

Speichertechniken

Hans Jürgen Ohlbach

Keywords: Magnetspeicher, Flash-Speicher, optische Speicher, Flipflops(RAM)

Empfohlene Vorkenntnisse: Schaltnetze (für Abschnitt 5.1)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Magnetspeicher	2
2.1 Bänder und Platten	3
3 Flash-Speicher	5
4 CDs, DVDs, Blue-Rays	7
5 Random Access Memories (RAMs)	9
5.1 Flipflops	9

1 Einführung

Kein heutiger Computer kann funktionieren, ohne die Möglichkeit, Informationen zu speichern und wieder zu lesen. Für digitalen Computer benötigt man daher auf der untersten Ebene zunächst die Möglichkeit, einzelne Bits zu speichern und zu lesen. Auf etwas höherer Ebene möchte man natürlich nicht mit einzelnen Bits operieren, sondern mit mehr oder weniger großen Gruppen von Bits (Zahlen, Texte, Bilder usw.). In diesem Miniscript geht es aber erst einmal nur um die unterste Ebene, die Speicherung von einzelnen Bits. Wir betrachten zunächst Magnetspeicher für die Speicherung externer Daten, und dann Flash-Speicher, ebenfalls für die Speicherung externer Daten. Obwohl Flash-Speicher immer mehr die Magnetspeicher verdrängen, sind Magnetspeicher derzeit noch sehr häufig

im Einsatz. In einem kurzen Kapitel werden auch die allseits bekannten optischen Speicher, CDs, DVDs und Blue Rays angesprochen. Schließlich geht es im letzten Kapitel um Flipflops, d.h. um die schnellste Speichertechnologie, wie sie für Arbeitsspeicher und Register in Prozessoren verwendet wird.

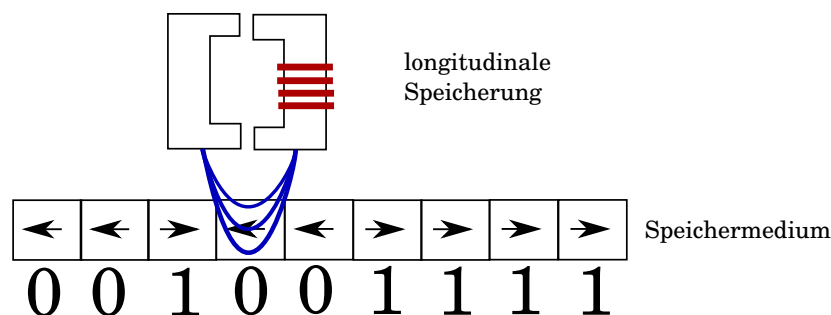
Das Wissen um die Funktionsweise dieser Speichertechnologien hilft sehr beim Kauf und Einsatz von Hard- und Software.

2 Magnetspeicher

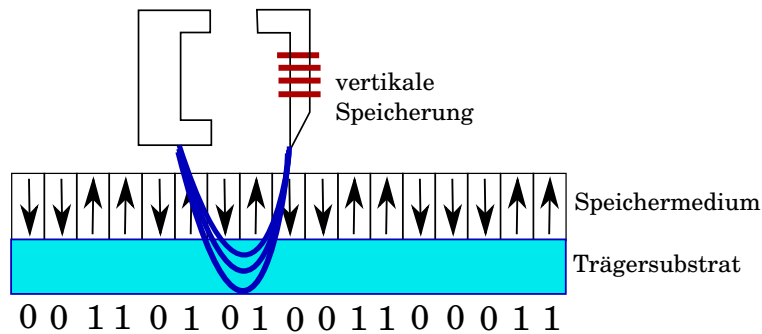
Eines der ältesten der auch heute noch in Gebrauch befindlichen Speicherverfahren ist die *magnetische Speicherung*. Hier nutzt man aus, dass ferromagnetischen Stoffe, z.B. Eisen, magnetisiert werden können, d.h. die magnetischen Momente der Atome (sog. Elementarmagnete) zeigen alle in eine Richtung, und der Stoff wirkt als Magnet. Allerdings müssen nicht wirklich *alle* Elementarmagnete eines magnetischen Stoffes in eine Richtung zeigen. Es können sich kleine Bereiche bilden, sog. *Weiss-Bezirke*, wo alle Elementarmagnete in eine Richtung zeigen. Die Elementarmagnete eines benachbarten Weiss-Bezirks können dann aber in eine andere Richtung zeigen. Die einzelnen Bezirke sind durch sog. *Bloch Wände* voneinander getrennt. Die Magnetisierungsrichtung eines Weiss-Bezirks lässt sich durch einen Elektromagneten abtasten (lesen) und auch verändern (schreiben).

