

Proseminar Technische Informatik – Die Technologie von Solid State Disks –

von Matthias Niemann
Matrikelnummer: 4200190

Abstract

Solid State Disks sind moderne Massenspeicher, die gegenwärtig den Computer-Markt erobern. Sie kommen ohne eine frei bewegliche Mechanik aus. Um Daten zu speichern, werden Flash-Speicher in NAND-Architektur verwendet. Es werden mehrere Flash-Chips parallel angesteuert, um eine hohe Kapazität und einen hohen Datendurchsatz zu ermöglichen. Dies wird durch leistungsfähige Flash-Controller, die durch einen übergeordneten Controller gesteuert werden, realisiert. Dieser Controller muss gleichzeitig die Kommunikation mit dem Host-System steuern. Vorzugsweise geschieht das über die SATA-II-Schnittstelle. Damit der Verschleiß der Speicherzellen nicht zu einem frühen Ausfall des Speichers führt, sind aufwendige Wear-Leveling-Algorithmen nötig. Diese sorgen dafür, dass alle Speicherzellen möglichst gleichmäßig genutzt werden. Trotz einer höheren Geschwindigkeit von SSDs gegenüber Festplatten verbrauchen sie weniger Energie. Dies ist einer der Gründe, weshalb mittelfristig von einer Ersetzung von HDDs durch SSDs in vielen Marktsegmenten ausgegangen werden kann.

1. Einleitung und Motivation

Flash-Speicher werden schon seit geraumer Zeit für viele Anwendungen des täglichen Lebens verwendet. So sind heutzutage die meisten USB-Sticks und MP3-Player mit Flash-Speichern ausgestattet, aber auch Speicherkarten für Digitalkameras und Mobiltelefone. Durch die technologische und preisliche Entwicklung im Flash-Speicher-Bereich wird dieser jedoch auch seit Kurzem für den Festplattenmarkt interessant. Die hohe Speicherdichte moderner Flash-Chips und der geringe Preis machen es nun möglich, eine relativ hohe Speicherkapazität in herkömmlichen Festplattengehäusen unterzubringen. So können die Vorteile von Flash-Speichern gegenüber den bisher üblichen Festplatten mit rotierenden Metallscheiben, die Daten ferromagnetisch speichern (HDD), auch im Bereich der Consumer-PCs genutzt werden. Diese neuartigen Festplatten, die mit Flash-Speichern als Datenspeicher ausgerüstet sind, heißen SSD. Die Abkürzung steht für „Solid State Disk“ und bedeutet, dass es sich um eine Daten speichernde Scheibe handelt, die keinerlei bewegliche Teile besitzt. Streng genommen ist diese Bezeichnung zwar irreführend, da es keine Scheibe gibt, die die Daten speichert, aber da sich die Bezeichnung „Disk“ für Massenspeicher durchgesetzt hat, beließ man es dabei. Ganz offensichtlich bietet – das ergibt sich schon aus der Definition des Namens – die Solid State Disk einige große Vorteile gegenüber den herkömmlichen Festplatten. Die SSD hat keine frei bewegliche Mechanik, weshalb sie unempfindlich gegenüber Stößen ist. Probleme durch mechanischen Verschleiß sind ausgeschlossen. Geräusche wie bei herkömmlichen Festplatten entstehen nicht. Die fehlende Mechanik lässt zunächst auch vermuten, dass sich der Stromverbrauch reduziert. Außerdem werben Hersteller von SSDs mit höheren Geschwindigkeiten gegenüber HDDs. So liegt die Vermutung nahe, dass Solid State Disks Festplatten mit rotierenden Scheiben in naher Zukunft ablösen werden. Ob das realistisch ist und wie nahe diese Zukunft sein kann, werde ich in dieser Seminararbeit erörtern.

2. Grundlagen

2.1 Transistoren und Speicherzellen

Grob betrachtet besteht eine Solid State Disk zum einen aus dem Controller, der die Anfragen des Hosts, zum Beispiel einem PC, bearbeitet, ausführt und steuert. Darauf wird im Abschnitt 3.1 eingegangen. Zum anderen besteht sie aus Speicherzellen, die Daten aufnehmen können und auch nach der Trennung der Versorgungsspannung Daten speichern. Um in einer SSD über einen längeren Zeitraum Datenmengen zu speichern, wie sie heutzutage üblich sind, werden mehrere Millionen Transistoren benötigt [1]. Diese Transistoren gehören zur Familie der Speicherfeldeffekttransistoren. Grundlage für solche Halbleiterelemente sind MOSFET-Transistoren (Abkürzung für Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Die ursprüngliche Bauweise dieses Transistors (Abbildung 1) besitzt, wenn man den Querschnitt als Bezugspunkt betrachtet, auf der linken Seite einen Source-Anschluss und auf der rechten einen Drain-Anschluss. Diese bestehen beide entweder aus n- oder aus p-dotiertem Silizium. Umgeben werden diese Anschlüsse dann vom jeweils anderen Siliziumtyp, damit sich ein durch die Siliziumübergänge bedingter Elektronenkanal bildet. Dieser Kanal wird nun durch das senkrecht wirkende elektrische Feld zwischen Gate und Base gesteuert. Eine Isolationsschicht zwischen dem Gate und dem Elektronenkanal verhindert, dass alle Elektronen über das Gate abfließen. Der entstehende Kanal kann nun mithilfe des elektrischen Feldes so verändert werden, dass man steuern kann, wie gut Elektronen zwischen Source und Drain fließen können. Die Leitfähigkeit kann sogar so weit eingeschränkt werden, dass gar kein Elektronenfluss mehr zustande kommt [2].

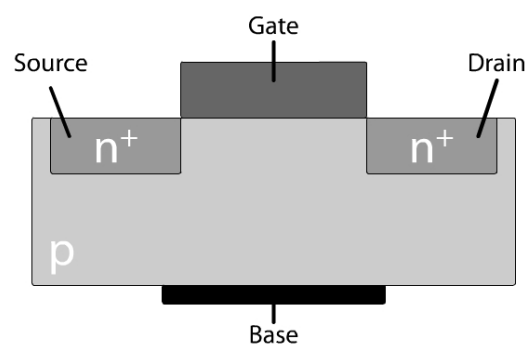


Abbildung 1: MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Diese Bauart ermöglicht es jedoch nicht, in einem einzigen Transistor einen Ladungszustand zu speichern. Um das zu erreichen und damit die Fähigkeit zu besitzen, Daten zu beherbergen und sie durch elektrische Signale zu löschen, ist eine Modifikation des MOSFETs nötig. Dabei handelt es sich um den Floating-Gate-MOSFET. Dieser besitzt

anstelle des üblichen Gate-Anschlusses eine von allen Seiten isolierte Poly-Si-Hilfselektrode, die einen Ladungszustand speichern kann. Die Grundgedanken sind zum einen im FAMOST (Abkürzung für Floating-Gate avalanche injection-MOSFET) und zum anderen im SAMOST (Abkürzung für Stacked gate avalanche injection-MOSFET) umgesetzt [2].

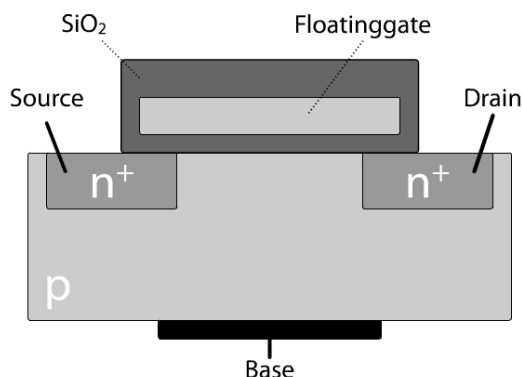


Abbildung 2: FAMOST (Floating-Gate avalanche injection-MOSFET)

Das FAMOST-Prinzip (Abbildung 2) benötigt kein zusätzliches Gate, wodurch es nur drei Anschlüsse gibt. Legt man eine hohe Spannung zwischen Source und Drain an, ist es möglich, einen Elektronendurchbruch zum Floating-Gate zu erreichen, sodass dieses Ladung aufnimmt. Auf diese Weise kann man nun ein Bit speichern. Entweder befüllt man das Floating-Gate mit Ladung, sodass sich ein leitender Kanal zwischen Source und Drain bildet, oder es bleibt ladungsfrei, sodass kein Kanal zwischen den beiden Anschlüssen besteht. Damit existieren zwei logische Zustände, die als ein Bit verstanden werden können. Um die Ladung des Floating-Gates abzuführen, ist aber eine energiereiche Strahlung, wie sie zum Beispiel UV-Licht besitzt, nötig. Das ist jedoch sehr aufwendig und benötigt verhältnismäßig viel Raum [2]. Dieses Problem löst das SAMOST-Prinzip (Abbildung 3).

