

Einleitung

Dies ist der dritte und zugleich letzte Band des dreiteiligen Handbuchs der Speicherung von Information. Bezüglich ihrer Inhalte und Abgrenzungen gilt **Bild 1**. Es entstand aus der Zusammenfassung und Ergänzung der Übersichten von den anderen Bänden. Inzwischen ist bei der Directmedia Publishing GmbH eine CD erschienen, auf der sich alle 3 Bände und auch [VÖL01]¹ enthalten sind.

Im *ersten Band* sind jene Speicherungen enthalten, die auch ohne absichtliches, menschliches Zutun erfolgen. Im Nachhinein ist dazu das neue Buch von JOHN D. BARROW [BAR06] sehr interessant. Hier fragt er u.a. nach der Herkunft der Konstanten (π , e usw.), der Naturkonstanten und -gesetze sowie Gründen für die klassischen drei räumlichen Dimensionen. Im Sinne der Speichertechnik bedeutet dies die Erkundung der zuständigen Speicherprozesse und -medien. BARROW findet jedoch leider keine geeigneten Antworten. Unabhängig von ihm sind im Band 1 dieses Handbuchs bereits einige, aber noch recht vorläufige Ansätze u.a. bezüglich Physik und Chemie enthalten. Sie müssten jetzt in Bezug auf das Buch von BARROW deutlich weiter vertieft werden. Doch da der erste Band bereits erschienen ist, bedarf dies einer gesonderten Untersuchung. Etwas unabhängig von der Speicherung enthält auch [VÖL01] einige indirekte Antworten. Wesentlich klarer sind die Speichereigenschaften der anderen, in Band 1 behandelten Gebiete: Kosmos, Geologie, Genetik, Hormone, Neuronen und Gedächtnis. Hier ist überwiegend eindeutig geklärt, wo und wie die Speicherung erfolgt. Schwieriger sind die Zusammenhänge jedoch wieder, sobald gesellschaftliche Aspekte, also hauptsächlich kulturelles, kollektives und geschichtliches Gedächtnis, einbezogen werden. Doch auch hierzu sind im Band 1 umfangreiche Aussagen vorhanden, und zusätzlich ist auf spezialisierte Vertiefungsliteratur verwiesen.

Im **Band 2** sind die vom Menschen geschaffenen, „klassischen“ Speichertechniken zusammengefasst. Dabei sind fast alle elektronischen Verfahren ausgespart. Es ist erstaunlich, wie groß dennoch die Vielfalt der vorhandenen Techniken ist. Überwiegend handelt es sich dabei allerdings um bildhafte Information. Ihr Spektrum reicht von Schrift über Druck, Zeichnung, Fotografie und Film bis zur Schallplatte. Gerade die beiden letzten Gebiete erforderten aber bereits die Einbeziehung einfacher elektrischer Schallaufzeichnungstechniken. Sonst wäre nämlich der Film nicht vollständig zu behandeln gewesen. Diese Ausnahme musste bei den Musikautomaten fortgesetzt werden.

Für diesen **Band 3** gibt es vom Autor mehrere ältere Buchproduktionen und Einzelpublikationen. Sie konnten nur teilweise und dann meist sehr stark verkürzt einbezogen werden. Das betrifft insbesondere Details der geschichtlichen Entwicklung, die im Rückblick nicht mehr so entscheidend sind. Außerdem gilt dies auch für einige spezialisierte Techniken. Doch für den Technikhistoriker könnten die Auslassungen eventuell wichtig sein. Da außerdem nur jene Einzelpublikationen zitiert sind, welche wesentlich die theoretische oder technische Entwicklung beeinflusst haben, sei darauf verwiesen, dass sich die vollständige Liste der Publikationen des Autors auf seiner Homepage² befindet. Umfangreicher wurden ausgewählte Bücher des Autors einbezogen. Zunächst gilt dies für die 6-bändige Reihe „Magnetische Signalspeicher“ von 1968 bis 1975 [VÖLZ0]. Eine wichtige Grundlage stellt die 1996 erschienene und zum großen Teil dennoch heute gültige Monographie [VÖLZ7] dar.

¹ Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Shaker Verlag, Aachen 2001

Völz, H.: Wissen – Erkennen – Information, Datenspeicher von der Steinzeit bis in das 21. Jahrhundert. CD Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

² Hier werden in absehbarer Zeit auch die meisten Bilder abrufbar bereitstehen. Sie werden auch durch viele hochaufgelöste Farbbilder einzelner Speicherdetails ergänzt: <http://rosw.cs.tu-berlin.de/voelz/index.html>