Dies nutzt man jetzt folgendermaßen aus: Ein ferrormagnetischer Stoff wird entweder als Magnetband oder als Magnetplatte geformt. Diesem Stoff werden magnetisch Folgen von Weiss-Bezirken aufgeprägt. Bei Magnetbändern liegen die nebeneinander auf dem Band. Bei Magnetplatten liegen die in Kreisen angeordnet (sog. *Tracks*). Die Weiss-Bezirke können jetzt in zwei verschiedene Richtungen magnetisiert werden. Eine Richtung gilt dann als 0 und die andere Richtung gilt als 1. Mit einem Elektromagneten, der die Reihenfolge der Weiss-Bezirke abfährt, kann man jetzt die Magnetisierungsrichtung lesen und verändern.

In den ersten Magnetspeichern war die Magnetisierungsrichtung horizontal entlang des Bandes oder der Platte wie in diesem Bild.



Seit ca. 2010 gibt es Magnetspeicher, wo die Magnetisierungsrichtung vertikal liegt (perpendicular recording). Damit konnte man die Speicherdichte verzehnfachen.



2.1 Bänder und Platten

Bei *Magnetbändern* wird die ferromagnetische Schicht auf einem flexiblen Band aufgetragen. Dieses Band wird unter einem fest installierten Schreib-Lesekopf hin und her gespult. Man kennt sie von früher als Tonbänder, Musikkassetten, Videobänder und in der IT als Datenbänder. Heute spielen sie kaum noch eine Rolle, außer als Backupspeicher für große Datenmengen. Die Kapazität solcher Bandkassetten ist in der Größenordnung bis zu einem Terabyte. Der große Nachteil von Bandkassetten ist, dass sie nur sequentiell gelesen werden können. Um ganz bestimmte Daten zu lesen, muss man das Band von vorne bis zu der Stelle, wo diese Daten sind, vorspulen.

Bei *Festplatten* wird die ferromagnetische Schicht auf runde rotierende Platten aufgetragen. Die Weiss-Bezirke werden darauf als konzentrische Ringe (Spuren, Tracks) angelegt. Der Schreib-Lesekopf sitzt auf einem beweglichen Arm, der die einzelnen Spuren anfahren kann, und dann die unter ihm vorbei rotierenden Bits lesen und schreiben kann.