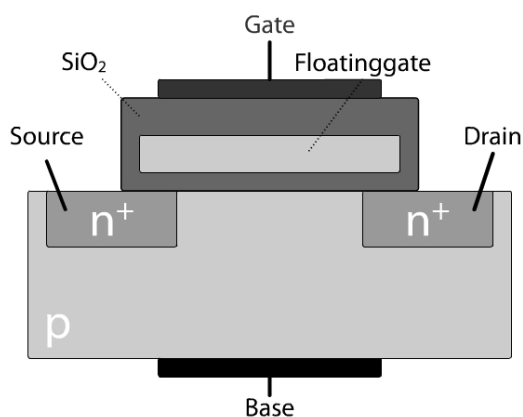


Abbildung 3: SAMOST (Stacked gate avalanche injection-MOSFET)

Dabei wird über dem schwebenden Floating-Gate noch ein zusätzliches Steuergate installiert. Durch hohe Spannungen zwischen Steuergate und dem Elektronenkanal kann man so zwischen beiden ebenfalls einen Elektronendurchbruch erzielen, sodass Ladung

abfließen kann. Dieses Entfernen des Elektronenkanals bedeutet, dass ein Bit gelöscht wird. Bauartbedingt ist der Elektroneninjektionseffekt beim Schreiben auf das Floating-Gate des SAMOST allerdings schwächer als beim FAMOST [2]. Die Vorteile beider Prinzipien werden im FLOTOX (Abkürzung für Floating-Gate-tunnel-oxide MOSFET) vereint, der über dem vollständig isolierten Floating-Gate eine dünne Isolierschicht besitzt, die es vom ebenfalls vollständig isolierten Steuergate trennt (Abbildung 4).

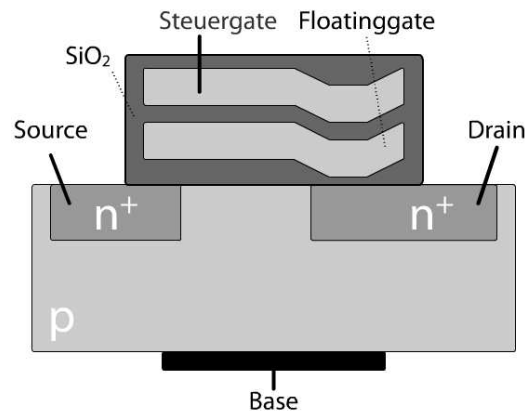


Abbildung 4: FLOTOX (Floating-Gate-tunnel-oxide MOSFET)

Das Floating-Gate wird mit Elektronen beladen, indem am Steuergate eine hohe positive Spannung (≥ 5 Volt) angelegt wird. Elektronen tunneln so durch die Isolationsschicht vom Drain in Richtung des Steuergates. Das Floating-Gate nimmt nun Elektronen auf und bildet einen Kanal zwischen Drain und Source, weshalb sich der Transistor in einem leitenden Zustand befindet. Möchte man die Ladung vom Floating-Gate entfernen, um den Elektronenkanal zu beseitigen, muss an den Drain eine hohe positive Spannung (≥ 20 Volt) gelegt werden, während das Steuergate auf Masse gelegt wird. Es bildet sich ein Tunnelstrom zwischen Floating-Gate und Drain. Die Elektronen fließen ab. Der Zustand des FLOTOX ist dann nicht leitend. Mit einer niedrigen Lesespannung kann die Leitfähigkeit leicht festgestellt werden. Diese ergibt dann den logischen Zustand. Die Bauform reduziert sich nochmals, wenn das Floating-Gate kleiner ausgeführt wird als das Steuergate und die Steuergates einer Gruppe von Zellen zusammenschaltet werden (Abbildung 5). Diese Form wird als Flash-EEROM-Zelle bezeichnet [2].

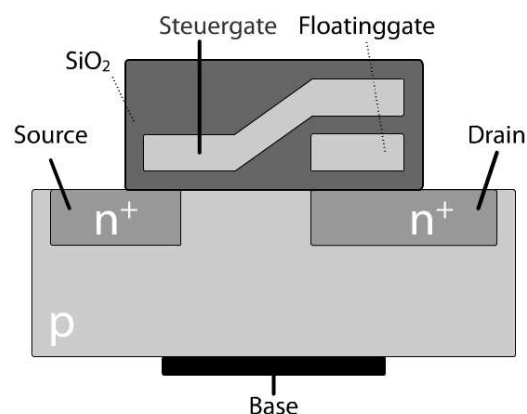


Abbildung 5: Flash-EEROM-Zelle

2.2 Flash-Chips

Um viele Speicherzellen zu Verbunden zu verknüpfen, werden in der Praxis zwei Varianten genutzt. Eine davon ist die NAND-Architektur. In dieser werden eine feste Anzahl von Speicherzellen in Reihe geschaltet. Diese Struktur kann effizient mit NAND-Gattern der CMOS-Logik realisiert werden. So werden Verbunde gebildet, die die jeweils kleinste Speichereinheit darstellen. Die zweite Methode ist die Strukturierung der Speicherzellen in der NOR-Architektur. Dabei werden die einzelnen Speicherzellen parallel geschaltet. In der CMOS-Logik kann das durch NOR-Gatter realisiert werden [3, Kapitel 10]. Die beiden Architekturen sind in ihren Anwendungsgebieten jedoch sehr unterschiedlich.

Durch die Parallelität der Zellen des NOR-Gatters wird bei der NOR-Architektur ein Zugriff auf jede einzelne Zelle erlaubt. Es wird also stets nur aus den Zellen gelesen, in denen die angeforderten Daten stehen. Daraus resultiert eine sehr hohe Lesegeschwindigkeit. Außerdem ist es nicht erforderlich, die angeforderten Daten aus dem Speicherverbund zu trennen. So ist es leicht möglich, Programmcode direkt von einem NOR-Speicher auszuführen. Die Schreib- und Löschgeschwindigkeit ist aber eher gering, da jede Zelle für sich bearbeitet werden muss. Bedingt durch die Bauart ist die Speicherdichte vergleichsweise niedrig, weshalb große Speicherkapazitäten mit hohen Kosten verbunden sind.

NAND-Speicher sind dann von Vorteil, wenn eine hohe Speicherdichte erreicht werden soll. Dadurch lassen sich große Speicher mit kleinem Volumen realisieren, was einen günstigeren Herstellungsprozess ermöglicht. Die Lesegeschwindigkeit ist gegenüber NOR-Speichern aber deutlich geringer, da man stets einen Datenverbund aus dem Speicher liest, aus welchem die angeforderten Daten getrennt werden müssen. Die Schreibgeschwindigkeit ist jedoch um ein Vielfaches höher, da eine größere Menge von Daten gleichzeitig in einen Verbund von Speicherzellen geschoben werden kann. Das Löschen von Daten ist ebenfalls in kürzerer Zeit möglich. Da jedoch nur ganze Verbunde gelöscht werden können, muss der Speichercontroller dafür sorgen, dass Teildaten, die nicht gelöscht werden sollen, erneut geschrieben werden [4]. Vom Löschprozess des NAND-Speichers stammt auch die Bezeichnung „Flash-Speicher“, da der Löschvorgang wie ein Blitz alle Speicherzellen zurücksetzt [2].

Die erhöhten Geschwindigkeiten wirken sich auch auf den Energiebedarf aus. Weil NAND-Speicher die angeforderten Schreib- und Löschoperationen schneller bearbeiten können, wird für diese Vorgänge weniger Energie benötigt. Durch die Eigenschaften und Vorteile der NAND-Architektur werden in Solid State Disks nur NAND-Speicherzellen verwendet, um Daten zu speichern [4].