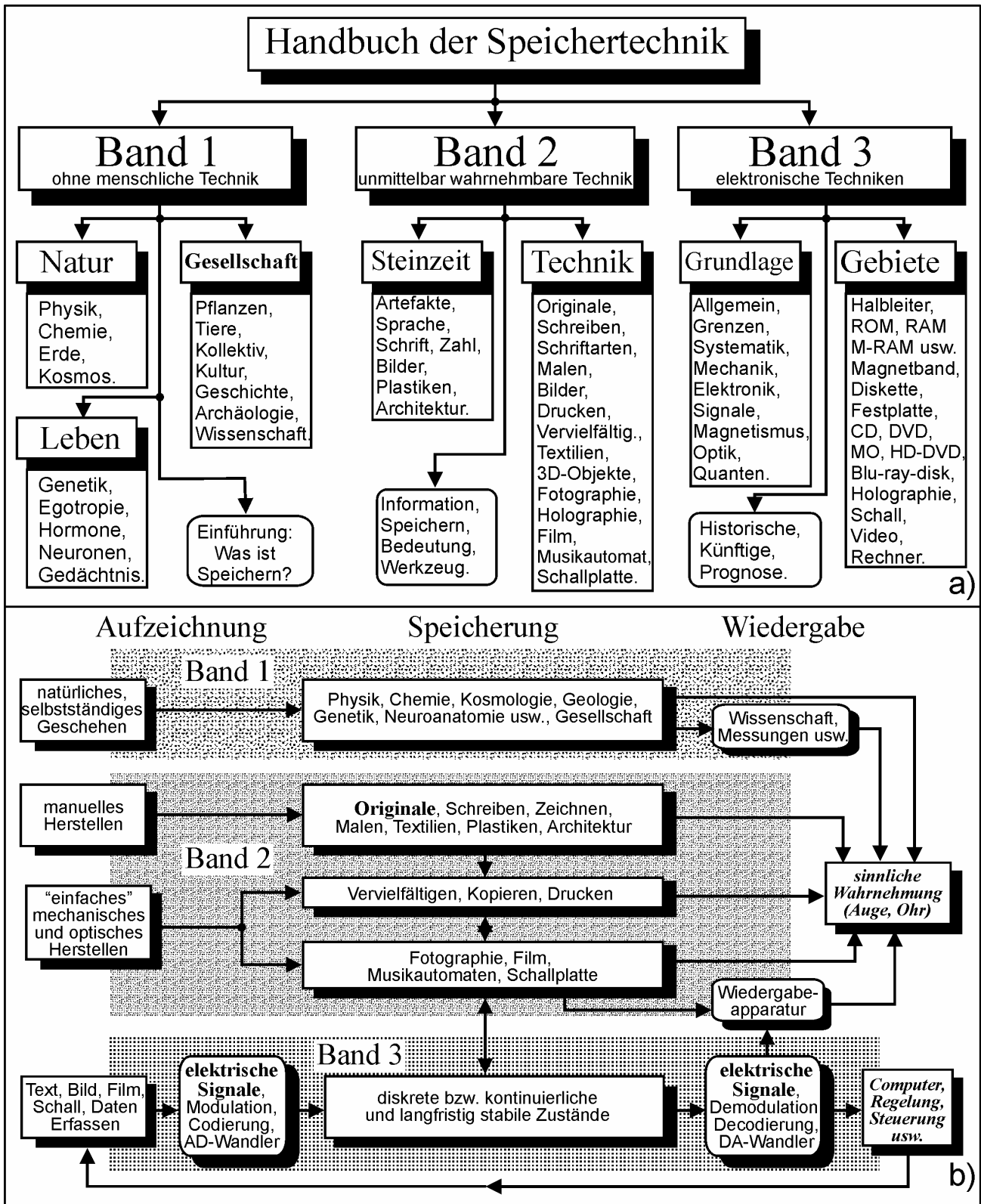


Bild 1. Überblick zum Inhalt der drei Bände dieses Handbuchs; a) betont die einzelnen Techniken, b) hebt die funktionalen Prozesse Aufzeichnung, Speicherzustand und Wiedergabe hervor. Letztlich werden jedoch nur Signale gespeichert und wiedergegeben, die für Menschen sinnlich wahrnehmbar sind. Elektronik ist kein Selbstzweck.

Doch auch von ihr konnte nicht alles direkt genutzt werden. Beim Übernehmen mussten sogar alle Texte, Bilder und Tabellen neu gestaltet und meist anders eingeordnet werden. Nur so konnte eine relativ homogene Darstellung des gesamten, sehr umfangreichen Gebiets

erreicht werden. Für wichtige Hintergrundinformationen, vorwiegend allgemeiner Art, wird außerdem häufig auf [VÖL01] verwiesen. In den genannten Büchern sind umfangreiche Literaturverzeichnisse vorhanden, von denen nur eine sehr kleine Auswahl übernommen wurde. Die fehlenden dürften jedoch insbesondere für historische Aussagen nützlich sein. Gegenüber den o.g. Büchern war eine Beschränkung auf rein technische Probleme nicht mehr möglich. U.a. mussten Backup, Archiv und Entscheidungen darüber, was gespeichert werden muss, berücksichtigt werden. Für die Weiterentwicklung der Speichertechnik zeichnen sich hier nämlich ganz neue Aspekte ab. Ferner wurden im Gegensatz zu den genannten Büchern auch heute noch wichtige ältere Verfahren und Grenzgebiete (z.B. Barcode) aufgenommen. Hinzu kommen Verfahren, die historisch bedeutsam sind, aber wegen der etwas abweichenden Thematik in den o.g. Büchern fehlen, z.B. Ferritkerne, Bubbles, Dünnschichtspeicher und Laserdisk. Sie sind zumindest für die historische Entwicklung sehr entscheidend gewesen, vertiefen aber auch das Verständnis moderner Techniken. Bei ihrer Übernahme ist zusätzlich berücksichtigt, dass hier vielleicht letztmalig die historische Entwicklung fixiert wird. Denn das Schrifttum hierzu ist inzwischen bereits sehr dürftig oder schwer zugänglich. Großer Wert wurde auf die wahrscheinlich künftige Entwicklung gelegt. Deshalb ist im Kapitel 1 zunächst eine bevorzugt quantitative Analyse der bereits reichlich 50-jährigen Entwicklung erfolgt. Hierfür waren die Daten z.T. sehr verstreut und manchmal auch widersprüchlich. Es mussten eigene Abschätzungen und Mittelwertbildungen hinzugenommen werden. Dies war deshalb notwendig, weil nur mittels einer gewissen Vollständigkeit der Kenntnisse der Vergangenheit eine leidlich abgesicherte Vorschau möglich ist. Doch in der Konsequenz führen diese Analysen zu (heute noch) ziemlich unüblichen Aussagen. Sie kann der Leser aber nur im Kontext nachvollziehen. Daher sei an dieser Stelle auf entsprechende Aussagen verzichtet. Schließlich wurde versucht, möglichst alle sich für die Zukunft abzeichnenden Richtungen einzubeziehen. Daher sind u.a. auch Quanten-Speicher, Spin-Elektronik, Einzel-Elektronen-Transistor und QuBit behandelt. Bezüglich der jeweils neuesten „Standard“-Technik mutet das Folgende eigenartig an. Vor etwa zehn Jahren konnten in [VÖLZ7] gerade noch die Anfänge der DVD vorsichtig aufgezeigt werden. Ähnliches trifft in diesem Band für die Blu-ray-disc und HD-DVD zu. Eine zentrale Frage lautet daher: Welche Technik wird es in abermals zehn Jahren sein? Herrscht dann noch immer als Basis die Elektronik vor oder gibt es andere fundamentale Grundlagen, z.B. optische oder quantenphysikalische? Auch hierzu kann nur auf die entsprechenden Abschnitte verwiesen werden. Die somit gewählte Aufteilung ließ leider keine einheitliche Gliederung für alle Kapitel zu. Die Abgrenzung erfolgt vorwiegend nach technischen und didaktischen Gesichtspunkten. Leider ist die umfassende (technische) Speicherung so komplex und verwoben, dass trotz aller Bemühungen die Kapitel nicht unabhängig voneinander sind. Daher wurden Zusammenhänge und Überschneidungen weitgehend durch Querverweise hergestellt.

