

## 5.2 Magnetische Speicherbausteine

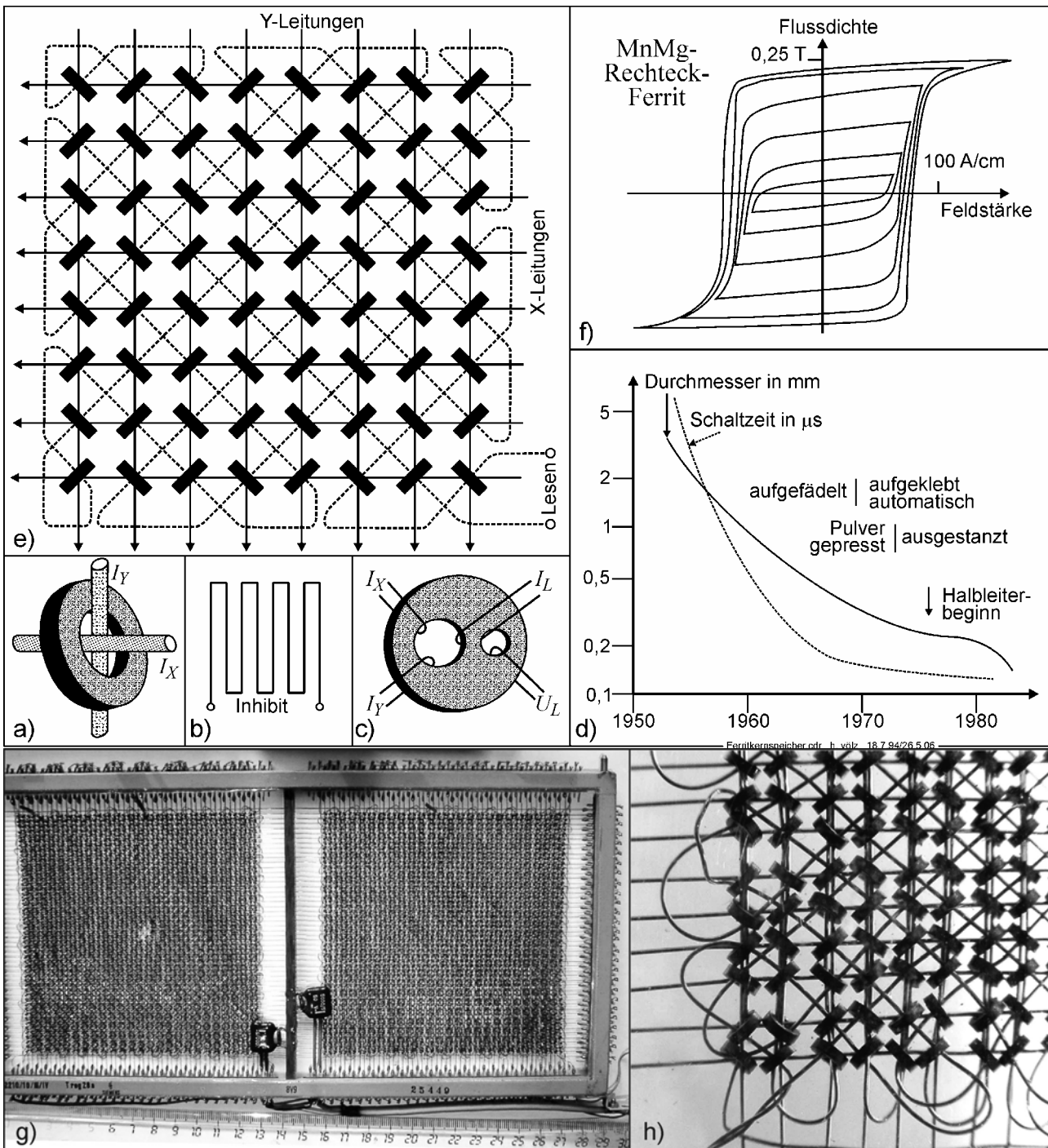
Die Grundlagen des Magnetismus enthält Kapitel 3. Als Speicher sind dort ausschließlich die sehr umfangreich eingesetzten Varianten der magneto-motorischen Systeme behandelt. Daneben gab es zeitweilig magnetische Speicher, die ohne mechanische Bewegung arbeiten. Unter ihnen waren die Ferritkerne über mehr als zwei Jahrzehnte die entscheidenden Arbeitsspeicher der Rechentechnik. Außerdem erlangten die Bubbles für einige Zeit eine gewisse Anwendungsbreite. Im Weltraum und in der Militärtechnik wurden sie wegen ihrer extrem hohen Strahlungsresistenz sogar umfangreicher und länger genutzt. Darüber hinaus entstanden in den 70er Jahren weitere Varianten, die aber kaum einen praktischen Einsatz erreichten. Im Folgenden sind daher nur die Ferritkernspeicher und Bubbles in ihren wesentlichen Grundzügen dargestellt. Die weiteren magnetischen Varianten sind nur sehr kurz erklärt. Weitere Details enthalten u.a. [NN77], [NN88], [RHE74], [SIA79] und [SOK77].

### 5.2.1 Ferritkernspeicher

Ein magnetischer Ringkern mit passender Koerzitivfeldstärke ist ein nahezu idealer Speicher. Sein internes Magnetfeld verläuft vollständig im magnetischen Kern und ist nicht nach Außen wirksam. Dadurch ist eine im Material erzeugte bzw. vorhandene Magnetisierung fast vollständig von der Umwelt entkoppelt und nur durch extrem starke äußere Magnetfelder zu verändern. Die Magnetisierung kann im Kern rechts oder links herum orientiert sein, was genau einem Bit entspricht. Im Sinne einer Multilevel-Technik wären zwar auch mehrere Magnetisierungsintensitäten möglich, doch aus mehreren Gründen (s.u.) hat dies jedoch keine praktische Anwendung erreicht.

Eine Veränderung der Magnetisierung des Kernes kann nur mittels elektrischer Leiter erfolgen, die durch sein Loch hindurchgehen. Hierbei genügen ns- bis  $\mu$ s-kurze, aber hinreichend starke Stromimpulse. Durch sie erfolgt die Aufzeichnung. Der so erzeugte magneto-statische Zustand ist mit einfachen Mitteln nicht feststellbar. Es gibt ja so gut wie keine Wechselwirkung zur Umgebung. Daher ist ein komplexer Wiedergabeprozess und ein zweiter Leiter erforderlich (**Bild 5a**). Zunächst sei angenommen, dass der Kern rechts herum – als logische 1 – magnetisiert sei. Mittels eines passenden Stromimpulses im Leiter  $I_X$  soll nun eine 0 (Magnetisierung links herum) erzwungen werden. Durch den magnetischen Richtungswechsel im Kern wird dabei im Leiter  $I_Y$  ein deutlicher Spannungsimpuls induziert. Lag dagegen zunächst eine 0 vor, so kann durch den 0-Impuls im Leiter  $I_X$  keine Änderung der Magnetisierung des Kernes erfolgen. Daher bleibt auch der Spannungsimpuls für  $I_Y$  aus. Der Wiedergabevorgang ist damit zerstörend. Folglich muss unmittelbar nach jeder Wiedergabe ein zuvor vorhandener 1-Wert wieder eingeschrieben werden. Somit besteht eine gewisse Ähnlichkeit zu den dRAMs. Vereinfachend ist das Refresh jedoch nicht periodisch, sondern immer nur nach einer Wiedergabe erforderlich. Ohne Wiedergabe bleibt im Gegensatz zu den dRAMs der einmal eingeschriebene Speicherzustand über beliebig lange Zeit stabil erhalten. Hierbei kann sogar – im Gegensatz zu den sRAMs – die Betriebsspannung des Speichers abgeschaltet werden. Die sehr kurze magnetische Schaltzeit und die beständige Speicherung sind zwei hervorragende Eigenschaften der Ferritkernspeicher. Sie wurden um 1950 bei der Entwicklung des „Whirlwind computer project“ durch WILLIAM NATHANIEL PAPIAN (\*1916) erfunden. Da dieses Projekt unter der Leitung von JAY WRIGHT FORRESTER (\*1918) lief, wurde auch ihm das Patent am 28.2.1956 unter der Nummer 2736880 erteilt. So galt er längere Zeit als Erfinder. Eine entscheidende Weiterentwicklung des Kernspeichers zur 3-D-Matrix erfolgte um 1951 durch JAN A. RAJCHMAN (\*1911). Sie wurde 1951 im Journal Application Physics als core storage publi-

ziert. Der erste Speicher lief dann 1953 beim Computer Whirlwind (deutsch Wirbelwind) am MIT (Massachusetts Institute of Technology). Infolge der sehr kurzen Schaltzeiten der Kerne konnte er zwei fünfstellige Zahlen in  $60\ \mu\text{s}$  multiplizieren. Er blieb bis 1955 der schnellste Rechner. Auch der 1952 von HOWARD HATHAWAY AIKEN (1900 – 1973) entwickelte Computer MARK IV besaß einen Magnetkernspeicher. Wegen der recht geringen Kosten blieben die Ferritkern-Speicher bis in die 70er Jahre im Einsatz. Mit ihnen gefüllte Schränke erreichten dabei Speicherkapazitäten bis zu einigen MBytes. Die Kerndurchmesser und die typischen Schaltzeiten verringerten sich im Laufe der Zeit um mehr als eine Größenordnung (Bild 5d).



**Bild 5.** Zum Ferritkernspeicher. Details im Text. Der Speicher von Teilbild g) mit etwa 30 cm Länge enthält  $2 \times 50 \times 50$  Kerne und besitzt daher eine Speicherkapazität von 5 KBit.

Zum Betrieb eines Speichers werden viele Kerne benötigt. Sie müssen einzeln adressierbar sein. Entsprechend Abschnitt 2.3.1 ist dafür eine Matrix-Anordnung besonders vorteilhaft. Ihr Prinzip ist sehr einfach durch ein Magnet-Material mit rechteckförmiger Hysterese-Kurve nutzbar. Derartige Materialien sind in Bild 3.20e als R gekennzeichnet. Solche Kennlinien sind bei verschiedenen Materialien erreichbar und treten – wie Bild 3.31a bis c zeigt, bevorzugt in Richtung der leichten Achse auf. Eine typische Hysterese-Kurve mit ihren Unterschleifen zeigt Bild 5d. Mit Feldstärken bis zu etwa  $H \leq \frac{3}{4}H_C$  ist bei ihm keine Ummagnetisierung zu erreichen. Sie erfolgt erst bei  $H > H_C$ . Diese Unterscheidung wird für Magnetkerne, die in einer Matrix nach Bild 5e aufgefädelt sind, zur Adressierung genutzt. Durch je eine ausgewählte X- und Y-Leitung wird ein kurzer Stromimpuls von  $I_S/2$  geführt. Er beträgt etwa 0,5 A und ist so gewählt, dass dabei für jeden Kern ein Feldstärke

entsteht, die etwas größer als  $H_C/2$ , aber deutlich kleiner als  $H_C$  ist. So ergibt sich nur für den einen Kern, der auf der Kreuzung der  $X$ - und  $Y$ -Leitung liegt, eine Feldstärke, die zum Ummagnetisieren ausreicht. Der Aufzeichnungsvorgang ist folglich sehr einfach zu realisieren.

Für die Wiedergabe ist zusätzlich ein dritter Draht erforderlich. Er ist im Bild 5e gestrichelt gezeichnet und verläuft durch alle Kerne. In ihm erzeugt daher nur der eine Kern einen deutlichen Spannungsimpuls, und das auch nur dann, wenn seine Magnetisierung umgeschaltet wird. Doch leider entstehen geringfügige Spannungsimpulse auch von den anderen Kernen. Um sie weitgehend zu kompensieren, ist die Leseleitung in komplizierter Reihenfolge durch die einzelnen Kerne geführt. Außerdem liegen so ihr Anfang und Ende dicht beieinander. Damit sich die Kerne nicht gegenseitig magnetisch beeinflussen können, sind sie außerdem gegeneinander um  $90^\circ$  gedreht. Dies ist auch bei einer realen Matrix von Bild 5g und deutlicher im vergrößerten Ausschnitt von Bild 5h zu erkennen. Hier ist auch noch ein vierter Draht zu sehen, der gemäß Bild 5b wiederum durch alle Kerne führt. Dies ist die Inhibit-Leitung (*lateinisch inhibitio* Verhinderung, gerichtliches Verbot, einstweilige Verfügung). Mit ihr wird vor dem neuen Aufzeichnen einen eindeutigen Zustand hergestellt, wobei alle eventuell vorhandenen 1-Werte gelöscht werden. Zur weiteren Störunterdrückung wird in aufeinander folgenden Zeilen und Spalten die Richtung der Ströme und damit der Kernmagnetisierungen geändert. Im Computer werden mehrere derartige Speicher-Ebenen parallel in Wort-Organisation betrieben (vgl. Bild 2.3f). Dabei werden 2 $\frac{1}{2}$ -, 3- und 4-D-Systeme unterschieden (D von Drahtanzahl). Auf ihre Details wird hier nicht weiter eingegangen. Sie sind u.a. in [RHE74] und [SOK77] enthalten.