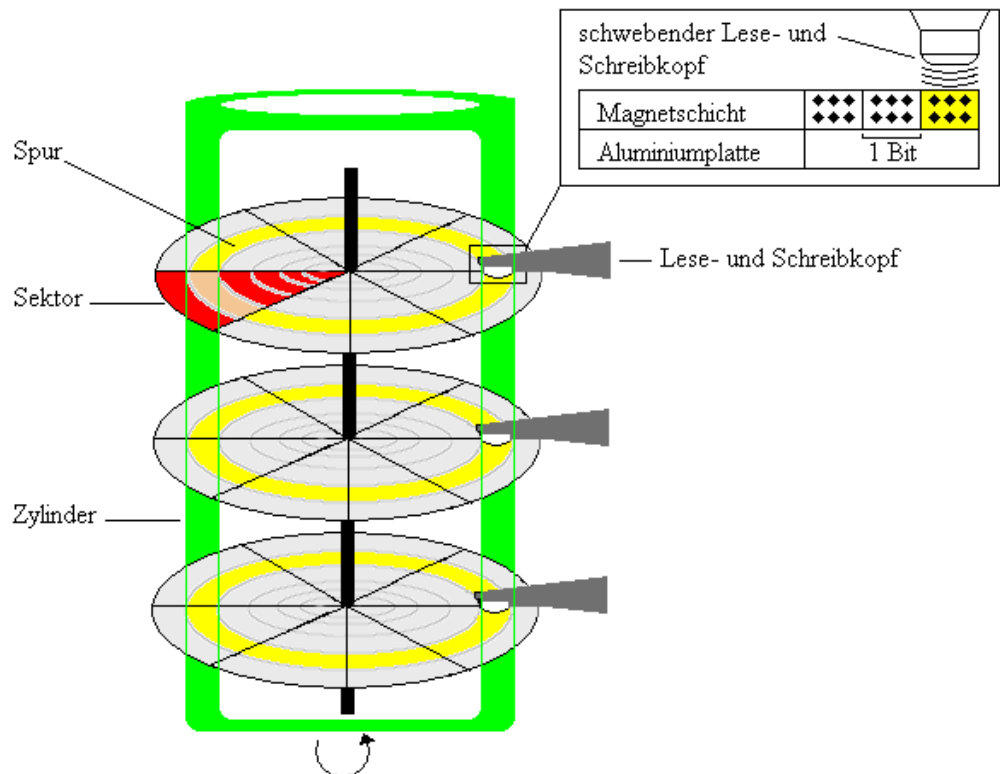


Die Platten sind i.A. oben und unten beschichtet, und zu mehreren aufeinander gestapelt. Für jede Plattenseite gibt es dann einen eigenen Arm mit dem Schreib- Lesekopf. Damit können dann mehrere Bits parallel gelesen und geschrieben werden. Die in den verschiedenen Platten übereinander liegenden Spuren fasst man zu einem *Zylinder* zusammen. Da alle Schreib-Leseköpfe fest miteinander verbunden sind, bewegen sie sich nicht nur zu einer bestimmten Spur einer Plattenoberfläche, sondern simultan zu allen übereinander liegenden Spuren, dem Zylinder.

Jede Spur, und damit jeder Zylinder ist in *Sektoren* aufgeteilt. Mit *Sektor* ist allerdings meist der Sektor

des Zylinders gemeint, d.h. die Menge der übereinander liegenden Sektoren der Plattenoberflächen. Ein Sektor eines Zylinders ist meist 0.5 oder 1 Kilobyte groß. Ein Schreib-Lesevorgang kann nur einen ganzen Sektor schreiben oder lesen. Falls aus einem Sektor einzelne Bits gebraucht werden, muss man den Sektor in den Hauptspeicher lesen, und dort die Bits extrahieren.

Festplattengeometrie



Die Graphik wurde von Wikipedia User Bagok erstellt.

Festplatten werden in unterschiedlichen Baugrößen angeboten. Dabei wird der Durchmesser der Platten in Zoll angegeben. Es gibt welche mit 1,8, 2,5, 3,5 und 5,25 Zoll Durchmesser. Die größte im Jahr 2016 angebotene Festplatte fasst 10 Terabyte (HGST Ultrastar He10).

Der Gesamtspeicherplatz einer Festplatte wird i.A. unterteilt in einen sog. *Masterbootrecord* und eine oder mehrere *Partitionen*. Der Masterbootrecord enthält das Programm, welches einen Rechner hochfahren kann (den *Bootloader*). Eine Partition kann ein Betriebssystem enthalten, oder auch Datenbereiche. Auf einer Festplatte können daher mehrere verschiedene Betriebssysteme parallel vorhanden sein.

Konsequenz für das Programmieren

Für den Programmierer ist es wichtig zu wissen, wie die Daten einer Festplatte gelesen werden.