Für die inhaltliche Gestaltung wurde für alle Texte trotz des Monographie-Charakters ein lehrbuchartig erklärender Text angestrebt. Stets war es mir wichtig, zu begründen und zu erklären, warum etwas so ist, wie es ist und auch wie und warum es funktioniert. Auch die Hintergründe sollten sichtbar werden. Hierzu gehört, warum es möglich und notwendig wurde, welche Bedürfnisse es befriedigt und welche Vorteile dadurch entstehen. Solche Forderungen stehen etwas im Widerspruch zu der Mehrzahl der heutigen Bücher. In Ihnen wird meist nur beschrieben, wie Etwas aufgebaut ist oder mit ihm umzugehen ist. Dazu muss man oft sehr viele Fakten auswendig lernen. Besser sind inhaltliche Beschreibungen, die ein inhaltliches Verständnis schaffen. Das verlangt weniger Speicheraufwand für das Gedächtnis. Dafür kostet es eventuell mehr Gedankenarbeit, ermöglicht jedoch deutlich mehr und dazu begründete Aussagen. Beim Halbleiterspeicher scheint es z.B. selbstverständlich zu sein, dass die Speicherzellen auf dem Chip als flächig quadratische Matrix angeordnet sind.

Doch es gibt theoretisch bessere Möglichkeiten, z.B. ein hexagonales Raster wie bei der Bienenwabe oder eine Anordnung in 3 oder mehr Dimensionen. Daher ist eine kurze Begründung für die 2D-Matrix durchaus nützlich. Durch derartiges Hinterfragen wird nicht nur mehr verstanden, eventuell können so auch neue Entwicklungen angeregt werden. Generell werden auch allgemeine Fragen an die heutige Technik gestellt, die wahrscheinlich erst von den nächsten Wissenschaftsgenerationen geklärt werden können. Z.B. ermöglicht das Sampling-Theorem, die Zeit-Diskretisierung exakt rückgängig zu machen. Es ist jedoch bis heute kein Verfahren bekannt, das Ähnliches für die Amplituden-Quantisierung leistet.

Zu Beginn eines jeden Kapitels bzw. Abschnitts wird immer eine Einordnung der Aussagen in einen größeren Zusammenhang angestrebt. Dieses Ziel sollen auch die meist recht komplex zusammengesetzten Bilder unterstützen. Die allgemeinen Grundlagen und solche, die mehrere Gebiete betreffen, sind im Kapitel 1 enthalten. Anders verhält es sich bei den elektronischen, magnetischen und optischen Speichern. Sie stehen am Beginn der jeweiligen Kapitel. Für den bevorzugt technisch interessierten Leser ist so möglich, die Grundlagen zu überspringen. Der rein technische Text dürfte dennoch fast immer verständlich sein. Natürlich fehlen dann die tieferen Zusammenhänge. Die theoretische Einführung und allgemeine Einordnung entfällt beim Kapitel 5 „Sonstige Speicher“. Hier sind nur spezielle Varianten der Vergangenheit und der eventuellen Zukunft lose nebeneinander dargestellt. Im Kapitel 6 „Zukünftige Techniken“ waren jedoch insbesondere bei den Quanteneffekten möglichst gut verständliche Einführungen notwendig, die vor allem die sehr anspruchsvolle Mathematik umgehen. U.a. konnte dabei – wahrscheinlich erstmalig – eine anschauliche Erklärung des QuBit gegeben werden.

Als Besonderheit werden in diesem Buch sRAM und dRAM als Oberbegriffe benutzt und erhalten dazu das kleine s bzw. d. So konnte als dritte Variante rRAM eingeführt werden. Alle anderen, spezielleren RAM-Arten sind dann untergeordnete Begriffe und werden groß hinzugefügt, teils direkt wie SDRAM und teils abgetrennt wie DDR-RAM.