Das Wiedergabesignal eines Ferritkerns hängt von seiner Schaltzeit ab. Es steigt mit der Ummagnetisierungsfeldstärke. Je höher sie ist, desto höher und kürzer wird der induzierte Impuls. Dabei bleibt jedoch die Fläche des Zeitintegrals gleich. Sie wird nur durch die Ummagnetisierungsenergie bestimmt. Für die Aufzeichnung gibt es ein Schaltzeit-Feldstärke-Produkt mit einem typischen Wert von  $5 \text{ ps} \cdot \text{A/m}$ .

Die ersten Speicher-Kerne wurden aus Metallband mit einer Dicke von 3 bis  $30 \mu\text{m}$  gewickelt. Sehr bald entstanden Kerne aus einer Mischung von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mit zweiwertigen Metalloxyden. Schließlich setzten sich spezielle Rechteck-Ferrite durch. Vorwiegend wurden Mischungen von  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  und  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  benutzt. Sie erhielten u.a. Zusätze von  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  oder  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ . Ein viel benutztes Material ist  $\text{Mg}_{0,45}\text{Mn}^{2+}_{0,55}\text{Mn}^{3+}_{0,23}\text{Fe}_{1,77}\text{O}_4$ . Seine typischen Kennwerte betragen  $H_C = 72 \text{ A/m}$ ,  $B_R = 0,22 \text{ Wb/m}^2$ ;  $B_S = 0,36 \text{ Wb/m}^2$  und  $T_C = 300^\circ\text{C}$ .

Bis zu einem Durchmesser von etwa  $0,5 \text{ mm}$  wurden die Kerne zunächst manuell, später teilautomatisiert gefädelt. Die noch kleineren Kerne wurden automatisch auf eine Unterlage geklebt und anschließend automatisch gefädelt. Bis etwa 1970 wurden die Kerne – wie auch andere Ferrite – gepresst. Die noch kleineren Kerne konnten aus dem dann bereits sehr dünnen Ferrit-Material gestanzt werden. Gegen Ende der Entwicklung entstanden auch großflächige Ferritplatten, in die nur noch Löcher gestanzt wurden. Ihr Abstand musste jedoch relativ groß sein. Um 1972 waren die Bit-Preise für Ferritkern- und Halbleiterspeicher auf den etwa gleich großen Wert von 1 Pfennig je Bit gesunken. Danach fiel der Preis der Halbleiterspeicher wesentlich schneller.

Die zerstörende Wiedergabe wurde mehrfach als Nachteil empfunden. Außerdem wurde versucht, mit dem Ferrit-Material auch logische Funktionen zu realisieren. So entstanden Ferrit-Bauelemente mit mehreren Löchern, die MAD genannt wurden (**m**ulti **a**perture **d**evice). Trotz vieler Publikationen und Lösungsvorschläge erreichten sie aber keine praktische Anwendung. Das wichtigste Bauelement dieser Art ist der von JAN A. RAJCHMAN

(\*1911) entwickelte **Transfluxor**<sup>30</sup> (vgl. Bild 5c). Sein Name leitet sich von „transfer of flux“ ab. Der zu speichernde Hauptfluss wird über die Drähte  $I_X$  und  $I_Y$  aufgezeichnet. Er verteilt sich auf zwei gleich große Flüsse um das kleine Loch. Für eine aufgezeichnete 1 mögen diese Teilflüsse z.B. nach unten zeigen. Mit der Leitung  $I_L$  wird der Fluss des mittleren Stegs nach oben gezwungen. Es entsteht ein kreisförmiger Fluss um das kleine Loch. Diese Änderung bewirkt eine induzierte Spannung auf dem Leiter  $U_L$ . Nach dem Abklingen des Stromes von  $I_L$  nimmt der Fluss wieder die vorhergehende Magnetisierungsstruktur an. War ursprünglich eine 0 gespeichert, so wird mit dem gleichen und in die gleiche Richtung fließenden Strom  $I_L$  vorübergehend der rechte Steg ummagnetisiert. An  $U_L$  wird dabei die entgegengesetzte Spannung hervorgerufen. Auch der Transfluxor erlangte trotz dieses großen Vorteils keine praktische Anwendung. Für große Speicher war seine Verdrahtung viel zu kompliziert. Eine Sonderform vom Transfluxor ist der **Biax-Speicher**. (s. z.B. Bild 1.14). Er benutzt einen Ferrit-Quader, der mit zwei senkrecht zueinander stehenden, sich nicht berührenden Löchern durchbohrt ist. Funktionell unterscheidet sich kaum vom Transfluxor [SEI75].

### 5.2.2 Bubbles

Die Bubbles (*englisch* Blase, Luftblase) bzw. Magnetblasen-Speicher entstanden zeitlich nicht unmittelbar nach den Kernspeichern. Ihnen gingen Zwischenvarianten, wie Dünnschicht-Speicher und Twistoren voraus. Diese fanden jedoch in der Forschung weniger Beachtung und führten auch zu keiner industriellen Anwendung. Sie sind im nächsten Abschnitt berücksichtigt. Die Entwicklung der Bubbles begann um 1966 durch ANDREW H. BOBECK in den Bell Labs. Nach seiner entscheidenden Publikation<sup>31</sup> wurde das technische Potential der Bubbles schnell sehr hoch eingeschätzt. Boten die Bubbles doch die Möglichkeit, einen magnetisch integrierten Schaltkreis zu schaffen, der gleichermaßen die Kern-, Trommel- und Plattenspeicher ablösen sollte. Zudem lagen die zu erwartenden Daten in der damals noch behaupteten Zugriffslücke der Speicher-Hierarchie <100 ms (s. Abschnitt 1.3.2). Mit ihnen sollten auch erstmalig elektronische Daten für mehr als 30 Jahre zuverlässig erhalten bleiben. Die erreichbaren Speicherdichten erreichten 1 MBit/cm<sup>2</sup>. Die Datenraten betragen 0,1 bis 10 MBit/s. Für damalige Verhältnisse war auch der Leistungsbedarf sehr klein. Für einen 10<sup>7</sup>-Bit wurden nur 10 W bei einer Datenrate von 0,2 MBit/s erwartet. Schließlich ermöglichen Bubbles, ähnlich den Halbleitern, auch logische Operationen. Im Rückblick kann die sehr schnell einsetzende umfangreiche wissenschaftliche Bearbeitung und der Einstieg aller großen Firmen in ihre Entwicklung durchaus mit der Euphorie des Hype-Zyklus verglichen werden (s. Bild 1.30). Wesentliche wissenschaftliche Beiträge leisteten neben BOBECK auch H. E. D. SCOVIL, U. F. GIANOLA, WILLIAM BRADFORD SHOCKLEY (1910 – 1989), P. C. MICHAELIS und R. C. SHERWOOD. Die ersten Muster-Speicher lieferte 1975 Hitachi aus. 1978 präsentierte Rockwell einen Speicher-Chip mit 256 KBit in Produktionsstückzahlen. Wenig später folgte Intel mit 1 MBit. Große Hoffnung erweckte schließlich noch eine Anwendung für Video-Spiele der Firma Konami von 1984. Hierbei wurden die Bubble-Speicher auswechselbar in einem Z80-System betrieben. Zum Erreichen der Arbeitstemperatur von 30 – 40 °C benötigten die Bubbles eine Aufwärmzeit von 20 Sekunden. Doch Mitte der 80er Jahre wurde die Weiterentwicklung und Produktion aller Bubbles weitgehend eingestellt. Infolge ihrer hohen Strahlungsfestigkeit wurden sie jedoch noch längere Zeit für Sonderanwendungen – u.a. Weltraum und Militärtechnik – in kleinen Stückzahlen hergestellt. Für ihre wichtigsten Anwendungsgebiete standen inzwi-

<sup>30</sup> Rajchmann, J. A.: The Transfluxor. Proc. IEE **44**(1956) 321 – 332.

<sup>31</sup> Bobeck, A. H., u.a.: Application of orthoferrites to domain-wall devices. IEEE Trans. Mag. **5** (1969) 3, 1139 – 1145.

schen jedoch u.a. batteriegestützte elektronische sRAMs zur Verfügung. Außerdem hatte sich gezeigt, dass Bubble eine umfangreiche und teure Randlelektronik sowie einen komplizierten Aufbau benötigen. Außerdem waren sie recht störanfällig gegenüber elektromagnetischen Störfeldern. Da ihre Wirkungsweise für die Speichertechnik interessant ist, sind im Folgenden ihre wichtigsten Grundlagen beschrieben. Ausführlicher sind sie in [RHE74], [SIA79] und [VÖL89] behandelt. Aussagen zum Material enthält außerdem [MIC93].

Voraussetzung für die Bubbles ist eine dünne magnetische (einkristalline) Schicht mit stark anisotropen Eigenschaften. Dabei muss die leichte Achse senkrecht zur Oberfläche orientiert sein. Hierfür sind vier Materialklassen geeignet:

- Ortho-Ferrite, z.B.  $\text{Sm}_{0,6}\text{Tb}_{0,4}\text{FeO}_3$ ,  $\text{TmFe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TbFe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{YFeO}_3$ ,
- Substituierte Granate, z.B.  $\text{SE}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , mit SE = Seltene Erden,
- Hexa-Ferrite, z.B.  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,
- Amorphe Materialien, z.B.  $\text{GdCo}$ ,  $\text{GdCoMo}$ .

Im Wesentlichen wurden nur die Ortho-Ferrite und Granate benutzt. Mit Ortho-Ferriten begann BOBECK seine Arbeiten. Granate haben den Vorteil, dass sie sich relativ leicht als dünne Schicht mittels Flüssigphasen-Epitaxie abscheiden lassen. Generell wird zur Entstehung der notwendigen einkristallinen Schichten ein Material benötigt, auf dem sich Schichten epitaktisch abscheiden lassen. Amorphe Materialien wurden damals zunächst noch nicht technologisch ausreichend beherrscht. Vorteilhaft für Bubbles ist jedoch ihre höhere Sättigungsmagnetisierung. Im Gegensatz zu anderen Materialien ermöglicht sie Bubble-Durchmesser  $< 0,4 \mu\text{m}$  und damit sehr hohe Speicherdichten.

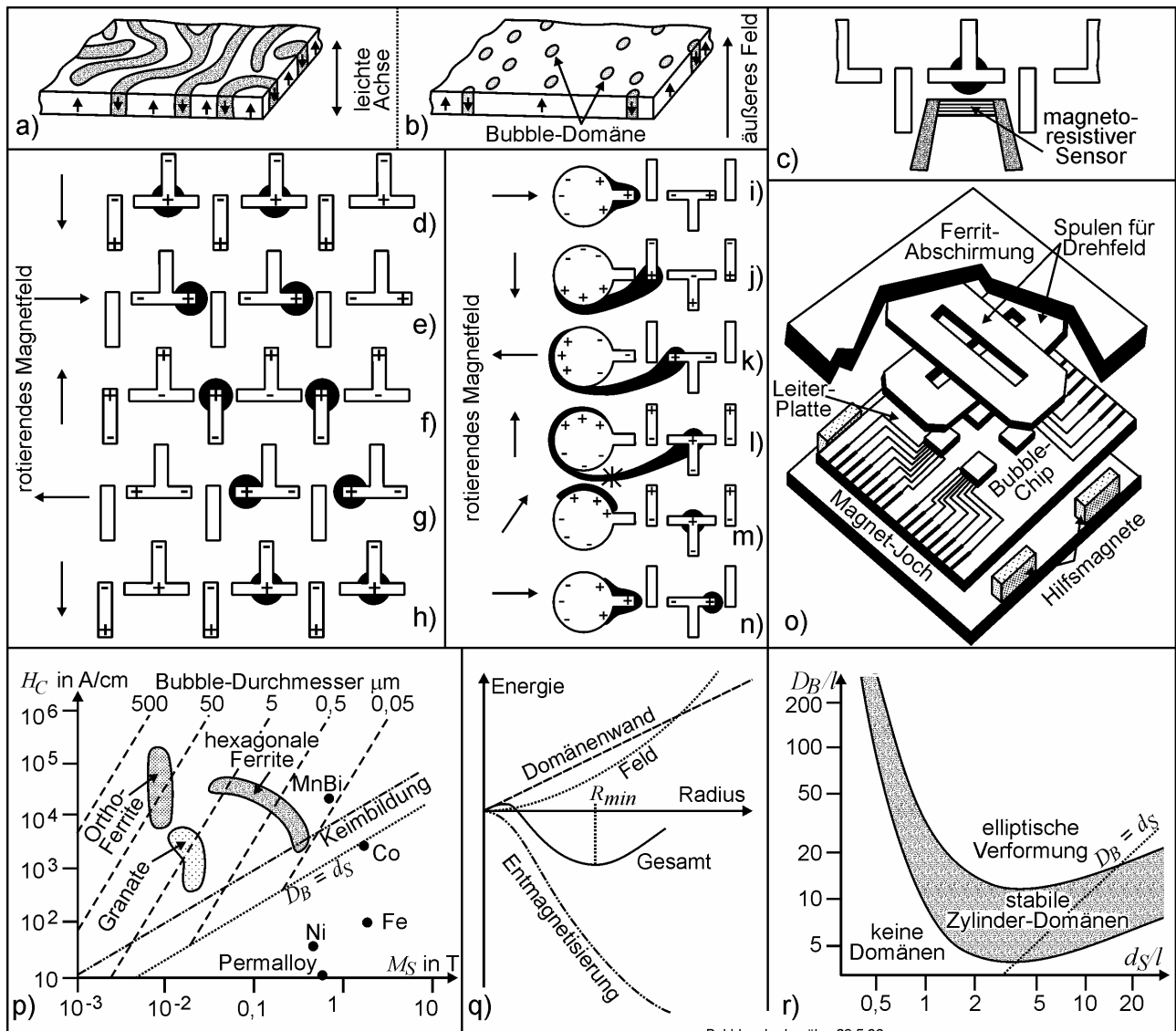
Ohne ein äußeres Magnetfeld entstehen in einer für Bubbles geeigneten Schicht zunächst Streifen-Domänen, wie sie **Bild 6a** andeutet. Die Bereiche mit entgegengesetzter Magnetisierung stellen sich dabei so ein, dass pauschal keine Magnetisierung vorliegt. Wird ein äußeres Feld gemäß **Bild 6b** angelegt, so vergrößern sich die dadurch bevorzugten Bereiche zu Ungunsten der anderen. Ab einer Feldstärke  $H_{Bub}$  existieren schließlich nur noch voneinander getrennte zylinderförmige Domänen. Sie wurden von BOBECK Bubbles genannt. Mit polarisiertem Licht sind sie mittels des Faraday- bzw. Kerr-Effekts gut zu beobachten.