Die NAND-Architektur lässt sich aber nochmals in zwei Systeme unterteilen. Zum einen gibt es den (SLC) Single-Level-Cell-Speicher. Der funktioniert so wie bereits beschrieben. Jede Speicherzelle kann nur ein einziges Bit speichern. Eine Weiterentwicklung ist der Multi-Level-Cell-Speicher (MLC). Dabei werden auf dem Floating-Gate

unterschiedlich hohe Pegel abgelegt. Beim Auslesen der Daten ermittelt man die Pegelhöhe, wodurch zwei und mehr Bits in einer einzigen Zelle gespeichert werden können. Das erhöht die Speicherdichte nochmals beträchtlich. So können bis zu 80 % mehr Daten auf derselben Fläche gespeichert werden. Dadurch reduzieren sich wiederum die Herstellungskosten. Oftmals verringert das jedoch die Geschwindigkeit, da ein Zugriff auf den Inhalt einer einzelnen Zelle nochmals erschwert wird, weil der ausgelesene Pegel zunächst in ein binäres Signal umgewandelt werden muss [3]. Dennoch existieren für beide Speichertypen Solid State Disks im Handel [5, 6, 7]. Um eine große Menge an Speicherzellen möglichst einfach anzusteuern, werden die Speicherverbunde als zweidimensionales Array angeordnet. Ein Samsung-Speicherbaustein beinhaltet dafür 4.096 Blöcke, wobei ein Block ein Array aus 64 Speicherpages ist. Die gestapelten Blöcke werden als Device bezeichnet. So ergibt sich für ein Device mit einer Pagegröße von 4 KByte eine Kapazität von $(64 \text{ Pages} \cdot (4096 \text{ Byte} + 128 \text{ Byte}) \cdot 4096 \text{ Blocks})$ circa einem Gigabyte. Je nach Speicher, Controller und zu erreichender Gesamtkapazität der SSD sind aber auch andere Parameter gebräuchlich. Die Adressierung erfolgt trotz Stapelung der Blöcke über zweidimensionale Koordinaten, die im Speicherchip aus der eingegebenen Speicheradresse dekodiert werden. Nachdem die Page ausgewählt wurde, kann diese ausgelesen oder beschrieben werden [8].

3. Solid State Disks

3.1 Controller und Schnittstelle

Um eine größere Menge von Blöcken von Speicherzellen zu verwalten, wird ein leistungsfähiger Controller benötigt. Gleichzeitig muss der Controller die Kommunikation mit dem Host steuern. Im Consumer- und Serverbereich nutzt man dafür die „Serial Advanced Technology Attachment II“-Schnittstelle (SATA II) in der Revision 2.6. Die bis vor wenigen Jahren übliche ATA133-Schnittstelle wird von fast keinem Hersteller mehr unterstützt, da sie nicht mehr zeitgemäß ist. Die SATA-II-Schnittstelle liefert einen größeren Steuerbefehlssatz mit Befehlen, die die ATA133-Schnittstelle aus Kompatibilitätsgründen nicht beinhaltet. Des Weiteren sieht ATA133 eine Kommunikation auf 40 Leitungen vor, was sehr breite Kabel erfordert. Auf diesen Leitungen bilden sich sehr komplexe Interferenzen, sodass die Fehleranfälligkeit recht hoch ist. Die SATA-II-Spezifikation sieht hingegen eine Verbindung mit nur zwei Datenleitungen vor, sodass die Kabel nicht nur deutlich schmaler sind, sondern die Kommunikation auch weniger störanfällig ist, da sich Interferenzen stets auf beide Leitungen auswirken. Gleichzeitig sind die Interferenzen zwischen beiden Leitungen minimal, da die Kommunikation mit einer Differenzspannung von nur 250 mV stattfindet. Hingegen sieht die ATA133-Schnittstelle bis zu 5 V Spannung auf den Datenleitungen vor. Weil die Differenzspannung in Leitungen der SATA-II-Schnittstelle sehr gering ist, lässt sie sich deutlich schneller schalten als die hohen Spannungen, die in ATA133-Kabeln anliegen müssen. Dies ist einer der Hauptgründe, warum die SATA-II-Schnittstelle deutlich höhere Transferraten ermöglicht [9]. Die Kommunikation mit dem Host ist damit kein Flaschenhals für die Daten. Deshalb kann sich die hohe Geschwindigkeit der Speicherzellen auch positiv auf die Leistung des Gesamtsystems auswirken.

Der gegenwärtig in vielen SSDs verbaute Speichercontroller JMF602 von JMicron lässt eine Lesegeschwindigkeit von bis zu 170 MB/s zu. Schreiben kann der Controller mit bis zu 135 MB/s [1]. Noch höhere Geschwindigkeiten erzielen die selbst entwickelten Controller von Intel. Der in Intels „X25“-Serie verbaute Controller erreicht bis zu 250 MB/s beim Lesen von Daten. Schreiben kann der Controller mit bis zu 170 MB/s [10]. Um die derart schnelle Kommunikation über so wenige Datenleitungen zu ermöglichen, ist auf beiden Seiten der Kommunikation ein Serializer und ein Deserializer vonnöten. Der Serializer wandelt die Daten um, sodass acht Bits seriell übertragen werden können. Im Deserializer wird der Vorgang umgekehrt, um ein paralleles Signal zu erhalten. Kleine Schwankungen in der Geschwindigkeit können durch einen Übertragungscache auf ein Minimum reduziert werden. Um zusätzlich das Taktsignal zu übertragen, werden noch zwei weitere Bits an die Daten angehängt und übertragen. Dies bedeutet für die Daten zwar einen

Overhead von 20 %, aber dafür werden keine weiteren Leitungen benötigt, um den Takt zwischen Host und Controller synchron zu halten [9].

Die Kommunikation mit den Flash-Chips findet beim JMF602-Controller mit bis zu acht, bei Intels Controller mit zehn internen Flash-Controllern statt. Diese ermitteln die Speicheradressen und sprechen die Speicherblöcke an, um Daten zu lesen oder zu schreiben. Außerdem überprüft der Flash-Controller die ausgelesenen Bits mit einem ECC-Algorithmus auf Fehler. Neben der Ansteuerung der Speicherseiten und der Kommunikation mit dem System ist der Controller aber auch für die Verwaltung des Speichers zuständig. Das beinhaltet unter anderem die Gruppierung von Speicherverbunden in Pages mit einer Größe zwischen 2 und 4 Kbyte [1, 10]. Wofür der Controller noch zuständig ist, wird bei der Erklärung der Lese-, Schreib-, Lösch- und Steueroperationen in den folgenden Abschnitten deutlich.

3.2 Operationen

3.2.1 Lesen

Um Daten zu lesen, muss der Flash-Controller zunächst den Ort der angefragten Daten ermitteln. Dazu wird aus der logischen Adresse die physikalische Adresse ermittelt und an den Flash-Chip gesendet. Dieser ermittelt die X- und die Y-Koordinate der gesuchten Pages [8]. Nun werden so viele Speicherverbunde ausgelesen, bis die komplette Page aus den Speicherzellen geholt und in ein Pufferregister des Flash-Chips geladen wurde. Dieser Puffer ist nötig, um Latenzzeiten innerhalb der Flash-Chips zu verbergen. Aus diesem Puffer wird dann jedes Byte einzeln zum Flash-Controller gesendet, wo die Daten nochmals gepuffert werden. Die Zeit für die Übertragung eines Bytes in diesen Speicher wird als Read Cycle Time bezeichnet und beträgt im Samsung-Controller 25 ns. Dadurch ergibt sich die maximale Transferrate zwischen Flash-Chips und dem Flash-Controller. Mit etwa 38 MB/s ist diese zwar relativ gering, aber durch die Verwendung von mehreren Flash-Controllern, die je nach Hersteller bis zu zwei Flash-Chips verwalten, addieren sich die Geschwindigkeiten bis zu einem gewissen Maß, sodass Vielfache dieses Wertes erreicht werden [7]. Nach der Übertragung der Daten aus dem Flash-Controller in einen globalen Puffer werden die Daten über die SATA-II-Schnittstelle umgewandelt und versendet. Der JMF602 ermöglicht neben der Übertragung über die SATA-II-Schnittstelle auch die Kommunikation per USB 2.0. Dadurch sind platzsparende Allround-Lösungen möglich, wie sie zum Beispiel bei externen Festplattengehäusen erforderlich sind [1].

3.2.2 Schreiben

Wenn Daten geschrieben werden sollen, werden sie über die SATA-II-Schnittstelle an den Controller geschickt. Dieser empfängt die Daten und legt sie in einen DRAM-Puffer ab,

falls einer vorhanden ist. Dieser Puffer ermöglicht dem Controller, die Daten zu sortieren, um die Daten effizienter zu schreiben. Diese Technik ist unter der Bezeichnung Native Command Queuing (NCQ) in der SATA-II-Spezifikation 2.5 definiert worden. Das NCQ wurde entwickelt, um die Bewegung des Lese-/Schreibkopfes in herkömmlichen Festplatten zu reduzieren. Im Kern bedeutet dies, dass der Controller in der Festplatte Kommandos in eine Warteschlange ablegt, sodass die Wege, die der Kopf zurücklegen muss, möglichst gering sind. Diese Warteschlange wird abgearbeitet, weshalb die durchschnittlich benötigte Zeit, ein Kommando auszuführen, geringer ist. Für Befehle, die eine höhere Priorität haben, kann die Warteschlange auch umgangen werden, indem die Kommandos über ein Flag markiert werden. Des Weiteren ermöglicht NCQ, den Status für die Abarbeitung der Warteschlange abzurufen [11]. So kann das System erfahren, ob die gesendeten Daten schon geschrieben wurden. Die Nutzung von NCQ kommt, obwohl es nicht dafür entwickelt wurde, auch den Solid State Disks zugute. So kann zum Beispiel verhindert werden, dass Daten umkopiert werden, wenn diese nur wenige Befehle später gelöscht werden sollen. Das erhöht die Lösch- und Schreibgeschwindigkeit nochmals. Bislang verbauen jedoch nur wenige Hersteller einen Befehlspeicher in den SSDs für den Consumer-Bereich. In den deutlich teureren Server-SSDs ist dieser Puffer jedoch im Allgemeinen enthalten [7]. Die NCQ-Funktion hingegen wird im Consumer-Bereich lediglich von Intel angeboten [10]. Für die Abarbeitung eines Schreibbefehls ermittelt ein Flash-Controller eine leere Page. Sollen mehrere Pages hintereinander gespeichert werden, wie zum Beispiel bei einer größeren Datei, werden immer neue Pages reserviert. Nach der Ermittlung einer freien Page eines Blocks werden die Daten in die Speicherzellen geschrieben [7].