Die Literatur- und Faktensammlung zu diesem 3. Band erfolgte über Jahrzehnte. Nur auf dieser Grundlage waren viele Zusammenhänge herleitbar und Bild Darstellungen möglich. Doch der dazugehörige Umfang an Literaturstellen ist riesengroß. Im Text ist daher nur auf besonders wichtige Bücher verwiesen. Sie enthalten dann viel Material zur Speicherung und können z.T. die dargelegten Angaben vertiefen. Andere Quellen, wie Fachartikel, Werbematerial, Internet usw. werden – von seltenen Ausnahmen abgesehen – fast nur in Fußnoten, in Klammern oder extrem klein in den Bildern (lesbar in größerem Maßstab auf meiner Homepage, s.o.) ergänzt. Ihr Zweck besteht darin, die Aussagen zu belegen und zu stützen. In wenigen Fällen werden so auch Fehler in der Literatur aufgezeigt. Bei komplexen Bildern und noch mehr bei der Kombination vieler Daten aus einem sehr langen Zeitraum war die Verdichtung vielfach nur mit gewissen Unsicherheiten möglich. Das gilt vor allem bei Preisen. Z.B. ist sehr schwierig einzuschätzen, welchen Wert eine Mark oder ein Dollar von etwa 1960 heute besitzt. Die so leicht mögliche Inkohärenz konnten nur durch Erfahrung und Hintergrundwissen gemildert werden.

Größere Schwierigkeiten ergaben sich durch den mehrfachen Wechsel der Deutschen Rechtschreibung. So wurden teilweise eigene Wege beschritten. U.a. wird bevorzugt die Gegenwart verwendet, auch dann, wenn eigentlich Vergangenheit oder Zukunft korrekt wären. Beides gilt natürlich nur solange, wie sich dadurch nicht inhaltlich unzulässige oder gar falsche Aussagen ergeben. Für die oft langen und missverständlichen Komposita wurde überbetont die Bindestrich-Trennung benutzt. Das gilt vor allem dann, wenn dadurch die Lesbarkeit erleichtert wird, z.B.: Mausersatz → Maus-Ersatz (~~Mausersatz~~), Bromidionen → Bromid-Ionen (~~Brom-Idionen~~), Kompensationstemperatur → Kompensations-Temperatur

(~~Kompensationstemperatur~~); Anwendungschancen → Anwendungs-Chancen (~~Anwendungschancen~~) usw. Bei Abkürzungen, insbesondere bei den opto-motorischen Speichern, wie CD, DVD, MO und WORM wurde das Plural-„s“ weggelassen. Sonst wären u.a. unschöne Begriffe, wie z.B. CD-Audios notwendig geworden. In der Technik werden die Vorsatzzeichen $K = 2^{10} = 1\,024$ und $k = 1\,000$ unterschieden. Relativ konsequent wird das nur bei der Datenübertragung mit kBit/s (Frequenz nicht binär) benutzt. Formal setzt sich das bei M; G usw. fort, kann dann aber nicht durch die Schreibweise gezeigt werden. Deshalb wird hier nur KBit, KBit/s usw. benutzt. Der mögliche Fehler kann ist meist vernachlässigbar.

Zur besseren Übersicht sind teilweise spezielle Schriftfonts benutzt. Das gilt vor allem für die Etymologie: z.B. *Theorie* (griechisch *theoria* schlicht, anschauen, betrachten). Für Personennamen sind Kapitälchen benutzt. In Klammern sind – sofern verfügbar) die gekürzten Lebensdaten, z.B. LEONARDO DA VINCI (1452 – 1519). Bei Technikern ist es besonders schwierig Lebensdaten zu finden. Für viele technische Erfindungen sind jedoch nicht einmal die Vornamen bekannt. Gar nicht so selten sind nicht einmal die Namen der Erfinder zu ermitteln gewesen.

Bilder, Tabellen und Fußnoten sind kapitelweise nummeriert. Innerhalb des jeweiligen Kapitels erfolgt der Verweis nur mit einer fortlaufenden Zählung. In den anderen Fällen ist die Kapitelnummer vorangestellt, z.B. Bild 3.52. Die erste Erwähnung eines Bildes und einer Tabelle ist fett gedruckt.

Der *Anhang* enthält sechs Verzeichnisse. Das erste *Literaturverzeichnis* betrifft die im Text zitierte Literatur. Zusätzlich empfohlene, aber nicht annotierte Literatur ist im zweiten Verzeichnis zusammengefasst (nebensächliche Literatur und URLs stehen in Fußnoten des Textes). Das dritte Verzeichnis fasst *Namen und Lebensdaten* von im Text genannten Persönlichkeiten zusammen. Im vierten Verzeichnis sind die benutzen *chemischen Formeln* geordnet zusammengefasst. Chemische Trivialnamen sind hier nicht aufgenommen. Das nächste Verzeichnis betrifft *Abkürzungen* und *Kurzbezeichnungen*. Als letztes existiert ein besonders ausführliches *Sachwortverzeichnis*. In alle Verzeichnisse sind sowohl der als auch die Bilder, Tabellen und Fußnoten vollständig berücksichtigt. Zur besseren Übersicht sind dabei zusammenfassende Oberbegriffe eingeführt, z.B. Aufzeichnung, Band, Bit, Geschichte, Magnet, Nano, Speicher oder Überblick. Hier lohnt es sich oft, in den dazugehörigen Unterbezeichnungen nachzusehen. Das gilt insbesondere für die vielen *komplexen Bilder*, welche größere Zusammenhänge aufzeigen. Bei den Begriffen werden bevorzugt die kürzeren Darstellungen und der Singular benutzt. Weitere Vereinfachungen betreffen das eingefügte „s“, „r“ usw.: Aus „Begriffsvielfalt“ wird so Begriff und Vielfalt. Ähnlich verschmelzen herstellen, Herstellung und Hersteller zum einheitlichen Herstellen. Meist wurden alle Komposita zerlegt und in mehreren Umstellungen berücksichtigt. Die z.B. o.g. Begriffsvielfalt erscheint auch Vielfalt und Begriff. Stets erwies es sich auch als sinnvoll, einzelnen Wortteile nur durch (•) zu wiederholen. Beispielhaft gilt so:

| Sachwortverzeichnis | Bedeutung |
|----------------------------|---|
| Überblick 537* | |
| •Schaltkreistechniken 185* | Überblick zu Schaltkreistechniken 185* |
| • <i>Speicher</i> alte 22* | Überblick zu alten Speichern 22* |
| •• <i>Audio</i> 433*# | Überblick zu Audio-Speichern 433*# |
| •••Anfang 356* | Überblick zum Anfang der Audio-Speicherung 356* |
| ••Dichte 36* | Überblick zur Speicher-Dichte 36* |
| •sRAM Schaltung 218* | Überblick zu sRAM Schaltungen 218* |

Wie dieses Beispiel zeigt, sind auch für die Seitenzahlen Vereinfachungen vorgenommen. Wenn eine Seitenzahl auf ein Bild (*) oder eine Tabelle (#) verweist, so wird vorausgesetzt,

dass in ihrer unmittelbaren Umgebung auch dazugehöriger Text steht. Dies gilt genauso für Seitenzahlen, die zusätzlich durch ein (~) gekennzeichnet wird. Auf dieser Seite ist dann die o.g. Begriffsherkunft (Etymologie) vorhanden. Wird ein Begriff auch auf der folgenden bzw. mehreren folgenden Seiten behandelt, so folgt f bzw. ff. Wenn ein Begriff ausführlich und grundlegend behandelt wird, so ist die Seitenzahl **fett** gedruckt.

Das Buch wendet sich wieder an einen breiten Leserkreis. Primär richtet es sich an Wissenschaftler, Hochschullehrer und Techniker, die mit technischen Speichern umgehen, sie benutzen, entwickeln oder fertigen. Doch auch für Leser anderer Gebiete dürfte dieser Band nützlich sein.

Wie beim 1. und 2. Band haben wieder mehrere Hörer meiner Lehrveranstaltungen Hinweise und Ergänzungen eingebracht und teilweise Korrektur gelesen, z.B. Tolgay Ungan. Ihre Anzahl ist so groß, dass ich hier nur global Dank aussprechen kann. Dies gilt gleichermaßen für mehrere Interessenten, die mich um Zugriff auf einige Dateien baten. Sehr intensiv setzte sich wieder Stefan Pohle mit den Texten und Bildern auseinander. Auch meine Frau Ruth Roma-Völz stand der umfangreichen Arbeit immer interessiert gegenüber und las außerdem fleißig Korrektur. Insgesamt ist daher das Manuskript mehrfach gründlich überarbeitet und von Mängeln und Fehlern befreit. Natürlich schlichen sich dabei auch wieder neue Fehler ein. Deshalb gehen alle Mängel und Fehler letztlich auf mich zurück. Dafür bitte ich die Leser um Nachsicht. Für jeden Hinweis bin ich außerdem sehr dankbar. Schließlich geht mein Dank auch an den Shaker-Verlag für die unkomplizierte Zusammenarbeit.

H. Völz

Berlin, im März 07

Inhalt

| | |
|---|----------|
| 1 Allgemeine Grundlagen | 1 |
| 1.1 Prozesse bei der Speicherung..... | 2 |
| 1.1.1 Prozesse bei Informationsträgern | 2 |
| 1.1.2 Ein vereinfachter Speicherprozess | 4 |
| 1.1.3 Die einzelne Speicherzelle | 5 |
| 1.1.4 Energien bei der Speicherung..... | 6 |
| 1.2 Theoretische Grenzwerte | 9 |
| 1.2.1 Minimales Volumen, Energiedichte und Energiekonzentration | 10 |
| 1.2.2 Minimale Bit-Energie..... | 12 |
| 1.2.3 Zeiteinfluss und Grenzzelle..... | 14 |
| 1.3 Kenngrößen der Speicher..... | 15 |
| 1.3.1 Speicherkapazität..... | 15 |
| 1.3.2 Zugriffszeit und Speicherkapazität..... | 18 |
| 1.3.3 Datenrate und Blockstruktur | 23 |
| 1.3.4 Gültigkeit, Lebensdauer, Update-Rate und Backup..... | 26 |
| 1.3.5 Zuverlässigkeit und Ausfallrate..... | 29 |
| 1.3.6 Volumenredundanz | 32 |
| 1.3.7 Dichte in einer Speicherschicht..... | 35 |
| 1.3.8 Kosten der Speicherung..... | 38 |
| 1.3.9 Ausgewählte prognostische Aussagen | 42 |
| 1.3.10 Entwicklung und Etappen der Speicherung | 46 |
| 1.4 Signal und Information | 51 |
| 1.4.1 Analog, digital und weitere Begriffe..... | 53 |
| 1.4.2 Quantisierung und Sampling-Theorem | 56 |
| 1.4.3 Bit, Entropie und Kanalkapazität | 59 |
| 1.4.3.1 Auffälligkeit..... | 62 |
| 1.4.3.2 Kontinuierliche Signale..... | 63 |
| 1.4.3.3 Ungleichmäßig verteilte Amplitudenstufen | 65 |
| 1.4.3.4 Kanalkapazität und Informationsvolumen | 66 |
| 1.4.4 Shannon- und Boltzmann-Entropie | 68 |
| 1.5 Signalverarbeitung | 70 |
| 1.6 Kontinuierliche Magnetspeicherung | 72 |
| 1.6.1 Störungen..... | 72 |
| 1.6.2 Schallaufzeichnung | 76 |
| 1.6.3 Videoaufzeichnung..... | 79 |
| 1.6.3.1 Theorie der Frequenzmodulation | 80 |
| 1.6.3.2 Anwendung bei der Videospeicherung | 83 |
| 1.6.4 Pulsmodulierte Speicherung..... | 87 |
| 1.6.5 Dynamikregelung | 89 |
| 1.7 Digitale Techniken..... | 91 |
| 1.7.1 Taktgenerierung und Signalerkennung | 92 |
| 1.7.2 Daten-Codierung | 96 |
| 1.7.3 Oversampling | 100 |
| 1.8 Fehlertolerante Verfahren | 102 |
| 1.8.1 Fehlerraten..... | 104 |
| 1.8.2 Einfache Verfahren der Fehlerbehandlung..... | 106 |
| 1.8.3 Hamming-Abstand und Fehler | 107 |
| 1.8.4 Polynom-Methode | 110 |
| 1.8.5 Weitere Methoden | 115 |
| 1.8.6 Einteilung der Block-Codes und Grenzen..... | 115 |