Der nächste entscheidende Gedanke von BOBECK war, die Bubbles auf bestimmte Orte festzulegen. Wenn sich dort ein Bubble befindet, so ist eine 1, anderenfalls ist eine 0 gespeichert. Alle Bubbles können mit einer Feldstärke  $H_{col} > H_{Bub}$  gelöscht werden. Dann ist das Material gesättigt. Daher existieren Bubbles nur in einem begrenzten Feldbereich. Dieser lässt sich theoretisch abschätzen und experimentell bestimmen. In ihm muss die Summe von drei Energien ein Minimum besitzen. Sie betreffen das äußere Feld, die Domänenwand und die Entmagnetisierung und hängen gemäß **Bild 6q** vom Radius der Domäne ab. Als Gleichgewicht stellt sich der Radius  $R_{min}$  ein. Der doppelte Wert ist der Bubble-Durchmesser  $D_B$ . In alle drei Energien gehen die Schichtdicke  $d_s$  und die Sättigungsmagnetisierung  $M_S$  des Materials ein. Für verschiedene Materialien ergibt sich so **Bild 6p**. Es existiert eine untere Grenze, ab der sich erst magnetische Keime (Bereichsgrenzen) ausbilden können. Die untere Grenze für Bubbles wird näherungsweise durch die Gerade für  $D_B \approx d_s$  gebildet. Eine andere Darstellung ergibt sich, wenn die Daten auf einen normierenden material-spezifischen Faktor  $l$  bezogen werden:

$$l = \frac{\sigma_w}{\mu_0 \cdot M_S^2}.$$

Darin bedeuten  $\sigma_w$  die Wanddicke,  $\mu_0$  die absolute Permeabilitätskonstante und  $M_S$  die Sättigungsmagnetisierung. Für stabile Zylinder-Domänen mit dem Durchmesser  $D_B$  und der Schichtdicke  $d_s$  ergibt sich dann der schraffierte Bereich von **Bild 6r**. Oberhalb dieses

Bereiches treten zunächst nicht geeignete elliptisch verformte Domänen und weiter entfernt, Streifen-Domänen auf. Unterhalb des stabilen Bereichs kollabieren die Domänen. Das Material gelangt in die Sättigung.



**Bild 6.** Entstehung, Eigenschaften und Aufbau von Bubble-Speichern. Details im Text.

Die bisherigen Betrachtungen gelten für ein homogenes Feld, das auch Stütz- oder Hilfsfeld genannt wird. Doch zunächst existieren so noch keine Speicherprozesse. Hierzu sind weitere Ansätze erforderlich. Zunächst ist es wichtig, dass sich die Bubbles leicht durch ein Gradientenfeld in Richtung der Flächenausdehnung bewegen lassen. Dies ähnelt der Bewegung von Luftblasen in einer Wasserschicht. Hierzu muss das Feld zunächst die Koerzitivfeldstärke  $H_C$  der Wand übertreffen. Dann bewegen sich die Bubbles unter Berücksichtigung der Materialpermeabilität  $\mu$  mit der Geschwindigkeit:

$$|v_w| = \mu(|H_0| - H_C).$$

Die hiermit erreichbaren typischen Geschwindigkeiten liegen für Granatmaterial bei 20 m/s und für Bariumferrit bei 6 m/s. Die hierfür typischen Feldstärken betragen etwa  $<1$  A/cm. Die eigentlichen Wandgeschwindigkeiten sind mit etwa 500 m/s jedoch deutlich höher. Bei leitendem Material (s.u. Bar-Strukturen) tritt zusätzlich eine bremsende Wirbelstromdämpfung auf.

Für die Speicherung sind die Speicherorte festzulegen, an denen sich Zylinder-Domänen (Blasen) befinden können. Weiter sind Strukturen erforderlich, die ein Erzeugen (Aufzeich-

nen), Auslesen (Wiedergeben) und Löschen einzelner Blasen erlaubt. Die Definition der Speicherorte erfolgt durch spezielle, aufgedampfte Permalloy-Strukturen, die zugleich für die Bewegung genutzt werden. Eine oft benutzte Lösung zeigt Bild 6d bis h. Für jeden Schritt der Bewegung gilt hierin jeweils nur eine Zeile aus je drei I- und T-Permalloy-Elementen, die auch Bars genannt werden. Der flächige Kristall eines Bubble-Speichers ist mit diesen Strukturen vollständig in Form einer Matrix bedampft. Das Stützfeld fixiert die vorhandenen Blasen an die Orte der I-T-I-Strukturen. Die Bewegung erfolgt durch ein überlagertes, rotierendes Magnetfeld. Eine Umdrehung transportiert die Blase – wie im Bild zu erkennen ist – genau um eine T-Raster-Struktur weiter. Diese Bewegung ist weitgehend äquivalent zu jener der CCD-Schieberegister (vgl. Bild 2.45). Im Gegensatz zu diesen bleibt die Magnetisierung der Blasen jedoch selbst über extrem lange Zeit auch dann erhalten, wenn das System ruht. Damit brauchen die Blasen nur an einer einzigen Stelle erzeugt und an einer anderen ausgelesen zu werden. Das Generieren einer Blase zeigt Bild 6i bis n. An dem spitzen Fortsatz des kreisförmigen Gebildes entsteht bei einer entsprechenden Zusatzfeldstärke und dem passenden Gradientenfeld eine magnetische Domäne, die noch nicht die Zylinderform besitzt. Bei Rotation des Gradientenfeldes erfolgt eine weitere Verformung mit Übergreifen zur I-Struktur. Dabei verlängert sich die Gestalt immer mehr, bis die Domäne schließlich bei l) in zwei Teile zerreißt. Danach (m) liegt eine richtige, zylinderförmige Blase an der T-Struktur vor und kann von hier aus in der üblichen Weise weiter bewegt werden.

Die Wiedergabe einer Blase erfolgt durch einen magnetoresistiven Sensor, der gemäß Bild 6c gegenüber dem T-Element angeordnet ist. Das Vernichten von Blasen (Löschen) kann entweder global oder selektiv durch entsprechend hohe magnetische Feldstärken erfolgen.

Die in den Bildern c) bis n) gezeigten Strukturen sind im Laufe der Entwicklung und zur Umgehung von Patenten mehrfach abgewandelt worden. U.a. wurden Formen benutzt, die durch YIY-, XX-Form bzw. V- oder W-förmige Chevron-Strukturen gekennzeichnet sind. Auch für die Bubble-Erzeugung, -Vernichtung und -Wiedergabe gab es vielfältige Varianten.

Den typischen Aufbau eines Bubble-Chips zeigt Bild 60. Auf dem unteren, abschirmenden Magnetjoch sind permanente Hilfsmagnete für das Stützfeld angebracht. Auf der Leiterplatte mit beachtlicher Zusatz-Elektronik befinden sich die eigentlichen kristallinen Bubble-Elemente mit den aufgedampften Permalloy-Strukturen. Darüber sind zwei Spulen angeordnet, die durch entsprechende Ansteuerung das globale magnetische Drehfeld erzeugen. Den oberen Abschluss bildet wiederum eine abschirmende Ferritschicht.

### 5.2.3 Dünnschicht-Speicher

Der Begriff „Dünne Magentschicht-Speicher“ (DMS) wird bei den magneto-statischen Speichern mindestens zweifach benutzt. Vielfach ist er Oberbegriff für alle Speicher, die dünne Schichten als Speichermedium benutzen. Recht oft wird er außerdem für die historisch älteste Variante benutzt. Zur eindeutigen Unterscheidung wird sie als „schaltender“ Dünnschicht-Speicher bezeichnet. Derartige Speicher mit Eisen-Nickel-Schichten der Dicke 10 bis 100 nm wurden 1956 von A. V. POHM und S. M. RUBENS vorgeschlagen. Die Grundlagen der dazu notwendigen Technologien schuf um 1955 M. S. BLOIS. Die Anzahl der dann entwickelten, erprobten oder sogar in kleinen Stückzahlen gefertigten Arten von Dünnschicht-Speichern dürfte bei etwa zehn liegen. Hier werden nur die wichtigsten fünf erwähnt – und mit Ausnahme der Bubbles – im Folgenden kurz behandelt:

- Bubble-Speicher
- Schaltende Dünnschicht-Speicher



- Magnetdraht-Speicher (twistor)
- Stachelwand-Speicher (crosstie-memory), auch BLOCH-Linien-Speicher genannt.
- Wandverschiebe-Speicher (DOT-memory)

Die Bubbles sind im vorherigen Abschnitt aus zwei Gründen getrennt behandelt. Sie wurden als einzige Variante vorübergehend technisch genutzt. Außerdem ist nur bei ihnen die leichte Achse senkrecht zur Schichtoberfläche ausgerichtet. Bei allen im Folgenden beschriebenen Schichten liegt der technologisch einfachere Fall vor, dass die leichte Achse mit der Form-Anisotropie übereinstimmt und daher in eine Richtung der Schichtebene zeigt. Daher kommen bei diesen Speichern auch hauptsächlich Eisen-Nickel-Legierungen als Speicherschichten zum Einsatz. Sie können durch Vakuum-Bedampfung, Sputtern und chemische Abscheidung hergestellt werden. Bei den schaltenden Dünnschicht-Speichern und den Magnetdraht-Speichern sind die Speicherorte fest vorgegeben und müssen über Wort-Bit-Leitungen – ähnlich den Halbleiterspeichern – adressiert werden. Die Stachelwand- und Wandschiebespeicher funktionieren wie Schieberegister. Im Gegensatz zu den Bubbles werden jedoch nur die BLOCH- und/oder NÉEL-Wände und keine ganzen Speicherstrukturen bewegt. Dies ist meist technisch einfacher. Außerdem erfolgt das Schalten überwiegend im ns-Bereich, denn in sehr dünnen Schichten treten hierbei so gut wie keine Wirbelstromverluste auf. Infolge der sehr kleinen Abmessungen der Speicherstrukturen ist auch noch eine hohe Speicherdichte möglich. Das bewirkt dann jedoch, infolge der Laufzeiten vom Sender zum Empfänger, eine Vergrößerung der Zugriffszeit. Die magnetischen Grundlagen zu den BLOCH- und NÉEL-Wänden sowie zu den Wandbewegungen sind im Zusammenhang mit Bild 3.14i bzw. Bild 3.15 dargestellt. Ausführlicher sind die Dünnschicht-Speicher u.a. in [RHE74], [SIA79] und [SOK77] behandelt.