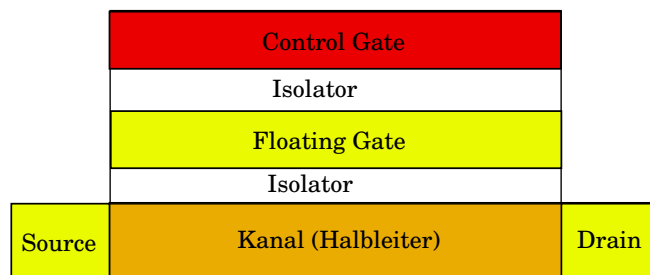
Wie schon gesagt, können nur jeweils ganze Sektoren gelesen oder geschrieben werden. Außerdem braucht der Arm etwas Zeit, um die gewünschte Spur anzusteuern, im Mittel ca. 9 ms bei 7200 Umdrehungen/Minute der Platte. Es ist daher keine sehr gute Idee, immer nur wenige Bits von der Platte zu lesen oder zu schreiben. Man sollte die Programme so anlegen, dass möglichst große Datenmengen auf einmal gelesen oder geschrieben werden. Die Manipulation einzelner Bits sollte im Hauptspeicher erfolgen.

3 Flash-Speicher

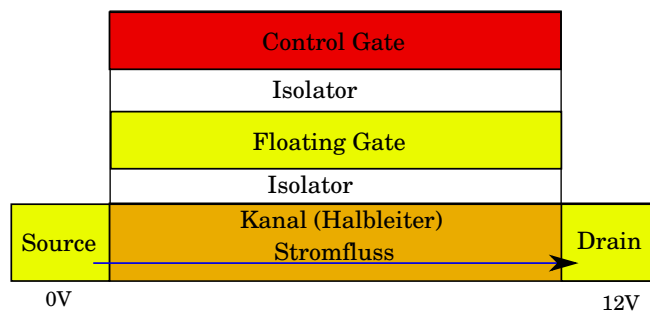
Die *Flash-Speichertechnik* ist heute u.a. in den Speicherkarten, USB-Sticks und Solid State Drives (SSD) zu finden. Durch ihre vielen Vorteile verdrängt sie allmählich immer mehr die anderen externen Speichertechniken.

Funktionsprinzip

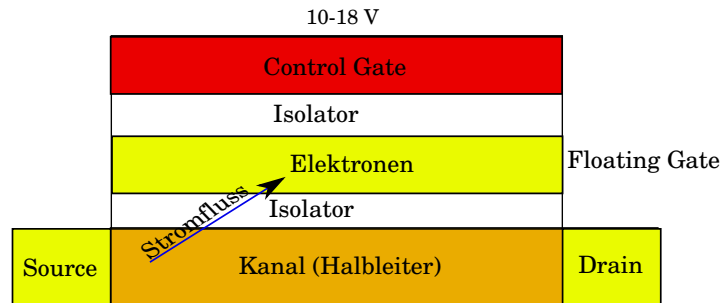
Wir erklären das Funktionsprinzip für die *Floating-Gate* Transistortechnik. Eine Alternative ist die Charge-Trapping Technik, die im Prinzip ähnlich, aber im Detail anders funktioniert. Die wichtigste Eigenschaft eines Floating-Gate Transistors, ist, dass er auch im ausgeschalteten Zustand seine Information behält. Der Aufbau sieht so aus:



Das *Floating Gate* ist zunächst vollkommen isoliert von dem Rest des Transistors. Ungeladen hat es keinen Einfluss auf den Rest des Transistors. Jetzt kann man den Speicherinhalt folgendermaßen testen. Zwischen Source und Drain wird eine Spannung angelegt. Durch den Kanal fließt ein Strom. Der Stromfluss zeigt das Bit 1 an.

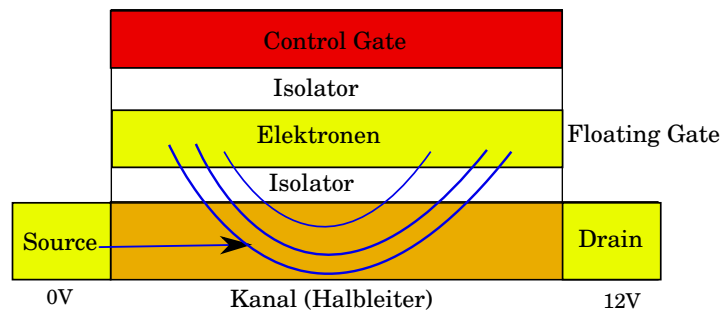


Nun wollen wir das Bit 0 einspeichern. Diese Aktion soll den Stromfluss zwischen Source und Drain unterbrechen. Dazu müssen Elektronen in das Floating Gate hineingezogen werden. Dafür wird eine hohe positive Spannung an das Control Gate angelegt. Diese bewirkt, dass Elektronen in das Floating Gate gezogen werden.



