nachteiligste Ansatz besteht darin, Daten in Rechenzentren langfristig aufzubewahren, wo sie auf einer Vielzahl von hintereinander geschalteten Festplatten gespeichert werden, die sich ständig drehen und dabei Strom sowie Wasser zur Kühlung verbrauchen (Blume/Holtermann 2024). Zudem werden für die Herstellung der Datenspeicher wertvolle Rohstoffe wie Metalle, Halbleitermaterialien und Seltene Erden verbraucht. Diese Ressourcen können bei der Nutzung alternativer Archivmedien, wie Magnetbänder, Mikrofilm oder perspektivisch einem der zuvor genannten zukünftig möglichen Langzeitspeichermedien, eingespart werden. Ebenso muss der Flächenbedarf von Rechenzentren in der Umweltbilanz mit bedacht werden (Lobe 2023). Der eigentliche Vorteil von Rechenzentren ist die schnelle Datenverfügbarkeit. Diese spielt bei der Langzeitarchivierung von Daten jedoch keine ausschlaggebende Rolle, da die Daten in der Regel nur selten genutzt werden. Das Umweltbundesamt mahnt an, dass Rechenzentren effizient genutzt werden müssen: Es gelte zu vermeiden, dass „IT-Ressourcen ungenutzt sind und Energie im Leerlauf verbrauchen, ohne dass sie Rechenleistung erbringen“ (UBA 2022). Die Umweltbilanz ist folglich im Vergleich zu den drei Langzeitarchivierungsalternativen (optische Speicher, Magnetbänder, Mikrofilm) bei Rechenzentren besonders ungünstig, insbesondere wenn die Daten nur sehr selten benötigt werden.

14 Die weltweit von mehr als 130 Staaten ratifizierte Haager Konvention zum Schutz von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten von 1954 ist ein internationales Abkommen zum Schutz von Kulturgütern, das die Zerstörung, den Diebstahl und die Plünderung von Kulturgut in Kriegen oder bewaffneten Konflikten verbietet.

15 Auszug aus der Haager Konvention zum Schutz von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten von 1954, zitiert nach BBK (o. J.b).

Unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte könnten die DNA-Datenspeicherung oder die Nutzung von Glas als Speichermedium zukünftig eine energie- und ressourcenschonende Alternative darstellen.

## Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Die Herausforderungen bei der Datenlangzeitarchivierung dürften auf absehbare Zeit bestehen bleiben oder sogar zunehmen. Aufgrund der größer werdenden Bestände langzeitschützenswerter Daten und des Mangels an langlebigen Archivmedien verbleiben diese bisher oft auf den weltweit wachsenden Serverfarmen, was auch, aber nicht nur aus ökologischer Perspektive zunehmend problematisch ist. Die vorgestellten technologischen Ansätze zur Entwicklung langlebiger, energieeffizienter Archivmedien mit hoher Speicherdichte für die Langzeitarchivierung großer Datenmengen befinden sich noch in eher experimentellen Forschungs- und Entwicklungsphasen. Bei einer vertieften Bearbeitung des Themas könnten die jeweiligen Technologie-reifegrade detaillierter herausgearbeitet und Einschätzungen hinsichtlich der Eignung für die Langzeitarchivierung allgemein sowie für generische Anwendungsfälle (Einsatz in Bibliotheken, Museen, Forschungseinrichtungen etc.) entlang definierter Kriterien wie zu archivierende jährliche Datenmenge, Häufigkeit des Datenzugriffs etc. gegeben werden. Auch der zeitliche Horizont, ab wann mit der Verfügbarkeit der jeweiligen Archivmedien für Zwecke der Langzeitarchivierung von Daten gerechnet werden kann, könnte abgeschätzt werden.

Im Rahmen einer TA-Kompakt-Studie könnte des Weiteren ein vertiefender Vergleich verschiedener Ansätze zur Langzeitarchivierung von Daten hinsichtlich relevanter Parameter, wie Cybersecurity, Datenschutz und Privatsphäre, digitale Souveränität, aber ebenso mit Blick auf Nachhaltigkeitsaspekte und Energieeffizienz vorgenommen werden. Auch das Thema Datensparsamkeit könnte ergänzend zu den technischen Aspekten der Langzeitarchivierung von Daten bearbeitet werden. Datensparsamkeit im Kontext der Langzeitarchivierung bezeichnet den Ansatz, ausschließlich die für den langfristigen Zweck wesentlichen Daten zu speichern, um Speicherplatz, Kosten und Energieverbrauch zu minimieren und die Effizienz der Datenverwaltung zu steigern. Ohne Datensparsamkeit können Langzeitarchive schnell ineffizient und teuer werden.