### 5.2.3.1 Schaltende Dünnschicht-Speicher

Für die schaltenden Dünnschichtspeicher wird meist ein Aufbau gemäß **Bild 7c** benutzt. Die einzelnen, kleinen Speicherzellen befinden sich an den Kreuzungspunkten der Wort- und Bit-Leitungen. Ihre magnetischen Schichten sind durch einen hinreichend großen Abstand magnetisch voneinander isoliert. Ihre Kantenlängen betragen wenige  $\mu\text{m}$ . Das Verhältnis von Länge/Breite zur Dicke ist größer als 10 000 : 1. Sie können u.a. aus Permalloy, Fe, Co, Ni, Fe-Ni-Mo-Legierungen oder aus Ferriten bestehen. Die Schicht kann galvanisch, elektrolytisch, durch thermische Zersetzung, reaktives Zerstäuben, Kathodenzerstäubung oder Aufdampfen im Vakuum hergestellt werden. Meist wird dabei ein Magnetfeld überlagert. So entsteht eine einachsige Anisotropie in der Schichtebene mit senkrecht aufeinander stehender leichter und schwerer Achse. Dadurch verhalten sich die Speicherzellen magnetisch fast wie Einbereichsteilchen (vgl. Abschnitt 3.3.7 und Bild 3.11). Ohne äußeres Feld kann die Magnetisierung nur die Richtung der leichten Achse annehmen, und zwar in die beiden entgegengesetzten Richtungen. Die eine Richtung entspricht der 1, die entgegengesetzte der 0. Für das Umschalten zwischen beiden Zuständen muss der Magnetisierungsvektor folglich um  $180^\circ$  gedreht werden. Ein von außen wirkendes magnetisches Feld  $H$  kann gegenüber der leichten Achse um den Winkel  $\varphi$  abweichen. Dabei ist eine Zerlegung der Feldstärke in zwei Vektor-Komponenten möglich, die parallel ( $H_{\parallel}$ ) bzw. senkrecht ( $H_{\perp}$ ) zur leichten Achse stehen. Zur Vereinfachung und Verallgemeinerung der Betrachtungen werden diese Komponenten auf die entsprechende Koerzitivfeldstärke  $H_C$  normiert:

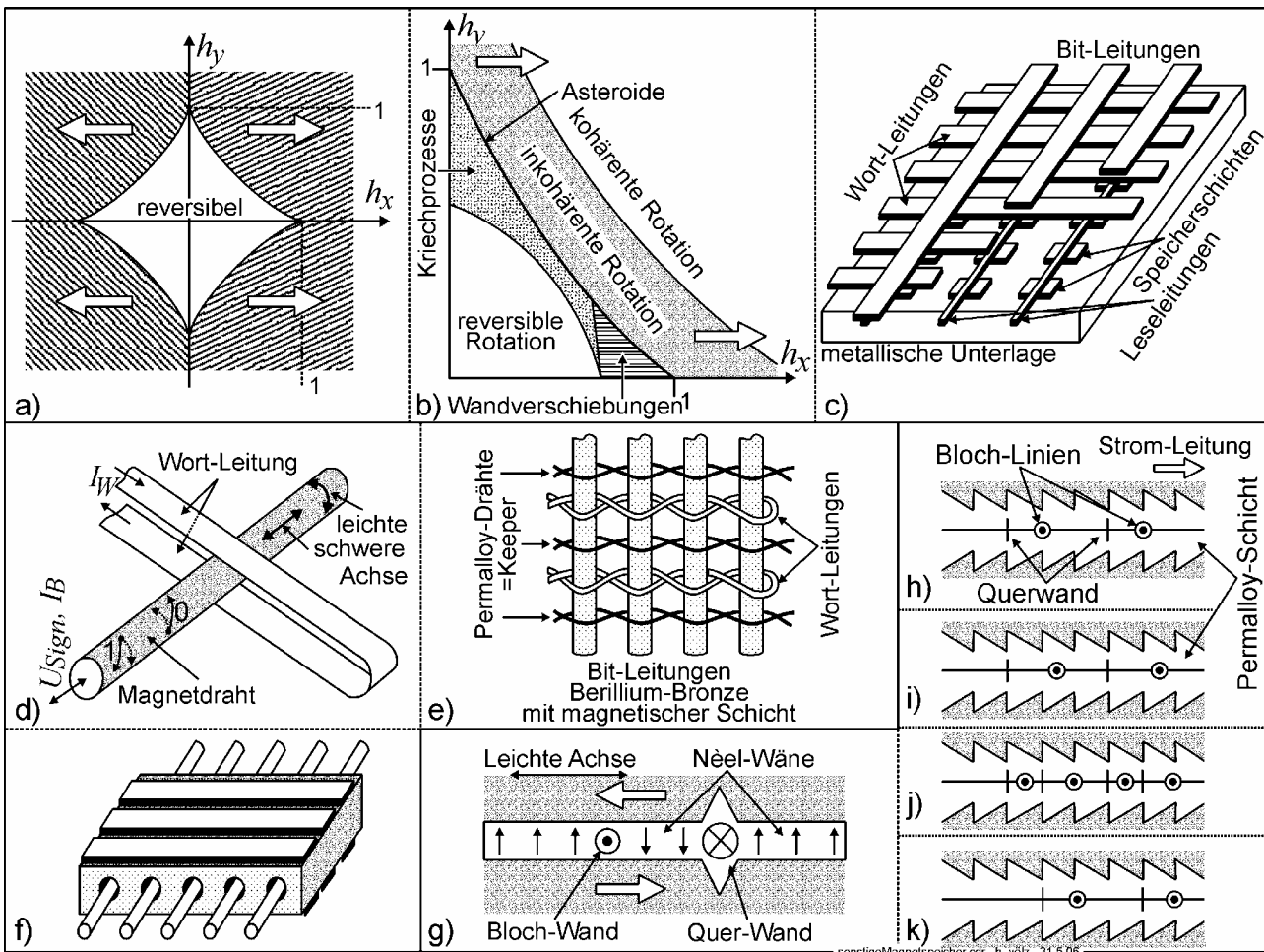
$$h_{\parallel} = H_{\parallel}/H_C \text{ und } h_{\perp} = H_{\perp}/H_C.$$

Aus den Energie-Betrachtungen gemäß Abschnitt 3.3.7.2 folgt dann, dass für das Umschalten der folgende Zusammenhang erfüllt sein muss:

$$h_{\parallel} = -\cos^3(\varphi) \text{ und } h_{\perp} = \sin^3(\varphi).$$

Mit dem Additions-Theorem  $\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi) = 1$  folgt dann

$$h_{\parallel}^{2/3} + h_{\perp}^{2/3} = 1.$$



**Bild 7.** a) bis c) Schaltende Dünnschicht-Speicher; d) bis f) Magnetdraht-Speicher und g) bis k) Stachelwand-Speicher.

Die hierzu gehörende Kurve ist die Asteroide von Bild 7a (*griechisch **aster** Stern, **-ooides** ähnlich*). Alle äußeren Felder, deren Feldstärke im Innern der Asteroide verbleibt, bewirken nur eine reversible Änderung des Magnetfeldes der dünnen Schicht. Nach ihrem Abschalten nimmt die Speicherschicht wieder die zuvor vorhandene Richtung der Magnetisierung an. Wird jedoch die Asteroide verlassen, so lassen sich die beiden möglichen Richtungen erzwingen. Sie bleiben dann auch nach dem Abschalten des Feldes erhalten. Im Bild 7a sind sie durch eine unterschiedlich gerichtete Schraffur gekennzeichnet. Auf dieser Basis ist es durch Kombination der Ströme in den Bit- und Wortleitungen möglich, am Kreuzungspunkt der Speicherzelle einen gewünschten Zustand – 1 oder 0 – aufzuzeichnen. Die Stärke der Ströme wird dabei so gewählt, dass für die Zellen, bei denen nur die Bit- oder die Wort-Leitung aktiv ist, das Magnetfeld innerhalb der Asteroide verbleibt. Die Wiedergabe kann analog und reversibel mit Feldstärken erfolgen, die innerhalb der Asteroide verbleiben. Hierbei dreht sich der Magnetisierungsvektor der Schicht vorübergehend in die Magnetfeldrichtung, die sich aus Vektorsumme der Ströme von Bit- und Wort-Leitung ergibt. Werden die Leitungen stromlos, so fällt die Magnetisierung der Schicht wieder in die Ursprungslage zurück. Dieses Vor- und Zurückklappen erzeugt in der Lese-Leitung Spannungsimpulse, deren Vorzeichen von der Richtung der Magnetisierung bestimmt wird.

In der Praxis lassen sich jedoch nicht die idealisierten Bedingungen eines Einbereichsteilchens voll erfüllen. Daher treten Störungsbereiche auf, welche die Freiheiten bei der

Wahl der Stromstärken einengen. Im Innern der Asteroide gibt es neben der voll reversiblen Rotation auch ein langsames Kriechen der Magnetisierung und irreversible Wandverschiebungen (vgl. Bild 7b). Außerhalb der Asteroide treten auch inkohärente Drehungen der Schichtmagnetisierung auf, die nicht eindeutiges Schalten ermöglichen. Durch gute Materialwahl und eng tolerierte Produktionsbedingungen lassen sich diese Bereiche jedoch recht klein halten.

### 5.2.3.2 Magnetdraht-Speicher

Der schaltende Dünnschicht-Speicher muss in einer aufwändigen Technologie schrittweise in mehreren Ebenen mit etwa zehn Masken hergestellt werden. Sein Prinzip lässt sich technologisch wesentlich vereinfachen, wenn jede Bit-Leitung als dünner Draht ausgeführt wird. Um ihn herum können die zu jeder Bit-Leitung gehörenden Schichten galvanisch abgeschieden werden. Vorteilhaft geschieht dies kontinuierlich in einer Durchlaufanordnung für große Drahtlängen, die später auf die richtige Länge zugeschnitten werden. Der Draht wird meist aus Kupferberyllium gezogen. Bei einem Durchmesser von etwa 0,1 mm besitzt er dann eine gerichtete Struktur. In den nächsten Schritten wird er mehrfach gereinigt, von der Oxydschicht befreit und galvanisch mit einer etwa 5 µm dicken Kupfer-Schicht überzogen. So werden die Ziehriefen verdeckt. Es entsteht eine nichtorientierte Oberfläche. Zum Abbau von mechanischen Spannungen wird der Draht zunächst auf großen Rollen gelagert. Erst danach kommt er in die eigentliche Beschichtungsanlage. Nach erneuter Reinigung wird er mit einer zweiten 1 µm-Kupferschicht überzogen. Ihre Rauigkeit bestimmt wesentlich die Koerzitivfeldstärke der dann folgenden Fe-Ni-Speicherschicht. Ein axialer elektrischer Strom orientiert ihre leichte Achse radial. Je nachdem, ob die Magnetisierung später in oder gegen den Uhrzeigersinn gerichtet ist, liegt eine 0 oder 1 vor. Die schwere Achse zeigt in die Längsrichtung des Drahtes. Schließlich wird der Draht gegen Korrosion mit einem Schutzlack überzogen.

Der hiermit aufgebaute Magnetdraht-Speicher wurde 1967 von ANDREW H. BOBECK bei den Bell Labs entwickelt und ging den Bubbles voraus. Seine Funktion geht aus Bild 7d hervor. Zur besseren Übersicht sind nur ein Draht und eine Wort-Leitung dargestellt. Der Strom  $I_W$  bewirkt, dass die Magnetisierung der Speicherschicht in Richtung der schweren Achse gedreht wird. Als Bit-Leitung wird der Draht selbst benutzt. Durch ihn fließt der Strom  $I_B$ . Bei richtiger Kombination der beiden Ströme, einschließlich ihrer Vorzeichen, kann die Asteroiden-Grenze überschritten werden und eine 0 oder 1 geschrieben werden. Das Lesen erfolgt mit einem Strom  $I_W$ , der die Asteroiden-Grenze nicht erreicht. Dabei wird das Magnetfeld im Draht leicht gedreht. Der entstehende Lese-Impuls wird am Draht als  $U_{Sign}$  abgeleitet.

Den klassischen Aufbau eines solchen Speichers zeigt Bild 7f. Später wurde auch zu einer Webtechnik gemäß Bild 7e übergegangen. Die Permalloy-Drähte (Keeper, von *englisch to keep* halten, schützen) dienen der Abgrenzung der einzelnen Bit-Zellen. Eine Sondervariante der Magnetdraht-Speicher ist der *Twistor*. Bei ihm wird zusätzlich die Magnetostriktion genutzt (s. Bild 1.14 u. [WIN77] 1. Aufl.).