Obwohl zwischen Floating Gate und dem Kanal ein Isolator liegt, kann Strom fließen. Das ist möglich wegen des quantenmechanischen Tunneleffekts. Mit Hilfe des Tunneleffekts können Elektronen auch Hindernisse überwinden (oder durchtunneln), die sie mit normaler Elektrodynamik nicht schaffen könnten. Alle unsere USB-Sticks und sonstigen Flash-Speicher funktionieren daher nur mit quantenmechanischen Phänomenen.

Die Elektronen im Floating Gate erzeugen nun ein elektrisches Feld, welches durch den Isolator in den Halbleiter wirkt, und damit den Kanal zwischen Source und Drain sperrt.



Legt man jetzt eine Spannung zwischen Source und Drain an, dann fließt kein Strom, was die logische 0 anzeigt.

Um die 0 wieder zu löschen, muss man an dem Control Gate eine negative Spannung anlegen. Das bewirkt, dass die Elektronen, wiederum per Tunneleffekt, aus dem Floating Gate heraus gedrückt werden. Damit ist der Weg zwischen Source und Drain wieder frei.

Da das Floating Gate zwischen Isolatoren liegt, verliert es seine Elektronen auch nicht, wenn alle Spannungen ausgeschaltet werden. Somit kann man Information dauerhaft speichern.

Allerdings bewirken die Schreibvorgänge, bei denen Elektronen in das Floating Gate hineingezogen werden und wieder heraus gedrückt werden, winzige Defekte im Isolator. Diese können sich über die Zeit soweit akkumulieren, dass die Speicherzelle unbrauchbar wird. Moderne Flash-Speicher können das aber testen und defekte Zellen stilllegen. Die Lebensdauer von Flash-Speichern wird daher oft

nicht in Zeitspannen, sondern in der Anzahl von möglichen Schreib-Leseoperation, bis der Speicher unbrauchbar wird, angegeben,

Die Menge der Elektronen im Floating Gate bestimmt die Stärke des elektrischen Feldes, und diese wiederum den Grad der Sperrung zwischen Source und Drain. Dies wiederum beeinflusst die Stromstärke zwischen Source und Drain. Das nutzt man aus, um mehr als ein Bit zu speichern. Mit vier verschiedenen Ladezuständen im Floating Gate kann man dann ein Bit-Paar speichern: 00, 01, 10, 11. Damit lässt sich die Speicherdichte im Falsh-Speicher verdoppeln.

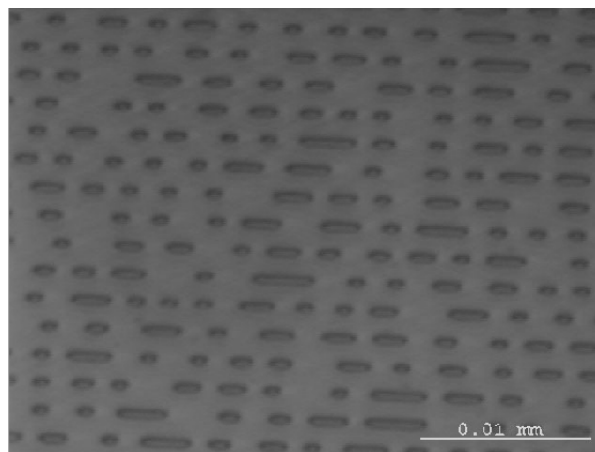
Seit 2016 gibt es den auf Falsh-Technologie basierenden Samsung PM1633a SSD-Speicher mit 15 Terabyte Kapazität. Da USB-Sticks und SSD-Speicher keine mechanischen Teile haben, sind die Zugriffszeiten für die Daten erheblich besser als bei Festplatten. Typische Zeiten sind 0.1 bis 0.01 ms. Darüber hinaus kann man gleichermaßen auf beliebige Daten zugreifen, und nicht, wie bei Festplatten, nur auf Sektoren. Damit hat man bei der Programmierung keine Einschränkung mehr beim Zugriff auf externe Daten.