Hier zeigt sich ein Problem an der Einteilung des Speichers in Speicherpages. Wenn die zu speichernden Daten kleiner als eine Page sind, geht der überschüssige Speicher verloren. Das Phänomen wird als interne Fragmentierung bezeichnet und betrifft SSDs und herkömmliche Festplatten gleichermaßen. Da zu speichernde Daten in der Regel jedoch größer als eine Page sind, relativiert sich die verloren gegangene Speichermenge, da der überwiegende Teil der Pages vollständig beschrieben wird und lediglich die letzte Page einer Datei ungenutzte Speicherbereiche belegt [12, Kapitel 4].

3.2.3 Löschen

Das Löschen von Daten ist die aufwendigste Operation für eine SSD. Der Controller legt dafür einen sogenannten Erase-Block an, der an die Stelle geschrieben wird, an der sich die zu löschenden Daten befinden. Ein Erase-Block ist, je nach Hersteller und verbauten Flash-Chips, an der Größe eines Blocks orientiert. Bei dem bereits erwähnten Samsung Flash-Chip wäre ein Erase-Block demnach 64 Pages groß. Solange der Benutzer große Dateien löschen möchte, für die ganze Blöcke zurückgesetzt werden müssen, ist dies nicht sehr kompliziert. Aufwendig wird es aber für den Controller, wenn sich in dem Block noch Pages befinden, die nicht gelöscht werden sollen. In diesem Fall muss der Controller alle Pages, die nicht gelöscht werden sollen, lesen und in einem Puffer speichern. Erst dann wird

das Löschen durch Schreiben des Erase-Blocks durchgeführt. Ist das abgeschlossen, werden die Pages aus dem Puffer wieder geschrieben. Dieser Vorgang ist jedoch nur die Beschreibung des technischen Vorgangs. In der Praxis ist das Löschen viel komplizierter, da nicht jeder Löschbefehl auch auf der SSD ausgeführt werden muss. Stattdessen ändert das Betriebssystem nur den Kopf der Datei und gibt den Speicherbereich frei. Das physikalische Löschen wird aber erst dann ausgeführt, wenn der Speicher neu beschrieben werden soll. Das hat zur Folge, dass ein Speichervorgang für eine einzige Page unter Umständen genau soviel Zeit beanspruchen kann wie das Speichern von mehreren Blöcken, wenn vor dem Speichern der einzelnen Page große Speichermengen durch das Löschen umgeschichtet werden müssen. Das hätte große Geschwindigkeitseinbußen zur Folge [8, 7]. Um diesem Problem entgegenzuwirken und die kleinste Datenmenge, die in einen Block geschrieben wird, zu maximieren, verbaut der Hersteller Intel in seiner SSD für den Consumer-Bereich einen DRAM-Puffer, in welchem zu schreibende Daten zunächst abgelegt werden können, bis genug Pages vorliegen, damit es sich lohnt, einen Schreibprozess zu initiieren. So kann der Controller zum Beispiel auf 64 Pages von Daten warten, bevor er einen Block physikalisch löscht und diesen dann komplett mit neuen Pages füllt. Werden diese Pages nicht gepuffert, wird für jede ankommende Page ein Löschvorgang für alte Daten durchgeführt und dann ein Schreibvorgang mit der neuen Page ausgeführt [6, 11]. Das verlangsamt nicht nur einen durch das System initiierten Schreibbefehl, sondern lässt die Speicherzellen durch das häufige Wiederbeschreiben auch unnötig altern. Damit das Laufwerk nicht erst bei der Ausführung eines neuen Schreibvorgangs alte Daten entfernt, gibt es derzeit Bestrebungen, in einer neuen SATA-Spezifikation einen Befehl mit dem Namen „Trim“ zu implementieren, mit dem das Betriebssystem dem Laufwerk mitteilen kann, welche Pages gelöscht werden können [7]. Das könnte nicht nur die Lebenserwartung der SSD erhöhen, sondern auch die Geschwindigkeit.

4. Leistungsparameter

4.1 Geschwindigkeit

Derzeitige SSDs werden des Öfteren mit höheren Geschwindigkeiten gegenüber herkömmlichen Festplatten beworben. In der Praxis macht sich das jedoch nur bei wenigen Modellen bemerkbar. Interessant ist die Streuung der Werte der aktuellen Modelle. Diese ist so groß, dass man nicht von einem allgemeinen Geschwindigkeitszuwachs bei den modernen Massenspeichern sprechen kann. Keine aktuell verfügbare SSD ist in allen Bereichen besser als eine herkömmliche Festplatte. Aus diesem Grund muss man verschiedene Testszenarien unabhängig voneinander betrachten. Die sequenzielle Schreibgeschwindigkeit beim Schreiben von 64 KByte großen Blöcken unterscheidet sich gegenüber 128-KByte-Blöcken teilweise sehr, wie aus Abbildung 6 ersichtlich wird. Vor allem der Controller und die installierte Firmware sind für Geschwindigkeitsdifferenzen bei unterschiedlicher Blockgröße verantwortlich [7]. Während Samsungs Modell und Intels Mainstream Modell „X25-M“ 64-KByte-Blöcke schneller schreiben als große 128-KByte-Blöcke, fahren SSDs anderer Hersteller erst bei großen Datenmengen zu Höchstleistungen auf. So erreicht ein Modell von OCZ mit 99,3 MByte/s bei 128-KByte-Blöcken die derzeit höchste Schreibgeschwindigkeit. Bei kleineren Blöcken sinkt diese jedoch auf fast ein Drittel ab. Die Lesegeschwindigkeit erhöht sich hingegen bei allen SSDs, wenn man große Datenmengen sequenziell ausliest (Abbildung 7). Besonders sticht Intels X25-M hervor. Mit 225 MB/s bei kleinen Blöcken und 235 MB/s bei großen Blöcken ist diese SSD schneller als alle bisherigen SSDs und Festplatten des Consumer-Bereichs. Selbst bei zufällig verteilten Schreib- und Lesezugriffen ist dieses Modell deutlich schneller als alle anderen SSDs und Festplatten. So werden immerhin noch 33,3 MB/s Schreibgeschwindigkeit bei 128-Kbyte-Blöcken erreicht. Das Modell des Herstellers OCZ bricht dabei hingegen auf 0,49 Mbyte/s ein.