### 5.2.3.3 Stachelwand- und Wandverschiebe-Speicher

Ein Bit kann nicht nur durch die Orientierung eines magnetischen Bereiches, sondern auch durch die Lage einer magnetischen Wand definiert werden. Dann ergeben sich Laufzeit-speicher, die denen der Bubbles ähneln, jedoch eine wesentlich kleinere Bit-Zelle ermöglichen. Die Grundlagen hierzu sind im Abschnitt 3.3.7 und im Zusammenhang mit Bild 3.14 und 3.15 behandelt. Eine Variante hiervon ist der Stachelwand-Speicher, der auch *cross-tie memory* genannt wird (*englisch to cross* quer, durchkreuzen und *to tie* verknüpfen, binden, knoten). Bei ihm wird eine gezackte Permalloy-Bahn in Richtung der leichten Achse mit einer typischen Dicke von 10 bis 25 nm abgeschieden (Bild 7h). Dieser Wert ist deshalb kritisch, weil bei Permalloy unterhalb von 25 bis 60 nm bevorzugt NÉEL- und darüber BLOCH-Wände entstehen. So bilden sich ohne äußeres Magnetfeld gruppenweise BLOCH- und NÉEL-Wände gemäß Bild 7g aus. Die BLOCH-Wände stehen senkrecht auf den NÉEL-Wänden und zeigen im Bild nach vorn (●) bzw. nach hinten (⊗). Dabei bilden sich vergrößerte Querwände aus, die in Bild 7h bis k nur noch als Strich dargestellt sind. Diese gekreuzten Wandstrukturen führten zum Namen des darauf beruhenden Speichers. Eine 1 entspricht hierbei einem BLOCH-Linien-Paar mit Querwand bezüglich eines Zahnes der Zacken, das Fehlen dagegen einer 0. Für die Speicherung muss ein Bloch-Linien-Paar erzeugt, vernichtet und verschoben werden. Die Verschiebung erfolgt durch elektrische Stromimpulse mit einer Dauer von einigen ns. Sie erzeugen Magnetfelder, die senkrecht zur Streifenachse wirken. Dies ist die schwere Richtung der Magnetisierung. Dabei entstehen Magnetpole an den Einschnürungen der Streifenbahn. Der erste Impuls verschiebt die leichter beweglichen BLOCH-Wände in die Mitte der Streifen-Zacken (Bild 7i). Beim nächsten Impuls entsteht zur Minimierung der Energie ein zweites Bloch-Linien-Paar (Bild 7j). Nach dem Abklingen des Feldes löst sich ein Bloch-Linien-Paar auf und so ist die ursprüngliche Struktur um eine Rasterweite nach rechts verschoben (Bild 7k). Da bei diesem Vorgang das Verhalten der Bloch-Linien entscheidend ist, wird zuweilen auch von einem *Bloch-Linienspeicher* bzw. VBLM (*vertical bloch line memory*) gesprochen. Auf die Vorgänge der Erzeugung von Vernichtung von Bloch-Linien sei hier verzichtet. Eine ausführlichere Beschreibung enthalten [NN77], [NN88] und [SIA79]. Von diesen Speichern wurden damals sehr hohe Speicherdichten um  $10^7$  Bit/cm<sup>2</sup>, Datenraten um 20 MBit/s und ein sehr kleiner Energieverbrauch erwartet. Sie erreichten jedoch keine industrielle Anwendung.

Einen einfacheren Aufbau besitzt der **Wandverschiebe-Speicher** (DOT). Bei ihm wird zunächst auf eine sehr glatte Glasplatte eine 30 nm dicke Aluminium-Schicht aufgedampft. Von ihr wird eine mäanderförmige Struktur ausgeätzt. In Gegenwart eines homogenen Magnetfeldes wird darauf eine etwa 100 nm starke NiFeCo-Legierung flächendeckend aufgedampft. So entsteht eine einachsige Anisotropie. Hierüber wird ein Leitersystem für die Bewegung der Wände erzeugt. Die Schicht auf der glatten Glasplatte besitzt eine deutlich geringere Koerzitivfeldstärke (<5 A/m) als jene auf der rauen Aluminiumschicht ( $\approx 50$  A/m). Dies wirkt sich gleichermaßen auf die Wandbeweglichkeit aus. Im rauen Gebiet sind die BLOCH-Wände gegenüber äußeren Magnetfeldern länger fixiert. Stromimpulse in den Leitern bewegen die Wände (im glatten Teil) immer so, dass sich die jeweils bevorzugten Magnetisierungs-Bereiche auf Kosten der anderen Bereiche vergrößern. Zur Verschiebung der Wände werden die Leitungen mit einer zeitlich zweistufigen Kombination von Stromimpulsen erregt. Im ersten Schritt wird ein magnetischer Bereich beidseitig um einen Leiterabstand vergrößert. Im zweiten Schritt verringert er sich einseitig. Danach sind alle Wände um ein Leiterraster weiter bewegt.

## 5.3 Sichtbare Speicher

In diesem Abschnitt ist vor allem die große Vielfalt der Strich-, Bar-, 2D- und Matrix-Codes zusammengefasst. Inhaltlich gehören hierzu auch die Varianten der Lochkarten und Lochbänder. Sie alle benutzen ein festes, vorwiegend kleines Medium aus Papier, Kunststoff oder Metall, das durch zwei typische Eigenschaften gekennzeichnet ist:

- Es trägt eine Information, die für den Menschen unmittelbar sichtbar, jedoch nicht interpretierbar ist.
- Diese Information wird mit technisch einfachen Mitteln – u.a. durch Bedrucken oder Lochen – aufgezeichnet. Gelesen wird sie mit elektronischen, vorwiegend optoelektronischen Techniken. Anschließend erfolgt für sehr verschiedene Anwendungen eine automatische Auswertung. Z.T. werden auch recht komplexe Vorgänge gesteuert.

Trotz der sehr großen Einfachheit, der geringen Speicherdichte und des nichtelektronischen Speicherzustandes sind diese Medien wegen 2. bei der elektronischen Speichertechnik einzuordnen. Ihre Einfachheit ermöglicht äußerst preiswerte technische Lösungen: Daher erreichten vor allem die unterschiedlichen Barcode-Varianten eine sehr große Verbreitung. Sie wächst trotz mehrerer neuer Lösungen – z.B. RFID-Label (s. Abschnitt 5.3.3) – weiterhin. Im Folgenden werden jene Varianten behandelt, die bei elektronischen Daten eingesetzt wurden. Ferner werden nur die *Medien* mit der auf ihnen vorhandenen Information (Kodierung) beschrieben. Auf eine Beschreibung der technischen Mittel zur Aufzeichnung und Wiedergabe wird dagegen weitgehend verzichtet. Nicht berücksichtigt werden hier daher insbesondere jene Anwendungen, die bereits im Band 2 behandelt sind. Hierzu zählen u.a. die Lochbänder bzw. –Karten, die u.a. bei der Jacquard-Technik zur Herstellung von Gewebemustern (S. 321), den frühen Druckmaschinen (S. 427) sowie den Drehorgeln und automatischen Klavieren (S. 591 und 594) benutzt werden. Im weiteren Sinne gehören hierzu auch die Lochscheiben der Musik-Automaten (S. 578) sowie der elektrisch leitende Code auf den Film-Patronen (S. 494).

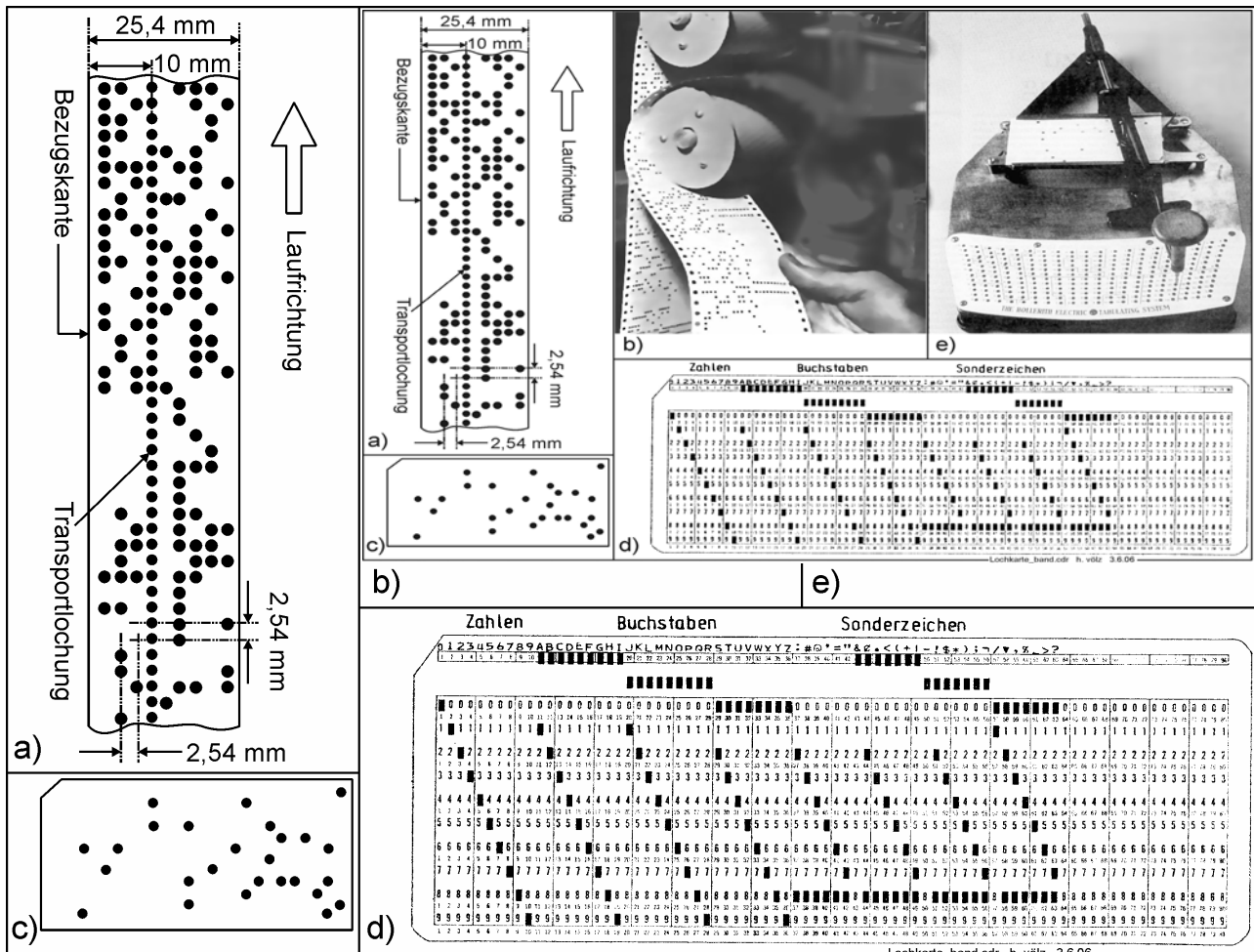
Lochkarten und Lochbänder – vielfach auch Lochstreifen genannt – bestehen aus Papier, Pappe, Kunststoff oder Metall, selten aus Holz. Sie speichern alle nach dem gleichen Prinzip. An genau vorgegebenen Positionen werden Löcher eingestanz. Sie entsprechen einer 1, ihr Fehlen einer 0. Bei Lochkarten sind die Speicherorte der Bits durch Koordinaten bestimmt, die auf die zwei Ränder bezogen sind. Jeder Lochkartentyp besitzt daher eine feste Speicherkapazität. Lochbänder können im Prinzip beliebig lang werden. Hier gibt es für die Bit-Positionen nur einen Bezugsrand (vgl. **Bild 8a**). In Längsrichtung ist der zweite Ort nur durch einen „Takt“ gegeben. Meist ist er als Transportlochung vorhanden, die sich etwa in der Mitte oder – wie die Perforation beim Kinofilm – an beiden Seitenrändern befindet. In einigen Fällen wird der Takt auch nur aus der Lochung abgeleitet. Lochbänder und Lochkarten besitzen gegenüber den vorher benutzten Stiftwalzen (vgl. Band 2) die Vorteile, dass einmal codierte Daten schnell zu vervielfältigen sind und dass mit einfachen Mitteln ein neuer Code zu schreiben ist. Außerdem sind sie preiswerter. Für die Dateneingabe in Rechner haben sich bis etwa 1960 (z.T. bis 1980) vor allem die Lochkarten bewährt. Bei ihnen ist es wesentlich einfacher, Code-Teile zu löschen bzw. neu einzufügen. Es bleiben die gültigen Karten bestehen. Einige werden aus dem Kartenstapel herausgenommen und andere eingefügt. Bei Lochbändern muss dagegen meist ein vollständiges neues Band erstellt werden.

### 5.3.1 Lochkarten

Bereits CHARLES BABBAGE (1792 – 1871) sah für seine Analytical Engine eine Lochkartensteuerung vor. Die erste Großanwendung der Technik erfolgte im Jahre 1890 bei der 11.