| | |
|---|------------|
| 1.8.7 Interleaving..... | 117 |
| 1.8.8 Faltungs-Codes..... | 118 |
| 1.9 Transportwerke..... | 120 |
| 1.9.1 Linearer Bandantrieb..... | 122 |
| 1.9.2 Bandwickel und -zug..... | 129 |
| 1.9.3 Band-Kopf-Kontakt..... | 132 |
| 1.9.4 Gleichlauffehler..... | 135 |
| 1.9.5 Analogmodell..... | 138 |
| 1.9.6 Magnetfilmtransport..... | 138 |
| 1.9.7 Antriebe und Kleinstmotoren..... | 139 |
| 1.9.7.1 Überblick Motoren..... | 140 |
| 1.9.7.2 Gleichstrommotor..... | 141 |
| 1.9.7.3 Drehstrom- und Schrittmotoren..... | 144 |
| 1.9.7.4 Motorlager..... | 145 |
| 2 Elektronische Speicher..... | 147 |
| 2.1 Grundlagen der Halbleiter..... | 147 |
| 2.1.1 Elektronengas und Stromleitung..... | 147 |
| 2.1.2 Bändermodell..... | 150 |
| 2.1.3 Dotieren des Halbleitermaterials..... | 154 |
| 2.1.4 pn-Übergang..... | 157 |
| 2.1.5 Bipolartransistor..... | 160 |
| 2.1.6 Sperrschicht-Feldeffekttransistor..... | 162 |
| 2.1.7 Metall-Isolator-Halbleiter-Übergang..... | 164 |
| 2.1.8 MOSFET..... | 166 |
| 2.1.9 Dielektrisches Material..... | 170 |
| 2.2 Speicherzellen (einfache Schaltungen)..... | 174 |
| 2.2.1 Systematik..... | 174 |
| 2.2.2 Flip-Flop..... | 179 |
| 2.2.3 Schieberegister, Puffer, Zähler usw..... | 182 |
| 2.2.4 Statische Speicher-Zellen (sRAM)..... | 184 |
| 2.2.5 Die 1-Transistor-Zellen (dRAM)..... | 187 |
| 2.2.6 EPROM- und MNOS-Zellen..... | 190 |
| 2.2.7 E2PROM und Flash-Zellen..... | 195 |
| 2.2.8 ROM- und PROM-Zellen..... | 198 |
| 2.2.9 rRAM-Zellen..... | 201 |
| 2.2.9.1 FRAM..... | 202 |
| 2.2.9.2 MRAM..... | 203 |
| 2.2.9.3 PCRAM und Ovonics..... | 208 |
| 2.2.9.4 Vergleiche und weitere rRAMs..... | 211 |
| 2.3 Speicherschaltungen..... | 214 |
| 2.3.1 Aufbau und Adressierung der Speicherzellen..... | 214 |
| 2.3.2 Randlelektronik..... | 221 |
| 2.3.3 Zugriffstechniken..... | 224 |
| 2.3.3.1 Cache..... | 224 |
| 2.3.3.2 dRAM-Arten..... | 226 |
| 2.3.3.3 sRAM-Arten..... | 229 |
| 2.3.3.4 NVRAM..... | 230 |
| 2.3.4 Serielle Speicher..... | 231 |
| 2.3.4.1 Stack..... | 232 |
| 2.3.4.2 Schieberegister..... | 233 |
| 2.3.4.3 Ladung verschiebende Speicher..... | 233 |
| 2.3.4.4 CCD..... | 235 |
| 2.3.4.5 Umlaufspeicher..... | 238 |
| 2.3.5 Assoziativspeicher..... | 240 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.6 Datensicherheit | 242 |
| 2.3.7 Bausteine | 244 |
| 2.3.8 Externe Speicherkarten..... | 248 |
| 2.3.8.1 Smartcard | 249 |
| 2.3.8.2 PCMCIA und Speichererweiterungen..... | 251 |
| 2.3.8.3 Kleine Speicherkarten | 252 |
| 2.4 Geschichte, Grenzen und Zukunft | 255 |
| 3 Magnetische Speicher | 261 |
| 3.1 Zur Geschichte des Magnetismus | 261 |
| 3.2 Magnetische Einheiten | 262 |
| 3.3 Quantentheoretische Grundlagen | 265 |
| 3.3.1 Quantenzahlen | 267 |
| 3.3.2 Lage der Energieterme | 269 |
| 3.3.3 Dia- und Paramagnetismus..... | 270 |
| 3.3.4 Wechselwirkung der magnetischen Momente | 273 |
| 3.3.5 Ferromagnetismus | 274 |
| 3.3.6 Antiferro-, Ferrimagnetismus usw. | 277 |
| 3.3.7 Einbereichsteilchen, Wände und Domänen..... | 283 |
| 3.3.7.1 Das Preisach-Modell | 284 |
| 3.3.7.2 Ausbildung von Wänden und Domänen | 286 |
| 3.3.8 Magnetoelektrische Wechselwirkungen, Spin-Elektronik | 290 |
| 3.3.8.1 Hall-Effekt | 292 |
| 3.3.8.2 Anisotroper magnetoresistiver Effekt (AMR) | 293 |
| 3.3.8.3 Nutzung von Spins | 294 |
| 3.3.8.4 TMR..... | 295 |
| 3.3.8.5 GMR | 295 |
| 3.3.8.6 Weitere Magneto-Widerstände | 298 |
| 3.4 Phänomenologie des Magnetismus..... | 299 |
| 3.4.1 Magnetfelder bei Magnetköpfen | 299 |
| 3.4.2 Magnetische Hysterese | 304 |
| 3.4.3 Wichtige Materialeigenschaften..... | 307 |
| 3.4.3.1 Permeabilitäten..... | 308 |
| 3.4.3.2 Magnetkreis und Abschirmung..... | 312 |
| 3.4.3.3 Magnetische und mechanische Stabilität | 315 |
| 3.4.4 Magnetische Anisotropie..... | 316 |
| 3.4.5 Entmagnetisierung und Scherung..... | 318 |
| 3.4.6 Magnetooptik..... | 321 |
| 3.4.7 Magnetomechanische Effekte | 324 |
| 3.4.8 Induktion, Wirbelstrom und Skineneffekt..... | 329 |
| 3.4.9 Magnetische Flüssigkeit | 332 |
| 3.5 Prozesse der Speicherung..... | 334 |
| 3.5.1 Löschung | 336 |
| 3.5.2 Aufzeichnung | 338 |
| 3.5.2.1 Direkte Aufzeichnung | 340 |
| 3.5.2.2 HF-Vormagnetisierung | 342 |
| 3.5.2.3 Entmagnetisierung und Senkrecht-Speicherung | 343 |
| 3.5.3 Wiedergabe..... | 346 |
| 3.5.3.1 Funktion und Wirkungsgrad | 347 |
| 3.5.3.2 Frequenzgang | 349 |
| 3.5.3.3 Impulswiedergabe | 352 |
| 3.5.3.4 Entstehung des Ringkopfes..... | 355 |
| 3.5.3.5 Varianten des Ringkopfes | 357 |
| 3.5.3.6 Sonder- und Senkrechtköpfe..... | 361 |
| 3.6 Magnetische Werkstoffe | 363 |