4 CDs, DVDs, Blue-Rays

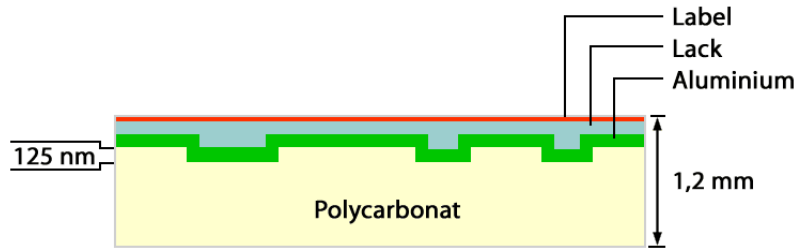
Jeder kennt sie. Aber wie sie aufgebaut sind, ist wahrscheinlich weniger bekannt.

CDs

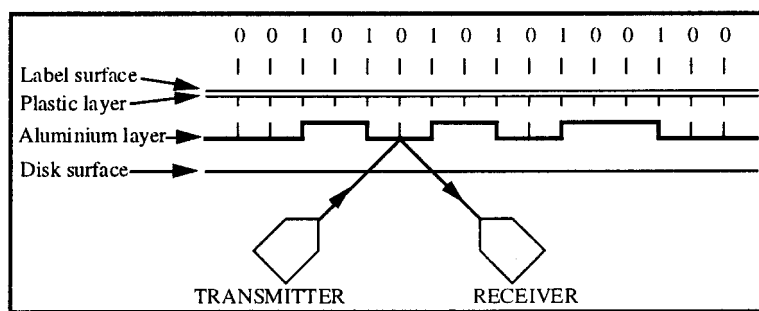
Auf den altbekannten CD-Scheiben sind die Bits durch eingepresste Löcher auf einer spiralförmigen Bahn kodiert.



Im Querschnitt sieht das so aus:



Die CDs werden mechanisch von Masterplatten gepresst, und können dann nicht mehr verändert werden. Gelesen werden sie, indem ein Laserstrahl die Spur entlangfährt. Dabei wird die Reflexion gemessen und in Bitfolgen umgesetzt.

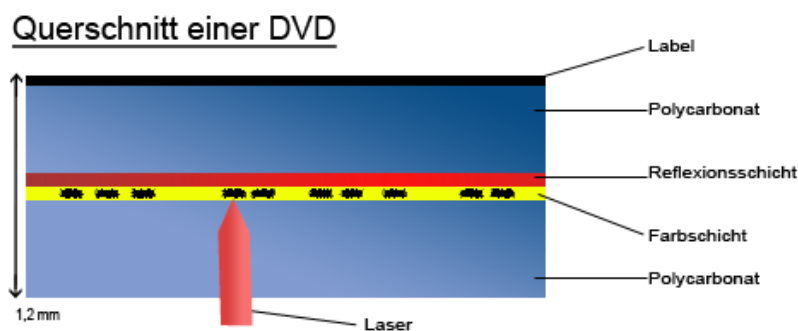


Es ist allerdings nicht so, dass z.B. ein Loch die 1 repräsentiert und kein Loch die 0. Stattdessen repräsentieren Flanken, d.h. der Abstieg in ein Loch, und der Aufstieg aus dem Loch, die 1 und gerade Strecken repräsentieren die 0.

Die Kapazität einer solchen CD ist ca. 700 Megabyte.

DVDs

Bei DVDs werden Bits durch unterschiedliches Reflexionsvermögen einer Farbschicht dargestellt. Bei beschreibbaren DVDs lässt sich das Reflexionsvermögen durch einen Laser verändern.



Die Kapazität einer solchen DVD ist ca. 4,7 Gigabyte bzw. 9,4 Gigabyte doppelseitig.

Blue-Ray Discs

Blue-Ray Discs funktionieren im Prinzip nach dem gleichen Prinzip wie DVDs, nur sind alle Parameter viel präziser. Der Laser hat eine kleinere Wellenlänge (violett, daher der Name Blue-Ray), der Spurbstand ist kleiner, die Linsen sind präziser, der Abstand zwischen Laser und Speicherschicht ist kleiner, die Datenrate ist höher usw.