Volkszählung in den USA (sie erfolgen alle 10 Jahre). Bei der vorangehenden Zählung von 1880 hatte HERMAN HOLLERITH (1860 – 1929) mit JOHN SHAW BILLING bei der statistischen Auswertung zusammengearbeitet. Es mussten die Daten von etwa 50 Millionen Menschen ausgewertet werden. Hierzu benötigten 500 Helfer nahezu 7 Jahre. Gemeinsam haben beide daraufhin die Idee der Lochkarte entwickelt. Doch HOLLERITH schuf die entsprechende Technik. Sie stand ab etwa 1887 zur Verfügung und ermöglichte erstmalig, Informationen in maschinenlesbarer Form zu verwenden. Die Löcher wurden mittels Drähten gegenüber einem Quecksilberbad abgetastet. Viel Später erfolgte die Abtastung vorwiegend optisch mittels Lichtschranken, teilweise auch pneumatisch oder elektromechanisch. Die damals benutzte Lochkarte zeigt Bild 8c. Sie besitzt 240 Lochpositionen. Die obere linke Ecke ist zur richtigen Positionierung abgeschrägt (dies bleibt bei allen Folgemodellen erhalten). Die Dateneingabe musste natürlich noch manuell erfolgen. Hierzu gab es ein pantographenähnliches Gerät (Bild 8e). Am 8.1.1889 erhielt HOLLERITH für seine Lochkarten-Technik ein Deutsches Reichspatent. Bei der Volkszählung 1890 wurden die Daten von 65 Millionen Menschen mit 43 Lochkartenmaschinen in nur 4 Wochen vollständig ausgewertet. Dies ersparte den USA etwa 5 Millionen Dollar. Auf Grund dieses Erfolges gründete HOLLERITH 1896 in New York die Tabulating Machine Company. Aus ihr ging durch zugekaufte Firmen 1924 die IBM (International Business Machines Corporation) hervor. Da sie den gesamten Markt der mechanischen Lochkartenmaschinen beherrschte, erreichte sie ihre spätere Vormachtstellung in der Computer-Branche. Für die Volkszählung von 1910 gab es mehrere Mitbewerber. Dabei unterlag erstmalig HOLLERITHS Firma gegenüber EDWARD DURAND. In der Folgezeit entwickelte HOLLERITH seine Lochkarte weiter. 1928 führte IBM die 45 spaltige Lochkarte ein. Mit ihr können 45 Zeichen zu je 12 Bit-Positionen gespeichert werden. 1931 wird eine alphanumerische 6-Bit Codierung entwickelt, wodurch 90 Zeichen zu speichern sind. Doch bereits 1928 hatte sich IBM die später ausschließlich verwendete Lochkarte mit 80 Zeichen an je 12 Positionen patentieren lassen. Sie wird meist Hollerith-Karte genannt und ist mit den Lochungen ihres Zeichenvorrats in Bild 8d gezeigt. Hier werden die Löcher erstmalig rechteckförmig mit der Größe  $1,35 \times 3,17 \text{ mm}^2$  ausgestanzt. Sie besteht aus 0,17 mm dünnen Spezialkarton mit den Abmessungen  $18,7 \times 8,3 \text{ cm}^2$  und speichert rund 80 Byte. Der Spaltenabstand beträgt 2,23 mm, der Zeilenabstand: 6,35 mm und die Zeichendichte 7,1 Zeichen/Zoll. Die Kodierungsform der Karte wirkte sich u.a. auch auf den Quell-Code bei den Programmiersprachen FORTRAN und COBOL aus. Z.B. wurden meist die ersten 8 Spalten ausschließlich für ein numerisches Label benutzt. Zahlreiche Verbesserungen der Lochkartensysteme entwickelte später GUSTAV TAUSCHEK (1899 - 1945). Die typisch manuelle Aufzeichnungsgeschwindigkeit lag bei 15 000 Zeichen/h, maschinell wurden bis zu 10 000 Lochkarten/h erreicht. Später wurden Beschriftungslocher eingeführt, die auf dem oberen Kartenrand den vorhandenen Text druckten und ihn damit für den Menschen lesbar machten.

Neben der typischen Hollerith-Lochkarte gab es lange Zeit auch viele andere Varianten. Bis in die 90er Jahre existierten z.B. die **Randlochkarten**. Sie wurden u.a. in Bibliotheken verwendet und betrafen dann z.B. ein Buch. In ihrem Mittelteil wurden die bibliographischen Daten und eine kurze Inhaltsangabe geschrieben. Sachbegriffe zur Klassifikation wurden durch Schlitze und Löcher in die Randzone encodiert. Mittels Nadeln konnten hierüber aus einem großen Stapel schnell die relevanten Quellen gefunden werden. Eine weitere und zugleich sehr späte, aber erfolgreiche Form der Lochkarte erschien 1976 als **VingCards Schlüsselkarte**. Sie ist billig, leicht austauschbar und ermöglicht über vier Milliarden Kombinationen. Hiermit konnte erstmalig sehr schnell die Kodierung der Hotelzimmer geändert und so die Hotelkriminalität verringert werden. Noch heute existiert dieses System in vielen Hotels. Inzwischen ist es jedoch weitgehend durch Magnetkarten ersetzt.



**Bild 8.** Zur Lochkarten- und Lochbandtechnik. Die ursprüngliche Karte (c) ist im Vergleich zur endgültigen Hollerith-Karte (d) erheblich verkleinert dargestellt. Weitere Details im Text.

### 5.3.2 Lochbänder

Im Gegensatz zur Lochkarte ist die Geschichte des Lochbandes oder Lochstreifens relativ wenig aufgearbeitet. Viele Details zu den Anfängen dieser Entwicklung enthält Band 2. Sie werden hier stark gekürzt wiederholt. Offensichtlich entstand der Lochstreifen für die **Musikautomaten**. Für sie war die Speicherkapazität der Lochkarten, Lochplatten und Stiftwalzen viel zu klein. Vorteilhaft ist dabei, dass im Nachhinein nur sehr selten Änderungen erforderlich sind (s.o.). Bereits 1725 verwendete BOUCHON und 1728 FALCON Lochbänder, die damals und auch später Notenrollen hießen. Mit der Weiterentwicklung der Musikautomaten wird ihre Technik ständig verbessert: Bereits um 1880 gab es Notenrollen von 37 cm Breite und bis zu 123 Lochreihen. 1908 wurde als Standardisierung eine Breite von 28,5 cm mit 88 Lochreihen eingeführt. Den Höhepunkt erreichte diese Entwicklung ab 1904 bei den Reproduktionsklavieren, wie z.B. dem WELTE-Mignon-Flügel mit ca. 100 Lochreihen. In vereinfachter Form besteht sie noch heute bei den Drehorgeln (Leierkästen).

1790 verwendete JOSEPH-MARIA JACQUARD (1752 – 1834) das Grundprinzip für seinen automatisierten **Webstuhl**. Doch eigentlich handelt es sich hierbei – wie teilweise auch schon früher bei den Musikautomaten – um mechanisch aneinander gefügte Lochkarten. Ein weiterer früherer Zweig ist die **Drucktechnik**. Ab 1883 baute TOLBERT LANSTON (1844 – 1913) Druckmaschinen (Monotype), die von einem vorher erstellten Lochband gesteuert wurden und daher wesentlich schneller druckten. Dabei entwickelte sich später ein universeller ITT-Code (teletypesetter) mit 5 Lochreihen und einer Transportspur (stammt aus der Fernschreibtechnik). Später nahm auch hier die Zahl der Lochreihen beträchtlich zu (vgl. Bild 8b).

Für die elektronische *Datenübertragung* dürfte den Lochstreifen erstmalig ALEXANDER BAIN<sup>32</sup> (1810 – 1877) benutzt haben. Weil die Übertragung mit dem „geschriebenen“ Morse-Streifen zu langsam war, führte er 1846 den Lochstreifen (ticker paper) zur telegraphischen Übertragung von Nachrichten ein. Diese Technik wurde dann sehr schnell von vielen Nachrichtenagenturen eingesetzt. Als Erfinder des Fernschreibers gilt jedoch vielfach EDWARD KLEINSCHMIDT (1875 – 1977). Er entwickelte 1914 den Lochstreifen-Fernschreiber.

In der Literatur steht häufig, dass die Lochkarte für die *Rechentechnik* entscheidend war. Dies ist jedoch nur bedingt richtig. Denn bei den ersten Rechnern von KONRAD ZUSE (1910 – 1995) wurde 35-mm-Film verwendet, in den Lochreihen gestanzt wurden (Z1 bis Z3). Auch beim Colossus von 1943 wurden die Zeichen fotoelektrisch vom Lochstreifen mit Taktspur eingelesen. Um 1940 beherrschten die Hollerith-Karten nur positive Zahlen. Deshalb geht auch HOWARD HATHAWAY AIKEN (1900 – 1973) bei der Konstruktion des Automatic Sequence Controlled Calculators (ASCC, 1939 bis 1944) zum Lochband mit 24 Lochreihen über. Dieser Computer wird später in Haward Mark I umbenannt.

Im Laufe der Entwicklung entstanden für die Datenverarbeitung typische Lochstreifen mit 5 bis 8 Lochreihen. Die genormten Abmessungen des meist verwendeten 8-Spurbandes zeigt Bild 8a. Es ist „eigentlich“ 1 Zoll breit. Für die anderen Bänder ändert sich nur die Breite. Ein 6-Spurband ist z.B. 22,2 mm (7/8-Zoll) breit. Die unteren 3 Lochreihen und die erste Spur oberhalb der Taktspur betreffen binär codierte Zahlen (von unten nach oben 1, 2, 4, 8). Die nächsten beiden Spuren heißen Zonenteil und betreffen die Kennzeichnung nicht-numerischer Zeichen. Die beiden obersten Spuren (bei 8 Lochreihen) werden für die Fehlererkennung und -korrektur genutzt.

### 5.3.3 Barcodes

Mit der Entwicklung der Rechentechnik war es für die Supermärkte<sup>33</sup> vorteilhaft, wenn die Waren ein maschinenlesbares Label trugen, welches das Produkt kennzeichnet. Hierdurch wurde ein einfaches System für die Kassen und eine jederzeit aktuelle Lagerhaltung möglich. Erstmals dürfte diese Idee hierzu 1932 WALLACE FLINT – Sohn eines Lebensmittelgroßhändlers in Massachusetts – in seiner Magisterarbeit an der Harvard Universität über die Automatisierung von Supermarktkassen behandelt haben. Die erste Patentanmeldung erfolgte 1949 von NORMAN JOSEPH WOODLAND und BERNARD SILVER. Der damals beabsichtigte Code ist aus heutiger Sicht recht ungewöhnlich. Es waren mehrere, z.B. 6, symmetrisch ineinander geschachtelte Kreise, die auch als Bullauge<sup>34</sup> beschrieben werden. Das US-Patent wurde am 7.10.1952 mit der Nr. 2 612 994 erteilt. Die erste Anwendung erfolgte 1958 für die Produkte im „food chain store“ in Philadelphia. Dem heutigen Strich-Code ähnliche Symbole verwendet 1960 die Sylvania zur Identifizierung von Eisenbahnwaggons. Vereinzelt werden solche Varianten dann in den USA für verschiedene Zwecke eingesetzt. Die erste inhaltliche Beschreibung von Strich-Code-Techniken erfolgte am 10.8.1963 in der Zeitschrift „Control Engineering“. Bereits 1970 entstand der heute z.T. noch wichtige Plessey-Code als UGPIC (**u**niversal **g**rocery **p**roducts **i**dentification **c**ode) bei British Company Plessey Telecommunications. Er wurde 1971 u.a. in vielen europäischen Bibliotheken eingeführt. Auf dieser Basis entwickelte ab 1970 ein Ad Hoc Ausschuss unter Leitung von

<sup>32</sup> BAIN entwickelte auch das Fax-Gerät (Patent von 1843). Der erste kommerzielle Telefax-Dienst wurde 1865 zwischen Paris und Lyon eingerichtet (pantélégraphes).

<sup>33</sup> Der erste Selbstbedienungsladen „Piggly Wiggly Store“ wird 1916 von Clarence Sanders in Memphis (Tennessee) eröffnet. Die Kunden waren dadurch nicht mehr auf Verkäufer angewiesen. Sie konnten sich die gewünschten Waren selbst aus den Regalen nehmen. Es gab nur noch Kassen zur Bezahlung.

<sup>34</sup> Begriff für fest verschlossene runde Fenster z.B. bei Schiffen, leitet sich über das Englische von Bullen-Auge ab.