| | |
|---|-----|
| 3.6.1 Speichermedien | 365 |
| 3.6.2 Partikelschichten | 368 |
| 3.6.3 Herstellung des Magnetbandes..... | 377 |
| 3.6.4 Unterlage | 381 |
| 3.6.5 Dünne Speicherschichten | 384 |
| 3.6.6 Weiches Magnetmaterial | 388 |
| 3.6.6.1 Pulvermagnetisches Material | 389 |
| 3.6.6.2 Metallisch-kristallines Material | 391 |
| 3.6.6.3 Amorphes Material | 394 |
| 3.6.6.4 Oxydisches Magnetmaterial..... | 396 |
| 3.6.7 Magnetköpfe..... | 398 |
| 3.6.8 Dauermagnete..... | 407 |
| 3.6.9 Sonstiges Magnetmaterial | 409 |
| 3.7 Speicher für kontinuierliche Signale..... | 412 |
| 3.7.1 Schallspeicherung..... | 413 |
| 3.7.1.1 Studiotechnik | 415 |
| 3.7.1.2 Magnetfilm..... | 418 |
| 3.7.1.3 Heimtontechnik..... | 419 |
| 3.7.1.4 Compact Cassette..... | 421 |
| 3.7.1.5 Büro- und Diktiertechnik | 425 |
| 3.7.1.6 Kassetten- und Endlosbänder..... | 427 |
| 3.7.1.7 Messtechnik | 431 |
| 3.7.2 Messbandspeicher | 435 |
| 3.7.3 Video-Speicher | 436 |
| 3.7.3.1 Das Ampex-System..... | 437 |
| 3.7.3.2 Schrägrotation | 438 |
| 3.7.3.3 Zeitfehler und Standbild..... | 445 |
| 3.7.3.4 Bandverbrauch und Sonderlösungen..... | 447 |
| 3.7.3.5 Schnellkopieren von Audio- und Videokassetten | 448 |
| 3.7.3.6 Still-Video..... | 449 |
| 3.8 Digitale Speicher..... | 451 |
| 3.8.1 Digitalbandspeicher..... | 452 |
| 3.8.2 Kassettentechnik..... | 456 |
| 3.8.2.1 Hierarchie, Backup und Archiv | 458 |
| 3.8.2.2 QIC-Techniken | 465 |
| 3.8.2.3 Linear-Techniken..... | 469 |
| 3.8.2.4 Helikale Techniken | 472 |
| 3.8.2.5 Autolader und Bandbibliotheken | 474 |
| 3.8.3. Digitale Audio- und Videotechnik | 477 |
| 3.8.3.1 Digital-lineare Audiospeicherung | 478 |
| 3.8.3.2 R-DAT | 479 |
| 3.8.3.3 Digitale Videospeicherung..... | 482 |
| 3.8.4 Magnetkarten..... | 486 |
| 3.8.5 Rotierende Magnetspeicher | 489 |
| 3.8.6 Disketten..... | 492 |
| 3.8.6.1 Datenstruktur..... | 496 |
| 3.8.6.2 Spezielle Disketten..... | 497 |
| 3.8.7 Festplatten | 500 |
| 3.8.7.1 Aktuatoren und Spurregelung | 502 |
| 3.8.7.2 Gleiter, Schichten und Köpfe..... | 507 |
| 3.8.7.3 Zuverlässigkeit..... | 512 |
| 3.8.7.4 Datenstrukturen und RAID | 514 |
| 3.8.7.5 Wechselplatten | 519 |
| 3.8.7.6 Geschichtliche Entwicklung | 521 |