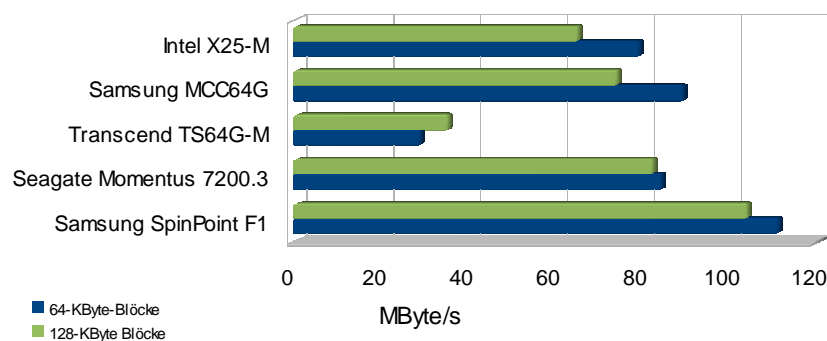


Abbildung 6: sequenzielle Schreibgeschwindigkeit, Datenherkunft: [7]

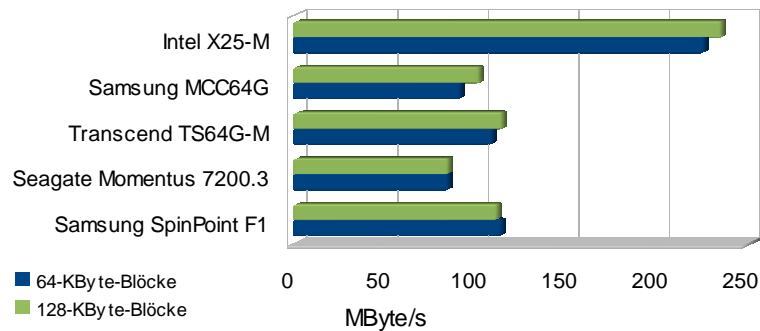


Abbildung 7: sequenzielle Lesegeschwindigkeit, Datenherkunft: [7]

Bei der durchschnittlichen Zugriffszeit wirkt sich das Fehlen der Mechanik erneut zugunsten der SSDs aus. Dadurch, dass sich kein träger Lesekopf über Platten schiebt, sind die Zugriffszeiten der meisten SSDs sehr gering. Lediglich Modelle von Supertalent und OCZ fallen mit bis zu 124 ms Zugriffszeit aus der Reihe, woran die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Firmware erkennbar ist. Andere Hersteller, die ebenfalls den JMF602-Controller verwenden, haben keine derart hohen Zugriffszeiten. Intels Mainstream-Modell fällt hingegen mit einer Zugriffszeit von weniger als 0,1 ms erneut positiv auf [7].

Die Werte für die Geschwindigkeit spiegeln sich auch in den Werten für die Input-Output-Vorgänge wider, die in einer Sekunde durchgeführt werden können (Abbildung 8). Dieser Wert kann als die Leistung aufgefasst werden, die das Medium bei Anwendungen bietet, bei denen die Festplatte sehr häufig angesprochen wird, wie es zum Beispiel bei Workstation-Anwendungen der Fall ist. Samsungs Modell ist mit 443 IOs/s zwar schon mehr als 4 mal so schnell wie herkömmliche 2,5-Zoll-Festplatten, aber Intels X25-M ist mit 1.646 IOs/s derzeit für die Modelle aller Hersteller unerreichbar [6]. Schneller ist lediglich Intels SSD „X25-E“, die mit Single-Cell-Memory arbeitet. Diese erreicht allein beim Schreiben von 4 KByte großen Blöcken schon 3.300 IOs/s. Beim Lesen von ebenso großen Blöcken ist die Anzahl mehr als zehnmals so groß [10].

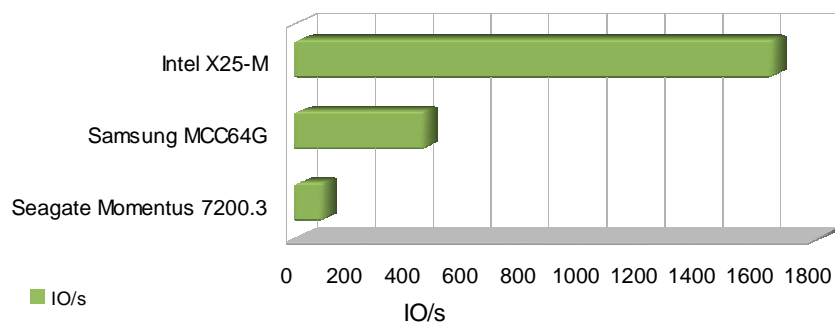


Abbildung 8: IO-Operationen pro Sekunde, Datenherkunft [6]

4.2 Verschleiß

In einer SSD befinden sich keine beweglichen Komponenten, die sich aufgrund ihrer Laufzeit abnutzen können. Dafür nutzen sich die Speicherzellen selbst ab. Genau genommen nutzt sich lediglich die Siliziumoxid-Isolierung zwischen dem Elektronenkanal und den beiden Gates ab. Das geschieht mit jedem Schreib- und jedem Löschvorgang, den eine Zelle ausführt. Bei jedem Schreibzyklus wird durch eine hohe Spannung eine Injektion von heißen Elektronen durchgeführt. Beim Löschen der Ladung wird durch eine noch höhere Spannung ein Fowler-Nordheim-Tunnelstrom erzeugt. Dieser schlägt Löcher in das Oxid, wodurch der Speichereffekt nach einer gewissen Anzahl an Zyklen immer geringer wird [2]. Im schlechtesten Fall fließen die Elektronen sofort nach dem Beladen des Floating-Gates über das Steuergate ab. Die Zelle hat dann ihren Zweck verloren. Die Hersteller gehen bei NAND-Flashspeicher in SLC Bauweise von 100.000 Zyklen aus, die eine Zelle mindestens übersteht, ohne ihre Ladung zu verlieren. Da bei MLC-Flashspeichern die auf dem Floating-Gate gespeicherte Ladungsmenge berücksichtigt werden muss, ist beim Auslesen der Daten eine höhere Präzision erforderlich. Bei zu großen Abweichungen kann der Pegel nicht mehr eindeutig ermittelt werden. Dann muss die Zelle ersetzt werden, da sie Daten nicht mehr zuverlässig speichern kann [3, Kapitel 10]. Deshalb ist die Lebenserwartung von MLC-Speichern geringer als die von SLC-Speichern [7].

Um den Ausfall von Zellen für den Benutzer unsichtbar erscheinen zu lassen, gibt es zwei Ansätze. Zum einen versucht man, den Ausfall einer Zelle so lange wie möglich hinauszuzögern. Zum anderen entwickelt man Strategien, wie die ausgefallene Zelle durch eine andere ersetzt werden kann. Damit eine Zelle möglichst lange funktioniert, muss sie möglichst wenig Lösch-Zyklen ausführen. Betrachtet man die Gesamtheit von Zellen, so erreicht man dies, wenn alle Zellen gleichmäßig beansprucht werden. Außerdem sollten Zyklen so selten wie möglich durchgeführt werden müssen. Also ist es, wie schon im Abschnitt 3.2.3 beschrieben, von Vorteil, wenn Daten zunächst in einen Puffer geschrieben werden, damit nicht für jede zu schreibende Page ein Lösch- und ein Schreibprozess ausgeführt wird. Der Controller kann so auf eine Menge von Daten warten. Wenn genug Pages vorliegen um einen Block zu füllen, kann er mit nur einem Lösch- und einem Schreibprozess den ganzen Block füllen. Der als Write Amplification bezeichnete Quotient aus Blockgröße und der Datenmenge eines Schreibprozesses muss im Durchschnitt einen möglichst kleinen Wert annehmen. Das bedeutet, dass der Controller nur dann eine Flash-Zelle abnutzt, wenn viele Zellen desselben Blocks neue Daten speichern sollen [6].

Ein weiteres Problem ist, dass der Benutzer Daten speichert, die über einen langen Zeitraum gespeichert werden, während er auch Daten speichert, die nur kurze Zeit relevant sind. Um die Zellen trotzdem gleichmäßig zu nutzen, werden Wear-Leveling-Algorithmen eingesetzt [10]. Die Aufgabe des Controllers dabei lässt sich an einem Beispiel erklären. Angenommen, der Benutzer archiviert nach der Installation eines Betriebssystems seine persönlichen Dokumente und Bilder. Diese Daten werden als statische Daten bezeichnet. Sie

werden auf die SSD geschrieben und weder gelöscht noch neu geschrieben. Im Gegensatz dazu werden während der Nutzung des Internets jedoch sehr viele Dateien als Cookies auf der Festplatte abgelegt und nach kurzer Zeit wieder gelöscht. Die Aufgabe eines Wear-Leveling-Algorithmus ist es nun, die Beanspruchung der Speicherzellen durch die temporären Daten auch auf die Zellen zu übertragen, die bisher wenige Zyklen ausgeführt haben. Beim genannten Beispiel müsste das Wear-Leveling also für eine Umschichtung sorgen, sodass die Zellen, die bisher wenig Abnutzung erfahren haben, nun intensiver genutzt werden, während die lädierten Zellen vorerst seltener neu beschrieben werden. Es gibt zwei Arten von Wear-Leveling-Algorithmen. Einer der beiden Typen ist das dynamische Wear-Leveling. Bei diesem werden statische Daten im Speicher nicht verschoben. Sollen neue Daten gespeichert werden, sorgt das dynamische Wear-Leveling aber dafür, dass diese Daten in die am wenigsten abgenutzten Zellen abgelegt werden. Dies erhöht die Lebenserwartung des Laufwerks beträchtlich. Trotzdem sind die Bereiche, in denen statische Daten liegen, weit weniger abgenutzt als Bereiche, in denen häufig Daten geschrieben und gelöscht werden. Um alle vorhandenen Speicherzellen gleichmäßig abzunutzen, wird das statische Wear-Leveling verwendet. Bei diesem werden auch statische Daten neu verteilt. Auf diese Weise werden – ausgelöst durch bestimmte Parameter – Daten aus Speicherzellen, die erst wenige Zyklen aushalten mussten, in Speicherbereiche geschrieben, die gegenüber diesen Zellen viele Zyklen durchgemacht haben. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die verschobenen statischen Daten auch weiterhin statisch bleiben und nur gelesen werden. Die Zellen werden im Idealfall entlastet, bis alle anderen Zellen ungefähr gleich viele Zyklen durchgemacht haben. Auf diese Weise würden die ersten Zellen erst dann ausfallen, wenn alle Zellen ihre Lebenserwartung erreicht haben. Der Host bekommt von alledem nichts mit, da dieser mit logischen Speicheradressen arbeitet und erst die Flash-Controller diese in physikalische Adressen umwandeln. Es ändert sich lediglich die Zuordnung [5]. Da die Effizienz des Wear-Levelings für die Lebenszeit und die Geschwindigkeit der SSD entscheidend ist, sind die Algorithmen streng geheim und nicht für die Öffentlichkeit zugänglich, sodass es schwer möglich ist, die Qualität der Algorithmen unterschiedlicher Hersteller zu vergleichen [7].