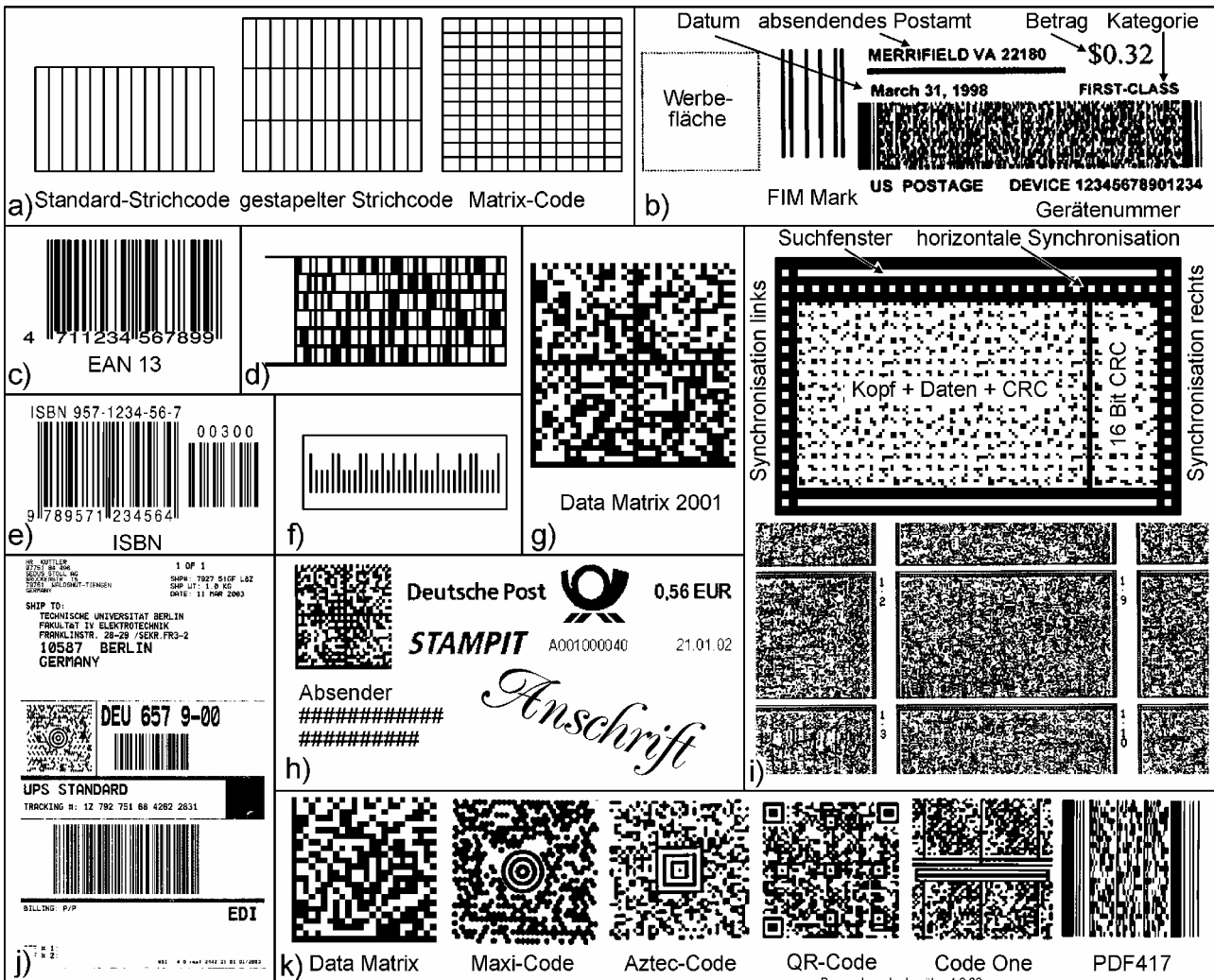
GEORGE J. LAURE den **UPC** (**u**niversal **p**roduct **c**ode). Er wurde 1973 fertig gestellt und erstmalig im Juni 1974 in einem Supermarkt in Ohio eingesetzt. In den USA und Kanada ist er bis heute der wichtigste Strich-Code zur Kennzeichnung von Waren. Doch bereits 1972 waren Codabar<sup>35</sup> durch Monarch Marketing Systems und Code 2/5 interleaved (englisch verschachtelt: zwei Zahlen gelten als ein Symbol) durch Intermec entstanden. 1974 folgte der Code 3/9. Nach längerer Beratung lag schließlich 1977 für Europa der auf UPC beruhende **EAN** (**E**uropean **a**rticle **n**umber) vor. Die beiden Ausschüsse *Uniform Code Council* (USA für UPC) und *EAN International* (vormals: European article numbering association) arbeiten eng zusammen, so dass immer nahezu vollständige Kompatibilität gewährleistet ist. Das EAN/UCC-System nutzen heute fast eine Million Mitgliedsfirmen in nahezu hundert Staaten. Dadurch hat jeder Artikel seine individuelle Kennung, die ihn eindeutig identifizieren lässt. Der 12-stellige UPC-12 besitzt gegenüber dem EAN-13 (vgl. **Bild 9c**) lediglich eine links vorangestellte Null. In Japan wird der EAN13 als **JAN** bezeichnet. Er besitzt das Präfix 49. Bereits um 2003 wurde in Europa die Notwendigkeit erwogen, den EAN auf 14 Stellen zu erweitern. Schon damals wurde spekuliert, ob dies dann die USA-Behörden für einen Ex-Importschutz nutzen könnten [c't 18/02; 46]. Neben diesen beiden wichtigsten Strich-Codes sind inzwischen heute über zwanzig weitere genormte Varianten vorhanden, die hier nicht einmal vollständig aufgezählt werden sollen. Es folgen nur wenige Beispiele. Für den EAN gibt es die Varianten EAN-2, -5, -8 und -13, wobei die Zahlen die Anzahl der codierten Ziffern angeben. Beim EAN-128 ist sie frei wählbar. 1984 wird ein spezieller Strich-Code-Standard für den **Medizin**-Bereich verabschiedet. Die Deutsche Post verwendet spezielle Varianten vom Code 2/5 interleaved. Der **Ident-Code** dient der eindeutigen, individuellen Kennzeichnung eines Postpakets. Darüber sind Rückfragen von der Annahme bis zur Auslieferung möglich (tracking/tracing). Einen ähnlichen **Leit-Code** benutzt sie für das schnelle, automatische Sortieren von Postsendungen. Da er rot, z.T. mit unterschiedlich langen Strichen unter die Anschrift gedruckt wird, ist er für das Auge nicht sehr auffällig (ähnlich Bild 9f). In ihm sind die Postleitzahl, eine dreistellige Straßenummer und die Hausnummer plus Prüfzeichen enthalten. Schließlich sei noch der **ISBN-Code** (**i**nternational **s**tandard **b**ook **n**umber) erwähnt. Er wird zusätzlich zu den Ziffern als EAN-13 mit dem Präfix 978 abgedruckt. Zwischen Länder- und Verlags-Code sowie Buchnummer und Prüfzeichen werden Bindestriche eingefügt. Er kann durch einen zusätzlichen zweiten, meist kleiner gedruckten Code ergänzt werden. EAN-2 bezeichnet dann z.B. die Heftnummer von Zeitschriften, EAN-5 den Verkaufspreis (s. Bild 9e).

Alle bisher genannten Codes sind eine Aneinanderreihung von Strichen. Die Speicherkapazität dieser Methode war ab Mitte der 80er Jahre für mehrere Anwendungen zu klein. So entstanden zwei Abwandlungen als 2D-Codes, deren Rasterung schematisch Bild 9a zeigt. Beim **gestapelten Code** (englisch stacked code) werden mehrere Strich-Codes übereinander geschachtelt. Hier entstanden 1987 **Code 49**, 1988 **Code 16 K** (Bild 9d) und 1992 der etwas mehr verbreitete **PDF417** (Bild 9k, rechts). Sie können eigentlich nur als Übergangsvarianten zu den inzwischen weit verbreiteten **Matrix-Codes** angesehen werden: Sie besitzen eine etwa 15mal höhere Speicherdichte als die Strich-Codes. Ihre wichtigsten Varianten sind: 1987 der **MaxiCode** von UPS (United Parcel Service), 1989 Data Matrix, 1991 der **Code One** von Laserlight, 1995 der **Aztec Code** von Welch Allyn und 1994 der **QR-Code**, der auch japanische Schriftzeichen berücksichtigt. Ihre Grundstrukturen zeigt Bild 9k. Sie enthalten alle Sonderstrukturen, welche die richtige Orientierung der Scanner ermöglichen. Daher können alle Matrix-Codes aus jeder Richtung und bei erheblichen perspektivischen Verzerrungen gelesen werden. Ferner enthalten sie sehr wirksame Fehler-

---

<sup>35</sup> Da hier wegen des sehr großen Umfangs nicht Details der einzelnen Codes behandelt werden können, sei auf [ROS77] und [NN04] verwiesen.

korrekturverfahren. Beim Data-Matrix-Code werden sie meist als „ECC xxx“, z.B. ECC 200, angehängt (error checking and correction). Diese Codes gibt es mit unterschiedlicher Zeilen-Spalten-Zahl und in Zusammensetzungen, wie es z.B. Bild 9g zeigt. Passend zum Bild 9 werden hier noch drei ausgewählte Anwendungen der 2D-Codes behandelt. Den Maxicode zeichnet noch die Besonderheit aus, dass er ein hexagonales Raster verwendet.



**Bild 9.** Beispiele für die Vielfalt der Bar-Codes. Erklärungen im Text.

Bereits 1990 führte die Zeitschrift mc (Micro-Computer) eine *mc-Paperdisk* für Rechner-Listings ein [mc Juni 1991, S. 140 – 150]. Es war hierzu ein spezieller gestapelter Code mit zusätzlichem Suchfenster und ergänzenden Synchronisations-Zeichen entwickelt worden. Den typischen Aufbau eines Blocks zeigt Bild 9i (oben). Auf einer A4-Druckseite konnten bis zu  $3 \times 7$  solcher Blocks untergebracht werden. Einen Ausschnitt hiervon zeigt Bild 9j (unten). Jeder Block kann dabei 1,7 KByte Daten enthalten. Jede Zeile wird durch ein CRC 16 abgeschlossen. Die codierten Dateien sind zusätzlich mit ARJ komprimiert. Dadurch konnte eine Druckseite bis zu 70 KByte fassen. Die Daten-Struktur war so gut ausgewogen, dass selbst ein stückweises Einlesen mit den damals üblichen Hand-Scannern<sup>36</sup> erfolgreich verlief. Bei 300 – 400 dpi musste eine PCX-Datei entstehen. Die Auswertung besorgte ein relativ einfaches Programm: MCREADER. Es setzte schon damals – wie heute stitching-Programme der elektronischen Fotografie – automatisch die Teilbilder zusam-

<sup>36</sup> Hand-Scanner waren kleine Geräte mit einer CCD-Zeile von etwa 10 cm Breite. Sie wurden mit der Hand, ähnlich einer sehr großen Maus, langsam über den Text gezogen. Sie übergaben dem Rechner dabei ein z.T. schiefes und ungleichmäßiges Bild, s. [VÖL99].

men und erzeugte dann die Listings. Diese Technik wurde über einige Jahre angewendet und füllte manchmal mehrere Seiten der Zeitschrift.

Eine wichtige Anwendung betrifft den rechnergestützten Druck von *Briefmarken* „Ersatz“. Hiermit begann **US-Postage** etwa 1998 einen Großversuch, der am 28.1.1999 erfolgreich abgeschlossen wurde. Einen typischen Ausdruck zeigt Bild 9b. Darin sind auch die wichtigsten Inhalte erklärt. Der Code ist eine Variante des stacked-Codes PDF417. Die Übertragung für den Druck erfolgt über das Internet und ist mit einem 128-Bit-SSL-Code gesichert. Der Code enthält u.a. eine digitale Signatur. So ist jede Briefmarke ein Unikat. Auch **UPS** verwendet Label, die z.T. jedoch – wie Bild 9j zeigt – recht umfangreich sind und neben dem typischen Maxi Code noch zwei klassische Strich-Codes enthalten. 2002 führte die Deutsche Post das **Stampit** ein. Hierbei kann der Kunde – wie bei der USA-Variante – mittels Internet-Verbindung und einer speziellen Software seine Briefmarken selbst drucken. Der richtige Betrag wird automatisch von seinem Konto abgebucht. Beide Verfahren wenden sich nicht an die Großkunden, welche ihre Post freistempeln, sondern an den SoHo-Markt (**small-office, home-office**). Für sie entfällt hierdurch ein Anstehen nach Briefmarken bei der Post. Es wird der vierfach gestaffelte Data-Matrix-Code benutzt (Bild 9h). Im Code sind u.a. die Seriennummer des Kunden, Teile der Empfangsadresse, die Portohöhe, das Frankierdatum, eine kryptographische Information und ein Hash-Wert enthalten. Außerdem können Absender und Empfänger sowie andere Hinweise, wie Einschreiben, mit ausgedruckt werden.