## Literatur

- ▶ BBC (British Broadcasting Corporation) (2018): Domesday Reloaded Blog. <https://www.bbc.co.uk/blogs/domesday> (5.12.2024)
- ▶ BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (o. J.a): Barbarastollen. Bonn, [https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Schutz-Kulturgut/Wie-sichern-wir-Kulturgut/Barbarastollen/barbarastollen\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Schutz-Kulturgut/Wie-sichern-wir-Kulturgut/Barbarastollen/barbarastollen_node.html) (5.12.2024)
- ▶ BBK (o. J.b): Haager Konvention. [https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Schutz-Kulturgut/Was-ist-Kulturgut/Haager-Konvention/haager-konvention\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Schutz-Kulturgut/Was-ist-Kulturgut/Haager-Konvention/haager-konvention_node.html) (5.12.2024)
- ▶ Blume, J. (2021): Revolution in der Datenspeicherung: Eine Million Filme in einem Millimeter DNA. Handelsblatt, <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/insight-innovation-revolution-in-der-datenspeicherung-eine-million-filme-in-einem-millimeter-dna/27544074.html> (5.12.2024)
- ▶ Blume, J.; Holtermann, F. (2024): Das Yottabyte-Zeitalter – wie Glas unsere Daten rettet. Handelsblatt, <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/insight-innovation-das-yottabyte-zeitalter-wie-glas-unsere-daten-rettet/100019920.html> (5.12.2024)
- ▶ Bonnet, J.; Colotte, M.; Coudy, D.; Couallier, V.; Portier, J.; Morin, B.; Tuffet, S. (2010): Chain and conformation stability of solid-state DNA: implications for room temperature storage. In: *Nucleic acids research* 38(5), S. 1531–1546
- ▶ BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2023): Vorschläge zu Business-Continuity-Strategien (BC-Strategien). Hilfsmittel zum BSI-Standard 200-4. Community Draft 2.0, Bonn
- ▶ CERN (o. J.): CERN Tape Archive (CTA). <https://cta.web.cern.ch/cta/> (5.12.2024)
- ▶ Destatis (Statistisches Bundesamt) (2017): Spartenbericht Museen, Bibliotheken und Archive. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Kultur/Publicationen/Downloads-Kultur/spartenbericht-museen-5216205179004.html> (9.10.2024)
- ▶ DNB (Deutsche Nationalbibliothek) (o. J.): Die Deutsche Digitale Bibliothek. [https://www.dnb.de/DE/Professionell/ProjekteKooperationen/DDB/ddb\\_node.html](https://www.dnb.de/DE/Professionell/ProjekteKooperationen/DDB/ddb_node.html) (25.11.2024)