Trotz Wear-Levelings fallen einzelne Zellen aus. Dies kann geschehen, wenn die Maximalanzahl der Zyklen einer Zelle erreicht und die Isolationsschicht zerstört ist oder wenn Herstellungstoleranzen die Lebenserwartung einer Zelle reduziert haben. Um diesem Problem entgegenzuwirken, besitzen die SSDs der meisten Hersteller einen zusätzlichen Reservebereich, dessen Größe zwar nur einem Bruchteil der verfügbaren Kapazität der SSD entspricht, aber die Ausfallsicherheit nochmals stark erhöht. Fällt mindestens eine Zelle eines Blocks aus, so wird dieser Block durch einen Speicherblock des Reservebereichs ersetzt. Wie beim Wear-Leveling ändert sich lediglich die Zuordnung der logischen zu den physikalischen Speicheradressen. Mit dem ATA-Befehl „SetMaxAdress“ lässt sich die Größe des verfügbaren Speichers für den Benutzer einstellen, wodurch sich der Reservebereich zusätzlich, auf Kosten der effektiv nutzbaren Speichermenge, erweitern lässt [7]. Dadurch kann die Datenintegrität nochmals gesteigert werden. So gibt Intel für die SSD „X25-M“, in

der MLC-Flashspeicher verbaut sind, eine durchschnittliche Lebensdauer von 1,2 Millionen Stunden an, bevor erste Fehler für den Benutzer sichtbar werden. Eine X25-E von Intel soll sogar 2 Millionen Stunden ohne Fehler arbeiten können [10, 13]. Damit stehen die SSDs den HDDs, was die Lebenserwartung bei durchschnittlicher Nutzung betrifft, in nichts nach [14]. Trotzdem ist ein direkter Vergleich der durchschnittlichen Betriebsdauer nur schwer möglich, da die Faktoren die zum Ausfall des Gerätes führen unterschiedlich sind.

4.3 Leistungsaufnahme

Die mechanischen Teile in einer HDD zu bewegen, kostet den Großteil des Gesamtbedarfs an Energie. Zum einen müssen die Platten mit einer konstant hohen Geschwindigkeit gedreht werden, und zum anderen muss der Schreib-/Lesekopf über die Platten gefahren werden. Der Energieverbrauch dieser Vorgänge lässt sich nur schwer reduzieren, da sie an die Grundgesetze der Bewegung gebunden sind. Um den Verbrauch zu reduzieren, kann man die HDD in einen Schlafmodus versetzen, bei dem die Mechanik zum Stillstand gebracht wird. Damit verbraucht sie zwar kaum noch Energie, jedoch dauert es bis zum Zugriff auf Daten durch die lange Zeit zum Reaktivieren aus dem Schlafmodus mitunter mehrere Sekunden [14]. Außerdem ist der Energieverbrauch während des Anlaufens der Platten um ein Vielfaches höher als im normalen Betrieb. Deshalb rentiert sich das Versetzen der HDD in den Schlafmodus erst ab einer vergleichsweise langen Zeit. Erneut sind SSDs den HDDs überlegen.

Durch die fehlende Mechanik ist der Stromverbrauch einer SSD definiert durch den Stromverbrauch des Controllers und den Operationen auf den Speicherzellen. Da die Herstellerangaben zum Stromverbrauch ihrer SSD oftmals nicht mit den Ergebnissen in der Praxis übereinstimmen, ist es ratsam, Testergebnisse zu vergleichen. Eine handelsübliche HDD mit dem Formfaktor 2,5 Zoll, deren Platten mit 7.200 Umdrehungen pro Minute rotieren, verbraucht im Durchschnitt etwa 3 Watt. Sieht man diesen Wert als Referenz an, verbrauchen nahezu alle aktuellen Modelle von SSDs weniger Energie. Das Topmodell von Samsung ist mit 0,86 Watt genauso wie Intels Mainstream Modell mit 1,65 Watt deutlich unter dem Referenzwert von herkömmlichen Festplatten (Abbildung 9). Diese Werte beziehen sich jedoch nicht auf den Datendurchsatz [6]. Betrachtet man das Verhältnis von Operationen pro Sekunde zur Leistung, hängen die SSDs alle Festplatten ab.

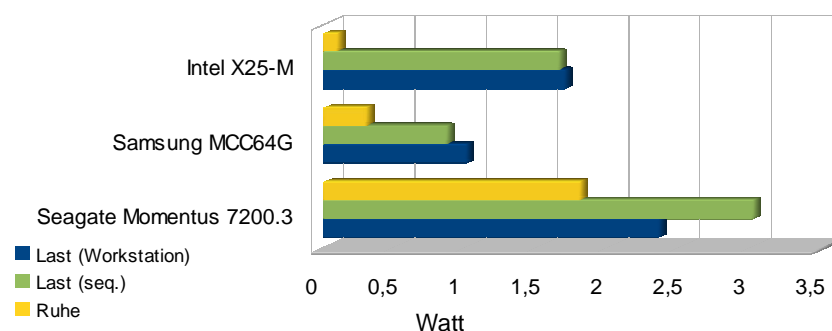


Abbildung 9: Energiebedarf in Watt, Datenherkunft: [7]

Da in der Praxis jedoch selten durchgehend auf Daten der Geräte zugegriffen wird, sind die Stromsparfunktionen ebenfalls von großer Relevanz. Das Modell von Samsung verbraucht in Ruhe nur 0,3 Watt, während Modelle anderer Hersteller dabei bis zu 1,2 Watt verbrauchen. Das Modell von Intel liegt mit 0,6 Watt Verbrauch lediglich im Mittelfeld. Mit Verwendung eines aktuellen Intel-Chipsatzes auf dem Mainboard des Hosts lässt sich der Strombedarf im Ruhezustand auf 0,1 Watt senken. Dafür wird der in der SATA-Spezifikation festgelegte Modus für das „Device Initiated Power Management“ aktiviert. So versetzt der Controller der SSD die Flash-Controller und die SATA-Schnittstelle selbst in einen Ruhezustand, der als „Slumber Mode“ bezeichnet wird. Wenn der Controller auf Anforderung von Daten die Schnittstelle und die Flash-Controller wieder anschaltet, kostet das nur wenige Mikrosekunden Zeit. Im Gegensatz zu HDDs erfordert das Reaktivieren keinen Mehrbedarf an Energie. Aus diesem Grund versetzt sich Intels SSD nach sehr kurzer Zeit selbstständig in den Schlafmodus [7].

4.4 Zusammenfassung unter Betrachtung von HDDs

Um die Entwicklung der SSDs zu beurteilen, muss man sie in allen Teilaspekten mit HDDs vergleichen. Eine SSD definiert sich durch ihren Namen als Massenspeicher, der ohne bewegliche Teile auskommt. Moderne HDDs sind häufig mit aufwendigen Lagern für die Aufhängung der Platten und die Aufhängung des Schreib-/Lesekopfes ausgestattet. Diese sollen die Reibung der mechanischen Teile reduzieren und die Vibration der rotierenden Platten vermindern. Einige Hersteller verwenden außerdem patentierte Technologien, um die Geräuschentwicklung ihrer HDDs zu senken. So verwenden Samsung-HDDs zum Beispiel die „SilentSeek“-Technologie. Dabei wird der Schreib-/Lesekopf der HDD in einer sinusförmigen Bewegung über die Platten gefahren. Zum einen reduziert sich dadurch der zurückgelegte Weg des Kopfes, zum anderen wird der Kopf nicht ruckartig gestoppt. Dadurch senkt Samsung den Schalldruck vieler Modelle um bis zu 4 dB. Um Vibrationen zu mindern, werden häufig auch besondere Werkstoffe genutzt [15]. Trotz eines hohen Aufwandes ist es aber nicht möglich, die Geräuschemission vollständig zu unterbinden. In diesem Bereich punktet die SSD.