Die 2D-Codes, insbesondere die Matrix-Codes, haben in den letzten Jahren viele neue Möglichkeiten entstehen lassen. Den Anfang zu dieser Entwicklung realisierte im Mai 2000 die Zeitschrift „The Post and Courier“. Sie druckte erstmalig Internet-Adressen als Strich-Code im Text ab. Inzwischen wird in großem Umfang das Mobiltelefon mit seinem Fotoapparat wirksam. Das aufgenommene Foto bewirkt dann automatisch einen Link zur entsprechenden Homepage. Selbst das Senden des Bildes per email ist ausreichend. Besonders umfangreich wird diese Methode in Japan benutzt. Hier sind die QR-Codes u.a. auf Plakaten, Werbeanzeigen, Großbildleinwänden, Produkten oder Visitenkarten vorhanden. Bei den Visitenkarten werden gleich automatisch die entsprechenden Daten ins Telefon-Verzeichnis des Mobil-Telefons eingetragen. Selbst als Coupon wird der Code eingesetzt. Beim Vorzeigen der Fotografie einer entsprechenden Werbeanzeige erhält der Besitzer im Einzelhandel eine Gutschrift für den Einkauf. Der Code wird z.T. auch als Fahrkarte oder Eintrittskarte verwendet. Die Firma TicTec der Schweiz realisiert so einen zentralen Kartenvorverkauf. Das so erhaltene Bild auf dem Handy-Display wird über einen speziellen Bildsensor am Veranstaltungsort erkannt und gibt das Drehkreuz frei. Von den vielen Varianten sei hier nur noch Semapedia von 2005 der WIKI-Gemeinde erwähnt. Auch hier geht das Mobiltelefon beim Fotografieren auf die entsprechende Homepage.

Die Entwicklung vom Strich-Code zum 2D-Code – als gestaffelter oder Matrix-Code – hat zu mehreren weiteren Begriffen geführt. Der Strich-Code wird auch Balken-, Linear- oder 1D-Code genannt. Als Oberbegriff wird meist *Barcode* verwendet (*englisch bar* ursprünglich Balken, Stange, Schranke, die Gasträum und Schankraum trennt). Bei den Linear-Codes wurden früher Latten- und Leiter-Code unterschieden. Die Leiter-Codes sind gegenüber der heute üblichen Darstellung um 90° gedreht, verlaufen daher von unten nach oben. Zur einfacheren Lesbarkeit gab es auch den heute nicht mehr benutzten T-Code, der beide Varianten über- oder nebeneinander darstellte. Für den Aufbau der Codes sind hauptsächlich zu unterscheiden: Benutzte Symbole, zulässige Symbolzahl, Verwendung von Prüfzeichen, ergänzende Beschriftung, Präfix-Zeichen, Zeichengröße sowie Start- und Stopp-Zeichen. Ursprünglich waren die *Symbole* nur Ziffern. Dann entstanden Codes mit einigen Sonderzeichen. Im einfachsten Fall nur „-“, später je nach Code auch eine Auswahl von Dollar, Doppelpunkt, Division, Schrägstrich, Punkt, Plus, Prozentzeichen und Leer-

zeichen. Bald war es auch notwendig, ASCII-Zeichen hinzuzufügen. Bei den Linear-Codes wird an die Bezeichnung dann oft „extended“ (englisch erweitert, verlängert) angehängt, z.B. Code 39 extended. Um den Code dennoch möglichst kompakt zu halten, werden vielfach unterschiedliche Einschränkungen benutzt, u.a. ASCII 0–96, 32–127 oder 0–127. Eine spezielle Variante liegt bei interleaved Code, z.B. Code 2/5 interleaved, vor (*englisch überlappt*). Hier bilden zwei Ziffern immer ein Symbol. Bei einer ungeraden Zifferanzahl muss dann eine 0 vorangestellt werden. Der QR-Code von Denso (später Nippondenso) kennt sogar japanische 1 817 Kanji- und Katakana-Zeichen. Bei einigen Codes besteht die Freiheit zwischen mehreren Varianten zu wählen, z.B. numerisch, Byte oder ASCII-Varianten. Hierdurch kann die Anzahl der nutzbaren **Symbolanzahl** verändert werden. Bei Data Matrix mit  $144 \times 144$  (Zeilen/Spalten) gilt dann z.B. für die Speicherkapazität 2 336 Text-Zeichen, 3 116 Digits oder 1 556 Bytes. Bei älteren Codes, wie z.B. EAN-13, sind sowohl die zulässigen Symbole als auch die Symbolanzahl genau festgelegt. Andere Codes, wie EAN-128, ermöglichen eine frei wählbare Symbolanzahl. Diese Variabilität gilt verstärkt für die 2D-Codes. Vom Code One gibt es z.B. die ergänzenden Versionen A bis G mit 10, 19, 44, 91, 182, 370, 732 oder 1480 Bytes. Der Aztec Code lässt quadratische Raster von  $15 \times 15$  bis  $151 \times 151$  zu. Einige Codes kommen ohne **Prüfzeichen** aus. Bei anderen sind sie eine Option. Die neueren Codes verwenden stets Fehlererkennung und Korrektur. Dabei werden recht unterschiedliche Algorithmen benutzt. Bei einigen Matrix-Codes ist die Fehlerkorrektur (z.B. Reed-Solomon-Code bei Data Matrix) so effektiv, dass bis 60 % des Codes ausfallen oder verändert sein dürfen. Eine hinzugefügte **Beschriftung** kann den Inhalt des Codes in für den Menschen lesbare Zeichen ergänzen. Dies ist dann – wie beim UPC und EAN – mit dem Font OCR-B vorgeschrieben (Bild 9c und e). Es können aber auch wie bei den elektronischen Briefmarken Teile des Codes oder nur Ergänzungen sein (Bild 9, b, h und j). Sogar Werbung oder Sondersymbole werden hier eingesetzt (Bild 9b und j). Früher wurde zuweilen auch ein Begrenzungsrahmen um den Code hinzugefügt (vgl. Bild 9f). Die benutzten **Präfix-Symbole** betreffen unterschiedliche Inhalte, u.a. können sie das Land (z.B. JAN = EAN in Japan mit Präfix 49) oder die Code-Anwendung (z.B. 978 beim ISBN, Bild 9e) betreffen. Für die **Zeichengröße** gibt es teilweise spezielle Bezeichnungen. Für den EAN gibt es z.B. die genormten Größen von SC 0 bis SC 9. In anderen Fällen wird nur das Längen-Höhen-Verhältnis als Aspekt Ratio angegeben. Beim Strich-Code hängt dies z.B. damit zusammen, dass die Drucker nur eine gewisse Auflösung besitzen, und die vorhandenen Strich- und Pausenabmessungen aber deutlich unterscheidbar erzeugt werden müssen. Bei den meisten Strich-Codes gibt es für beides nur zwei unterscheidbare Längen. Vielfach ist für ein Symbol die jeweils zulässige Anzahl von weiten und engen Lücken bzw. schmalen und breiten Strichen definiert. Hieraus ergeben sich die Kennzeichnungen, wie Code 39 = Code 3/9 = Code 3 aus 9 mit 9 Elementen aus 5 Strichen und 4 Lücken oder Code 2/5. Bei den Matrix-Codes werden mit Ausnahme vom hexagonalen Maxi-Code nur Quadrate benutzt, die schwarz oder weiß sein können. Sie erhalten daher die unterschiedlichen **Hilfsmuster** zu ihrer Orientierung (s.o. und Bild 9k). Während die meisten Sondermuster unmittelbar erkennbar sind, gilt für Data-Matrix, dass der linke und untere Rand stets eine schwarze Linie ist. Am rechten und oberen Rand wechseln sich dagegen schwarze und weiße Punkte ab. Diese Vielzahl von Möglichkeiten macht für jeden einzelnen Code recht umfangreiches Spezialwissen erforderlich. Daher sind die Algorithmen von vielen Codes nicht allgemein zugänglich. Viele Details, die vor einigen Jahren noch im Internet zu finden waren, sind inzwischen nicht mehr vorhanden.

Bar-Codes müssen gut sichtbar und von Scanner einwandfrei lesbar sein. Dennoch sind sie heute, besonders die Matrix-Codes, sehr robust gegenüber schlechter Druckqualität, Beschädigungen, Verschmutzungen und schlechter Beleuchtung, sofern der Scanner nicht

selbst Licht erzeugt. Fehler würden hier vor allem bei sensiblen Anwendungen, wie z.B. in der Medizin, folgeschwer sein. Daher werden auch verschiedene Barcode-Träger, vom einfachen Papier-Label über Kunststoffe bis zu Metallen und Keramiken benutzt. Bei einzelnen Anwendungen sind unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen, z.B. Feuchtigkeitsresistenz, Abkratzbarkeit, medizinisch unbedenkliche, festhaftende Kleber oder Wasserlöslichkeit. Wichtig kann auch die Hitzebeständigkeit sein. Bei der Leiterplatten-Fertigung muss das Label z.B. Temperaturen von etwa 250 C° überstehen. Es wurden sogar Keramik-Etiketten geschaffen, die bis zu 2000 C° vertragen. Merkmale der Codes betreffen u.a. ihre Auflösung, Randschärfe, den Kontrast und die Kopierfähigkeit, z.T. auch, wie bei der Briefmarke, die Fälschungssicherheit. Als Erweiterung von vielen Bar-Code- Eigenschaften wird vielfach das **RFID-Label** (**radio frequency identification**) gepriesen. Es benötigt keinen Sichtkontakt, ist nicht durch Verschmutzung usw. zu beeinflussen, ermöglicht den Passwortschutz der Daten und erlaubt vor allem zusätzliche Programmierung. Der dabei wesentliche Halbleiterchip kann natürlich nicht mit üblicher Drucktechnik von jedem Produzenten selbst hergestellt werden. Das gesamte, nicht ganz billige Label muss erst gekauft und dann durch Zusatzeinrichtungen von Spezialisten programmiert werden. Für viele Anwendungen ist auch seine Dicke nachteilig bis störend. Dies gilt selbst dann, wenn sie äußerst dünn werden – im Labor wurden 10 µm erreicht – und dabei sogar etwas flexibel sind. Auch ist so ein Label mechanisch und durch starke elektrische Störfeldern verletzbar. Ferner ist fraglich, ob die viel gepriesene größere Speicherkapazität – Bar-Codes erreichen heute mehrere tausend Byte – so wesentlich ist. Insgesamt ist es daher sehr unwahrscheinlich, dass es eine echte Konkurrenz für die Bar-Codes darstellt. Sie sind extrem breit eingeführt und werden sehr vielfältig angewendet. Daher dürften sie sich kaum wesentlich verdrängen lassen (vgl. Abschnitt 2.4). Es hat eher den Anschein, dass die RFID-Tags z.Z. bei der Hype-Kurve im Maximum der Überbewertung liegen und ihnen noch das Tal der Tränen bevorsteht, dass sie jedoch wahrscheinlich mit einem gewissen Erfolg durchlaufen werden<sup>37</sup> (vgl. Kontext von Bild 1.30). Außerdem zeichnen sich dem Bar-Code ähnliche Techniken bei kleinsten Abmessungen ab. Sie sind dann zwar nicht mehr für das Auge unmittelbar sichtbar oder werden gar aus Sicherheitsgründen durch andere Bilder verdeckt (vgl. tesa-Holospot, Abschnitt 4.7.). Eine englische Firma versieht so zur Fälschungssicherheit die Druckertinte bzw. den Toner mit magnetischen Nano-Teilchen aus Eisen und Nickel. Ihr Feld kann zusätzlich mit speziellen Scannern über einen polarisierten Laser-Strahl magneto-optisch ausgelesen werden. Diese Bar-Codes sind dann zwar optisch, jedoch nicht mit ihren magnetischen Eigenschaften kopierbar. Das Prinzip wurde von RUSSEL COWBURN an der Universität von Durham entwickelt. Eine weitere Methode wurde von ROLF SIMONS eingeführt [Druck & Medien 9/04; 32]. Hierbei dienen individuell hergestellte Kombinationen kleinster Farbpartikel als Warenschutz. Das Pulver besteht aus Farbteilchen mit 0,8 µm Durchmesser und wird ausschließlich von Simons Druck und Vertrieb in Notulm hergestellt und vertrieben. Es wird individuell für jeden einzelnen Besteller ohne irgendwelche Rückstände mg-genau verkauft. Mit ihm lassen sich sogar Sprengstoffe so kennzeichnen, dass selbst nach der Explosion ihre Herkunft einwandfrei zu ermitteln ist. Für die Analyse ist ein Mikroskop mit 40facher Vergrößerung erforderlich. Eine praktische Anwendung erfolgt z.B. bei Puma-Schuhen.

---

<sup>37</sup> Es fällt auf, dass „einfache“ Techniken, wie z.B. Fax und Barcodes nicht die Hypekurve durchlaufen. Da sie auch wissenschaftlich so gut wie nicht behandelt werden, könnte hier ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Hypekurve und der wissenschaftlichen Attraktivität bestehen. Dies zu untersuchen und daraus Folgerungen zu ziehen, ist gewiss eine interessante Aufgabe.