Darüber hinaus ist für Blue-Rays eine interaktive Anwendungsschicht spezifiziert, womit man dem Benutzer mehr Freiheiten in der Steuerung des Abspielvorgangs geben kann.

Eine Blue-Ray Disc fasst 25 Gigabyte bzw. 50 Gigabyte doppelseitig.

5 Random Access Memories (RAMs)

Die Speichertechniken mit den schnellsten Schaltzeiten, heute im Nanosekundenbereich, werden für den Arbeitsspeicher eines Rechners und für die internen Register der Prozessoren benutzt. Random Access Memories können Informationen nahezu gleich schnell lesen und schreiben, allerdings nur solange die Stromversorgung gewährleistet ist. Wird der Rechner ausgeschaltet, dann verlieren sie ihre Information.

Man unterscheidet dynamische und statische RAMs: In dynamischen RAMs (DRAM) wird die Information in Kondensatoren gespeichert. Für jedes Bit reicht ein Kondensator und ein Transistor. Allerdings verlieren die Kondensatoren relativ schnell ihre Ladung, und müssen daher regelmäßig wieder aufgeladen werden (refreshing). Während des Aufladens hat man jedoch keinen Zugriff auf die Information. Daher sind DRAMs oft langsamer als statische RAMs. Sie erlauben jedoch eine höhere Packungsdichte.

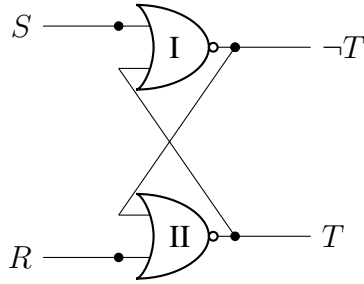
In statischen RAMs (SRAM) wird die Information in rückgekoppelten Schaltkreisen sog. Flipflops gespeichert.

5.1 Flipflops

(Zum Studium dieses Abschnitts sollte man mit Schaltnetzen vertraut sein.)

Ein Flipflop, oft auch bistabile Kippstufe oder bistabiles Kippglied genannt, ist eine Schaltung, mit der es möglich ist, ein Bit an Information in eine Rückkopplungsschleife zu speichern. Die einfachste Variante ist ein *RS-Flipflop* (auch Latch genannt). Es hat einen S-Eingang (S wie Set), und einen R-Eingang (R wie Reset), sowie Ausgänge T und $\neg T$ (die Negation von T).

Mit NOR-Gatter Technik sieht die Schaltung so aus:

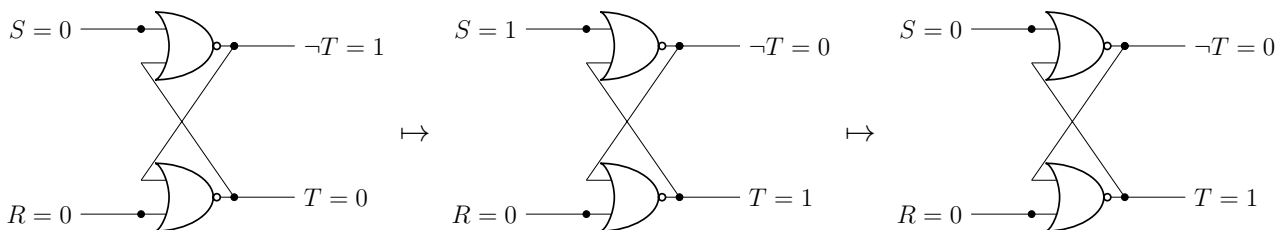


Man sieht direkt die Rückkopplung: die Eingabe von I hängt von der Ausgabe von II ab, und umgekehrt. Man kann daher nicht direkt eine Wertetabelle für die Schaltung angeben, sondern man muss sie abhängig machen vom Startwert von T und $\neg T$. Dann sieht sie so aus:

Startwert $T = 0, \neg T = 1$				Startwert $T = 1, \neg T = 0$			
Eingabe		Ausgabe		Eingabe		Ausgabe	
R	S	T	$\neg T$	R	S	T	$\neg T$
0	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1
1	1	ungültig		1	1	ungültig	