Weniger offensichtlich ist der Geschwindigkeitsvergleich von HDDs und SSDs. Wählt man als Vergleichsgerät eine Festplatte mit dem Formfaktor 2,5 Zoll, sind die sequenziellen Leseraten geringer als die aller aktueller SSDs. Eine 3,5-Zoll-Festplatte hingegen erreicht gegenüber vielen SSDs höhere Leseraten. Gegenüber Intels X25-M sind jedoch auch die schnellsten 3,5-Zoll-Festplatten langsam [7, 6]. Bei sequenziellen Schreibvorgängen von kleinen Datenblöcken ist die Geschwindigkeit der Festplatten gegenüber den meisten SSDs überlegen. Zwar können die SSDs bei großen Datenpaketen etwas aufholen, aber selbst die schnellste SSD ist beim sequenziellen Schreiben etwas langsamer als durchschnittliche 3,5-Zoll-Festplatten. Den größten Geschwindigkeitseinbruch erlebt man bei zufällig verteilten Schreibvorgängen, wie auf Abbildung 10 ersichtlich wird. Das bedeutet, dass in kurzen Abständen kleine Datenmengen an unterschiedliche Speicheradressen geschrieben

werden. Aktuelle Festplatten erreichen zwischen 11 MB/s im Formfaktor 2,5 Zoll und 26 MB/s im Formfaktor 3,5 Zoll. Auch hier werden die meisten SSDs deutlich abgehängt. Lediglich Intels X25-M schreibt mit 33 MB/s schneller als das schnellste Festplattenmodell des Consumer-Marktes. Möchte man kleine Datenmengen von unterschiedlichen Orten lesen, trumpfen die SSDs auf. Hier hängen die SSDs die schnellen HDDs mit 6- bis 11-facher Geschwindigkeit ab. Erneut dominiert Intel mit einer Lesegeschwindigkeit von 173 MB/s.

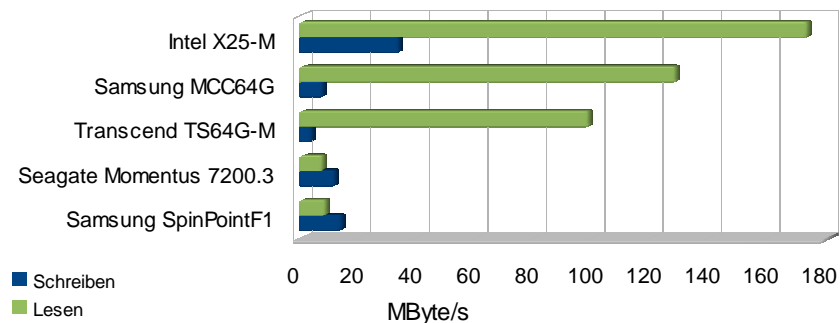


Abbildung 10: Geschwindigkeit bei zufällig verteilten Zugriffen, Datenherkunft: [7]

Die Zugriffszeit, die es kostet, um auf Daten aus dem Speicher zuzugreifen, ist – bedingt durch die Trägheit des Lese-/Schreibkopfes der HDDs – bei fast allen SSDs kürzer. Auf Daten, die das Mittelklassemodell von Intel speichert, kann man gegenüber den Topmodellen aktueller Consumer-Festplatten, in weniger als einem Fünfzigstel der Zeit zugreifen. Damit bildet Intels X25-M auch bezüglich der Zugriffszeit die Spitze [7].

Gegenüber Festplatten im 3,5-Zoll-Gehäuse benötigen alle aktuellen SSDs weniger Energie. Die handelsüblichen 2,5-Zoll-Festplatten sind beim Energieverbrauch zwar deutlich genügsamer als die Modelle im 3,5-Zoll-Formfaktor, aber die meisten SSDs sind dennoch etwas sparsamer. Größer ist der Unterschied, wenn man die Energiemenge vergleicht, die die Geräte im Ruhezustand verbrauchen. Einige SSDs nehmen in Ruhe weniger als 20 % der Energie auf, die sie unter Last benötigen. Bei HDDs sind derart verminderte Leistungsaufnahmen nicht möglich [7]. Das hängt damit zusammen, dass die Platten der HDDs auch im Ruhezustand mit hoher Drehzahl rotieren müssen. Andernfalls würde die Zugriffszeit deutlich länger sein [14]. Intels Modell erreicht im Ruhemodus einen Verbrauch von nur 0,1 Watt. Eine herkömmliche 2,5-Zoll-Festplatte benötigt immerhin noch 1,8 Watt. Unter Last verbrauchen einige SSDs hingegen sogar mehr Energie als eine Festplatte. So nimmt zum Beispiel ein Modell von Supertalent mit 3 Watt deutlich mehr Leistung auf als eine sparsame 2,5-Zoll-Festplatte von Seagate, die nur 2,3 Watt benötigt. Am sparsamsten beim Schreiben ist ein Modell von Samsung. Mit nur 0,8 Watt Leistungsaufnahme wird beträchtlich weniger Energie verbraucht als bei den Festplatten. Intels Modell bewegt sich hier nur im Mittelfeld mit einer Leistungsaufnahme von 1,7 Watt [7]. Da eine SSD jedoch für die meisten Operationen weniger Zeit benötigt, hat sie Instruktionen auch schneller ausgeführt. Folglich können die SSDs auch früher in den Ruhezustand gehen. Ein Vergleich lässt sich also nur ziehen, wenn ein Verhältnis von Leistung und Anzahl an Input-Output-Operationen betrachtet wird (Abbildung 11). Samsungs Modell erreicht bei sequenziellen

Leseoperationen mit fast 800 Operationen pro Watt zwar fast das Vierfache gegenüber dem Referenzwert einer handelsüblichen 2,5-Zoll-HDD, aber viel beachtlicher ist der Durchsatz, den Intels Mainstream Modell erreicht. Mit über 5.600 Leseoperationen pro Watt Leistung ist diese SSD mehr als 28-mal effizienter als eine handelsübliche HDD. Bei zufälligen Zugriffen, wie sie häufig bei Workstation-Anwendungen auftreten, liegt Intels Modell mit dem 24-Fachen an Operationen pro Watt noch immer deutlich vor den Festplatten [6].

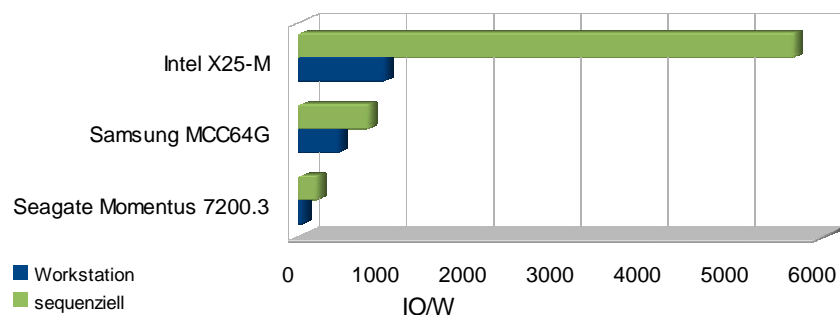


Abbildung 11: IO-Operationen je Watt, Datenherkunft: [6]

Anwendungsbereiche, für die Festplatten zu fehleranfällig sind, profitieren auch von der Entwicklung der SSDs. So sind SSDs für einen größeren Temperaturbereich ausgelegt als herkömmliche HDDs [13, 14]. Außerdem reagieren SSDs weit weniger empfindlich auf Stöße. Viele Festplatten sind im Betrieb nur für Stöße mit dem 70-Fachen der Erdbeschleunigung in einer Zeit von 2 ms ausgelegt [16]. Bei stärkerer Belastung droht ein Head-Crash. Das bedeutet, dass die Metallplatten durch einen Aufprall des Schreib-/Lesekopfes auf die Platten mechanisch beschädigt werden. In der Regel ist dies mit einem Datenverlust gekoppelt [17]. SSDs sind gegen derartige Belastungen deutlich unempfindlicher. So spielt es für Intels X25-Baureihe keine Rolle, ob das Gerät im laufenden Betrieb oder ausgeschaltet starken Stößen ausgesetzt ist. Intel gibt diese SSDs für Stöße mit einer Beschleunigung von 1.000 G in nur 0,5 ms frei [10, 13].