- DNA Data Storage Alliance (2021): An Introduction to DNA Data Storage. <https://dnastoragealliance.org/wp-content/uploads/2021/06/DNA-Data-Storage-Alliance-An-Introduction-to-DNA-Data-Storage.pdf> (5.12.2024)
- Domesday86.com (o. J.): Introduction to the BBC Domesday project. [https://www.domesday86.com/?page\\_id=2140](https://www.domesday86.com/?page_id=2140) (5.12.2024)
- Eckstein, M. (2022): Speicher: PCM, ReRAM, FRAM und MRAM im Aufwind. Marktanalyse zu aufstrebenden Speichertechniken. Elektronik Praxis, <https://www.elektronikpraxis.de/speicher-pcm-reram-fram-und-mram-im-aufwind-a-abb81bfa0e8b2e9adfa2cdb7ffb0d648/> (5.12.2024)
- Feltes, J. (2024): Die Umstellung der Bundessicherungsverfilmung – ein Schritt in die Zukunft des Kulturgutschutzes in Deutschland. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, [https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSMAG\\_Artikel/2024-02/2024-02\\_10.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSMAG_Artikel/2024-02/2024-02_10.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (5.12.2024)
- Fraunhofer INT (Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT) (2020): DNA-Datenspeicher. <https://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/corporate-technology-foresight/trend-news/dna-datenspeicher.html> (5.12.2024)
- Fullerton, E.; Hellmond, S.; Joshi, S.; McNamara, L. (2024): Rapid Expert Consultation on Archival Data Storage Technologies for the Intelligence Community. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, <https://nap.nationalacademies.org/read/27445/chapter/1> (5.12.2024)
- Heber, M.; Jakob, M.; Landwehr, M. et al.. (2024): Leitfaden zur digitalen Datensparsamkeit. In: O-Bib. Das Offene Bibliotheksjournal 11(2), S. 1–8
- Hollenbach, M.; Kasper, C.; Erb, D.; Bischoff, L.; Hlawacek, G.; Kraus, H.; Kada, W.; Ohshima, T.; Helm, M.; Facsko, S.; Dyakonov, V.; Astakhov, G. (2024): Ultralong-Term High-Density Data Storage with Atomic Defects in SiC. In: Advanced Functional Materials 34(27), Art. 2313413
- ICA (International Council on Archives) (2011): Universal Declaration on Archives – UDA. <https://www.ica.org/app/uploads/2024/01/English-%E2%80%93-Universal-Declaration-on-Archives-UDA.pdf> (5.12.2024)
- Klapetz, P. (2021): Datenspeicher für die Zukunft? Golem, <https://www.golem.de/news/studie-datenspeicher-fuer-die-zukunft-2111-160789.html> (5.12.2024)
- Klapetz, P. (2023): Quarzglas als Speichermedium der Zukunft. Golem, <https://www.golem.de/news/microsoft-quarzglas-als-speichermedium-der-zukunft-2310-178517.html> (5.12.2024)
- Krichmayr, K. (2024): Wie ein Gmundner mit Glaskeramik die Datensicherung revolutionieren will. Der Standard, <https://www.derstandard.de/story/3000000223715/wie-ein-gmundner-mit-glaskeramik-die-datensicherung-revolutionieren-will> (5.12.2024)
- Lobe, A. (2023): Das Internet frisst immer mehr Boden. Der Standard, <https://www.derstandard.de/story/3000000177463/bodenverbrauch-rechenzentren-server> (5.12.2024)
- Luber, S. (2022): Was ist Phase Change Memory (PCM) oder Phase Change RAM (PCRAM, PRAM)? Storage Insider, <https://www.storage-insider.de/was-ist-phase-change-memory-pcm-oder-phase-change-ram-pcram-pram-a-bad53f57767311f37155fc0d125b879b/> (5.12.2024)
- McKie, R.; Thorpe, V. (2002): Digital Domesday Book lasts 15 years not 1000. The Guardian, <https://www.theguardian.com/uk/2002/mar/03/research.elearning> (5.12.2024)
- MDR (Mitteldeutscher Rundfunk) (2024): Dresdner Forscher sichern Daten dauerhaft durch atomare Defekte, <https://www.mdr.de/wissen/naturwissenschaften-technik/siliziumkarbid-datenspeicher-daten-langzeit-speicherung-hzdr-dresden-100.html> (9.10.2024)
- Microsoft (o. J.): Sealed in glass. <https://unlocked.microsoft.com/sealed-in-glass/> (5.12.2024)
- Nagihara, S.; Williams, D.; Nakamura, Y.; Kiefer, W.; McLaughlin, S.; Taylor, P. (o. J.): Recovery, Restoration and Archiving of Previously Lost Data and Metadata from the Apollo Lunar Surface Experiments Package (ALSEP). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190032593/downloads/20190032593.pdf> (5.12.2024)
- Nestor e. V. (o. J.): Mitglieder. [https://www.langzeitarchivierung.de/Webs/nestor/DE/nestor/Mitglieder/mitglieder\\_node.html](https://www.langzeitarchivierung.de/Webs/nestor/DE/nestor/Mitglieder/mitglieder_node.html) (5.12.2024)
- Neuroth, H.; Oßwald, A.; Scheffel, R.; Strathmann, S.; Huth, K. (2010): nestor Handbuch: Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung. nestor, [http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/nestor-handbuch\\_23.pdf](http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/nestor-handbuch_23.pdf) (5.12.2024)