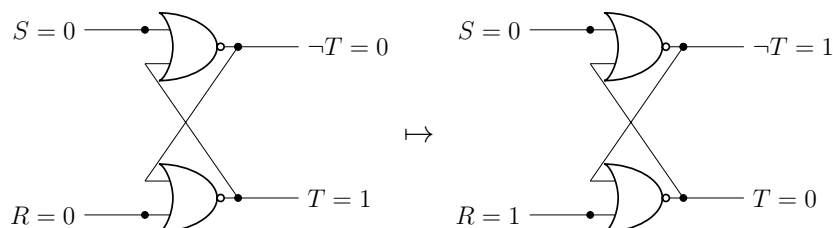
Die Kombination $S = 1, R = 1$ bewirkt einen nicht-logischen Zustand mit $T = 0$ und $\neg T = 0$, was man tunlichst vermeiden sollte.

Um zu verstehen, wie die Schaltung als Speicher funktioniert, starten wir mit $T = 0$ und $\neg T = 1$ und speichern dann eine 1 ein, indem kurzfristig das Signal $S = 1$ kommt, welches aber dann wieder auf $S = 0$ gesetzt wird.



Aus der Wertetabelle kann man ersehen, dass die Umschaltung von $S = 1$ auf $S = 0$ keine Änderung an der Ausgabe bewirkt. D.h. $T = 1$ ist eingespeichert, und bleibt so.

Jetzt wollen wir $T = 1$ wieder löschen, d.h. das gespeicherte Bit auf 0 setzen. Dabei ist wichtig, dass in diesem Moment $S = 0$ anliegt. Wir legen jetzt $R = 1$ an (reset).



Auch wenn man jetzt $R = 0$ anlegt, ändert sich an der Ausgabe nichts. $R = 0$ sollte aber trotzdem angelegt werden, bevor mit $S = 1$ wiederum ein Bit gespeichert wird.

Die Abfolge ist also folgendermaßen:

1. Beim Aktivieren des Speichers (Einschalten des Rechners) sollte $T = 0$ und $\neg T = 1$, sowie $S = 0$ und $R = 0$ angelegt werden. Damit wird der Speicher mit Inhalt = 0 initialisiert.
2. Um eine 1 einzuspeichern, wird kurzfristig das Signal $S = 1$ angelegt (set), aber dann wieder auf $S = 0$ zurückgesetzt.
3. Um die 1 zu löschen wird kurzfristig das Signal $R = 1$ angelegt (reset), und dann auch wieder auf $R = 0$ zurückgesetzt.

Oft ist es gewünscht, dass ein Flipflop nur in ganz bestimmten Situationen überhaupt reagiert, z.B. damit mehrere Flipflops synchron arbeiten. Um das zu erreichen, wird ein RS-Flipflop mit Zusatzschaltungen bestückt, mit denen man die Reaktionen zeitlich kontrollieren kann. Man hat dann z.B. taktgesteuerte Flipflops.

Es wurden auch eine Reihe von weiteren Flipflop-Typen entwickelt, z.B. D-Flipflops, mit denen man Signale verzögern kann, oder JK-Flipflops, die keinen dieser unerlaubten Zustände haben.

Heutige Speicherbausteine haben Millionen oder gar Milliarden solcher Flipflops zusammen geschaltet. Durch geschickte Steuerungsschaltkreise kann man dabei ganz gezielt einzelne Gruppen von Flipflops ansprechen, und damit Informationen an ganz bestimmten Adressen einspeichern und auslesen.

Stichwortverzeichnis

Blue-Ray Disc, 9

CD, 7

D-Flipflop, 11

DVD, 8

Dynamische RAMs, 9

Festplatte, 3

Flash-Speichertechnik, 5

Flipflop, 9

Floating Gate, 5

JK-Flipflop, 11

Magnetband, 3

Masterbootrecord, 4

Partition, 4

RAM, 9

Random Access Memory, 9

RS-Flipflop, 9

Sektoren, 3

SSD, 5

Statischen RAMs, 9