| | |
|---|------------|
| 4 Opto-elektronische Speicher | 525 |
| 4.1 Grundlagen..... | 526 |
| 4.1.1 Strahlenoptik | 526 |
| 4.1.2 Wellenoptik | 529 |
| 4.1.2.1 Photon und Welle..... | 532 |
| 4.1.2.2 Optische Anisotropie..... | 533 |
| 4.1.2.3 Lichtpolarisation | 535 |
| 4.1.2.4 Drehung der Polarisationssebene und Lichtablenkung..... | 536 |
| 4.1.3 Quantenoptik und Laser | 539 |
| 4.2 Geschichte und Einteilung | 544 |
| 4.3. Laser Vision und Laserdisc..... | 547 |
| 4.4 Gepresste Medien..... | 551 |
| 4.4.1 Aufbau und Abtastung der CD..... | 551 |
| 4.4.2 CD-DA, CD-ROM usw. | 554 |
| 4.4.2.1 CD-DA..... | 555 |
| 4.4.2.2 CD-ROM..... | 556 |
| 4.4.2.3 CD-i, Photo-CD und andere..... | 558 |
| 4.4.3 DVD | 559 |
| 4.4.3.1 DVD-ROM | 562 |
| 4.4.3.2 DVD-Video..... | 564 |
| 4.4.3.3 DVD-Audio..... | 567 |
| 4.4.4 Blaue Varianten | 569 |
| 4.4.4.1 Blu-ray-disc..... | 571 |
| 4.4.4.2 HD-DVD und weitere Varianten | 573 |
| 4.4.4.3 Künftige und holographische Platten..... | 574 |
| 4.4.5 Herstellung von CD und DVD | 575 |
| 4.5 Beschreibbare Medien..... | 578 |
| 4.5.1 Die Speichermaterialien | 580 |
| 4.5.1.1 Dye..... | 581 |
| 4.5.1.2 Phase-Change-Material | 583 |
| 4.5.2 Führungsrille und Herstellung..... | 585 |
| 4.5.3 Aufzeichnungstechniken | 589 |
| 4.5.4 Aufzeichnungsmedien | 593 |
| 4.5.4.1 CD-Techniken..... | 594 |
| 4.5.4.2 Professionelle Techniken | 597 |
| 4.6 Magneto-optische Speicher..... | 598 |
| 4.6.1 Die MD von Sony..... | 604 |
| 4.6.2 LIMDOW und Hybride Speicherung..... | 606 |
| 4.7 Optische Bänder und Platten..... | 609 |
| 4.8 Hologramm-Speicher | 612 |
| 4.9 Ergänzungen..... | 614 |
| 4.9.1 Besondere technische Varianten | 615 |
| 4.9.2 Pflege und Haltbarkeit..... | 618 |
| 4.9.3 Recycling..... | 622 |
| 4.9.4 Kopiergebühren und Urheberrechte | 623 |
| 5 Sonstige Speicher..... | 627 |
| 5.1 Komplexe Anordnungen | 628 |
| 5.1.1. Magnetischer Kabel-Laufzeitspeicher..... | 629 |
| 5.1.2 Milliped | 630 |
| 5.2 Magnetische Speicherbausteine | 632 |
| 5.2.1 Ferritkernspeicher..... | 633 |
| 5.2.2 Bubbles | 636 |
| 5.2.3 Dünnschicht-Speicher | 639 |
| 5.2.3.1 Schaltende Dünnschicht-Speicher..... | 640 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.3.2 Magnetdraht-Speicher | 642 |
| 5.2.3.3 Stachelwand- und Wandverschiebe-Speicher | 643 |
| 5.3 Sichtbare Speicher | 644 |
| 5.3.1 Lochkarten | 645 |
| 5.3.2 Lochbänder | 646 |
| 5.3.3 Barcodes | 647 |
| 5.4 Video-Platten | 653 |
| 5.5 Diskrete Bauelemente | 655 |
| 6 Zukünftige Möglichkeiten | 661 |
| 6.1 Zukunft ohne Technologiewechsel | 661 |
| 6.2 Nanotechnik | 669 |
| 6.3 Biologische Möglichkeiten | 673 |
| 6.4 Optische Varianten | 674 |
| 6.4.1 Nichtlineare Optik | 675 |
| 6.4.2 Photonische Kristalle | 676 |
| 6.4.3 Lichtspeicherung | 679 |
| 6.5 Ausnutzung von Quanteneffekten | 680 |
| 6.5.1 Schrödinger-Gleichung | 681 |
| 6.5.2 Das QuBit | 682 |
| 6.5.3 Implementierung von QuBits | 685 |
| 6.5.3.1 Ionenfallen | 688 |
| 6.5.4 Der Ein-Elektronen-Transistor | 690 |
| 7 Anhang | 695 |
| 7.1 Zitierte Literatur | 695 |
| 7.2 Nicht zitierte, aber nützliche Literatur | 700 |
| 7.3 Personen-Verzeichnis | 701 |
| 7.4 Chemische Formeln usw. | 705 |
| 7.5 Abkürzungen und Ähnliches | 708 |
| 7.6 Sachwortverzeichnis | 718 |