- Nolte, S. (2016): Phase Change Memory mit drei Bits pro Zelle. Heise online, <https://www.heise.de/news/Phase-Change-Memory-mit-drei-Bits-pro-Zelle-3209246.html> (5.12.2024)
- Nordenbrock, K. (2023): Lebensdauer von 10.000 Jahren: Microsoft arbeitet an Glas als Datenspeicher. t3n, <https://t3n.de/news/daten-10-000-jahre-speichern-microsoft-glas-datenspeicher-1582444/> (5.12.2024)
- Pro-Physik (2019): Langzeitspeicher Mikrofilm. <https://pro-physik.de/nachrichten/langzeitspeicher-mikrofilm> (5.12.2024)
- Pro-Physik (2024): Defekte im atomaren Maßstab ermöglichen langfristige Datenspeicherung. <https://pro-physik.de/nachrichten/defekte-im-atomaren-massstab-ermoeglichen-langfristige-datenspeicherung> (5.12.2024)
- Reder, B. (2014): Ratgeber Langzeitarchivierung: Auf immer und ewig archiviert. Computerwoche, <https://www.computerwoche.de/article/2714102/auf-immer-und-ewig-archiviert.html> (5.12.2024)
- Rothenberg, J. (1995): Die Konservierung digitaler Dokumente. Spektrum.de, <https://www.spektrum.de/magazin/die-konservierung-digitaler-dokumente/822525> (5.12.2024)
- Schneider, R. (2016): IBM-Forscher verbessern DRAM- und Flash-Alternative PCM. Silicon.de, <https://www.silicon.de/41626309/ibm-forscher-verbessern-dram-und-flash-alternative-pcm> (5.12.2024)
- Scinexx.de (2016): Erster atomarer Speicher mit einem Kilobyte. <https://www.scinexx.de/news/technik/erster-atomarer-speicher-mit-einem-kilobyte/> (5.12.2024)
- UBA (Umweltbundesamt) (2022): Rechenzentren. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/digitalisierung/gruene-informationstechnik-green-it/rechenzentren#undefined> (5.12.2024)
- UNESCO (2003): Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes. [https://www.unesco.de/assets/2003\\_Charta\\_zur\\_Bewahrung\\_des\\_digitalen\\_Kulturerbes.pdf](https://www.unesco.de/assets/2003_Charta_zur_Bewahrung_des_digitalen_Kulturerbes.pdf) (5.12.2024)
- Universität Marburg (2023): DNA als Datenspeicher: DNA-Aeon überträgt Information fehlerfrei. <https://www.uni-marburg.de/de/aktuelles/news/2023/dna-als-daten-speicher-dna-aeon-uebertraegt-information-fehlerfrei> (5.12.2024)
- Weber, A.; Piesche, C. (2021): Datenspeicherung, -kuration und Langzeitverfügbarkeit. In: Putnings, M.; Neumann, J.; Neuroth, H. (Hg.): Praxishandbuch Forschungsdatenmanagement. Berlin/Boston, S. 327–356
- Willeitner, J. (2016): Ein Datenträger für die Ewigkeit. Spektrum.de, <https://www.spektrum.de/news/pergament-konserviert-die-geschichte/1414311> (5.12.2024)
- Wolski, D. (2024): Teilchenbeschleuniger: Das CERN zeigt sein Stagesystem. Heise online, <https://www.heise.de/news/FOSDEM-24-Wie-das-CERN-mit-Petabyte-jongliert-9620497.html> (5.12.2024)

#### Herausgeber

Büro für Technikfolgen-Abschätzung  
beim Deutschen Bundestag (TAB)

#### Bildnachweise

BlackJack3D/iStock (S. 1); Becart/iStock (S. 3);  
piranka/iStock (S. 3, 5); hallojolie/iStock (S. 6)

ISSN: 2629-2874

DOI: 10.5445/IR/1000179504

## Horizon SCANNING

Das Horizon-Scanning ist Teil der Foresight-Aktivitäten des TAB und wird vom Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH durchgeführt.  
[www.tab-beim-bundestag.de/horizon-scanning](http://www.tab-beim-bundestag.de/horizon-scanning)