Die Speicherdichte von Festplatten ist mittlerweile sehr groß, weshalb HDDs gegenwärtig eine deutlich höhere Kapazität bieten können, als SSDs. Die höchste Kapazität derzeit verfügbarer Festplatten beträgt 500 GByte bei 2,5-Zoll-Festplatten und 1.500 GByte bei 3,5-Zoll-Festplatten. SSDs mit SLC-Speicher haben derzeit eine maximale Kapazität von 64 GByte. Bei der Verwendung von MLC-Speicher, kann derzeit eine Kapazität von 256 GByte erreicht werden [18].

Preislich bewegen sich HDDs und SSDs auch in unterschiedlichen Dimensionen, wie aus Abbildung 12 hervorgeht. Während ein GByte einer 2,5-Zoll-Festplatte bereits für 0,18 Euro zu haben ist, kostet ein GByte einer sehr günstigen SSD mindestens 1,95 Euro. Ein GByte einer X25-M von Intel kostet mit mehr als 8,11 Euro bereits mehr als 45 mal soviel wie ein GByte einer 2,5-Zoll-Festplatte. Ein GByte der noch schnelleren X25-E von Intel ist mit 21,84 Euro nochmals deutlich teurer [19].

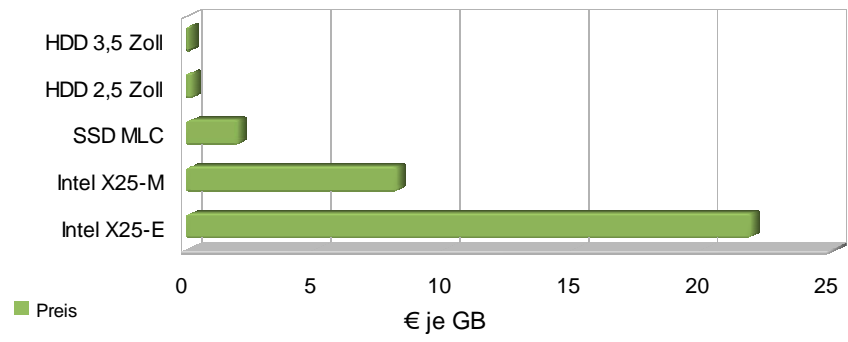


Abbildung 12: Mindestpreise pro Gigabyte, Datenherkunft: [19]

5. Fazit

Damit Computer die Vorzüge der SSDs aber noch effizienter nutzen können, um die Lebensdauer zu verlängern und die Geschwindigkeit zu erhöhen, müssen SSDs jedoch noch besser in die Betriebssysteme und in Software integriert werden. So ist es zum Beispiel nötig, dass das Hostsystem der SSD frühzeitig miteilet, welche Daten gelöscht werden können, damit es nicht erst bei einem Schreibvorgang zu aufwendigen Umschichtungen von Daten kommt [7]. Die Erstellung von Warteschlangen für das Native Command Queuing ist zwar keine Neuentwicklung, jedoch gibt es Entwicklungspotential für die Optimierung des NCQ für SSDs [11].

Zwar hat sich die Datendichte von Festplatten zwischen 1991 und 2006 um den Faktor 5.700 erhöht, aber die Geschwindigkeit hat sich in demselben Zeitraum lediglich um das 100-Fache gesteigert. Die Kapazität ist gegenüber der Leistung der Festplatten deutlich schneller gewachsen. Die Entwicklung der Solid State Disks ist, was den Festplattenmarkt betrifft, die größte Innovation des letzten Jahrzehnts [20]. Die Lesegeschwindigkeit ist um ein Vielfaches höher und die Schreibgeschwindigkeit hat sich, zumindest in bestimmten Bereichen, ebenfalls stark erhöht. Die Gesamtgeschwindigkeit eines Systems erhöht sich damit ebenfalls deutlich, sodass es plausibel erscheint, dass die SSD die HDD mittelfristig ablösen wird. Anwendungsbereiche, für die Festplatten als Massenspeicher zu fragil sind, können auf die deutlich schockresistenteren und temperaturunabhängigeren SSDs zurückgreifen. Gleichzeitig sinkt im Allgemeinen der Energiebedarf des Datenträgers, was bei steigenden Energiepreisen trotz des höheren Anschaffungspreises zu einer schnellen Rentabilität führen kann. Der hohe Preis bei einer noch relativ niedrigen Kapazität dürfte auf die Kunden des Consumer-Marktes zunächst allerdings abschreckend wirken. Für Heimanwender könnte die Benutzung von beiden Systemen interessant sein. So wäre es denkbar, auf einer schnellen SSD das Betriebssystem laufen zu lassen, während große Daten auf einer Festplatte liegen, die bei Bedarf aus dem Ruhezustand geholt wird. Diesen Weg geht auch der Notebookhersteller MSI und gab vor Kurzem bekannt, in einem Netbook-Modell zusätzlich zu einer SSD auch eine HDD zu verbauen. Zu den 160 GByte Kapazität der Festplatte stehen auch, je nach Modell, bis zu 16 GByte auf einer SSD zur Verfügung [21]. Der gleiche Ansatz führte auch zur Entwicklung der Hybrid Hard Drives (HHD). Bei diesen werden in Festplatten zusätzlich Flash-Speicher eingebaut, die als größerer Puffer der Festplatte fungieren. Dadurch werden Latenzzeiten der Festplatte reduziert, während gleichzeitig der Energiebedarf verringert wird, da die HDD häufig in den Ruhezustand versetzt werden kann. Dies geschieht dann, wenn Daten ausschließlich aus dem vergrößerten Puffer abgerufen oder in diesen geschrieben werden können [22]. Da die Kapazität des Flash-Puffers jedoch vergleichsweise klein ist, wird die Leistungssteigerung nicht so groß sein wie zwischen einer HDD und einer SSD. Deshalb ist zu erwarten, dass Hybrid-Festplatten keine großen Marktanteile gewinnen werden können. Im Gegensatz dazu ist mittelfristig mit einer Verdrängung der HDDs durch SSDs in vielen

Marktsegmenten zu rechnen. Der Trend, Note- und Netbooks mit SSDs auszustatten, wird andauern, da die SSDs längere Akku-Laufzeiten bei gleichzeitig reduziertem Gewicht zulassen. Nicht zuletzt wegen der Tendenz zu umweltschonender Hardware ist auch im Workstation- und Serverbereich ebenfalls ein Umstieg auf SSDs zu erwarten. Große Serverhersteller, wie Sun Microsystems, gehen mit dem Trend und stellen bereits Serversysteme zusammen, in denen ausschließlich SSDs als Massenspeicher arbeiten [23]. Da die Kapazität des Massenspeichers eines Systems von vielen Menschen als bedeutsames Kaufkriterium aufgefasst wird, könnte hingegen die Eroberung des Desktop-Segments des Consumerbereichs durch die SSD im Vergleich relativ langsam voranschreiten.

6. Literaturverzeichnis

- [1] JMicron, *JMF602 Product Brief*, JMicron Technology Corp., Juni 2008
- [2] R. Paul, "MOS-Feldeffekttransistoren" in *Halbleiter-Elektronik*, Band 21, Springer-Verlag, 1994, pp. 356-369
- [3] Jim Griffin, Brian Matas, und Christian de Suberbasaux, *Memory 1996: Complete Coverage of DRAM, SRAM, EPROM and Flash Memory ICs*. Integrated Circuit Engineering Corporation, 1996. [E-book].
Abrufbar: <http://smithsonianchips.si.edu/>. [Zugriff: 14.01.2009]
- [4] Toshiba, „NAND vs. NOR Flash Memory, Technology Overview“ *Toshiba Inc.*, 25.04.2006. [Online]. Abrufbar: www.toshiba.com/taec/components/Generic/Memory_Resources/NANDvsNOR.pdf. [Zugriff: 12.01.2009].
- [5] Silicon Systems, „Preventing Storage System Wear-Out, White Paper“ *Silicon Systems Inc.*, 2008. [Online]. Abrufbar: www.siliconsystems.com/technology/pdfs/SSWP03-Endurance-R.pdf. [Zugriff: 12.01.2009].
- [6] Patrick Schmid, "Intel Flash SSD X25-M: Bewegung für Massenmarkt?" *Toms Hardware*, 08.09.2008. [Online]. Abrufbar: www.tomshardware.com/de/X25-M-Intel,testberichte-240143.html. [Zugriff: 12.01.2009]
- [7] Boi Feddern und Benjamin Benz, "Überflieger – Solid State Disks für den Massenmarkt" *c't-Magazin*, Heft 21/2008, pp. 122-127, Juni 2008
- [8] Samsung, „1G x 8 Bit/ 2G x 8 Bit NAND Flash Memory“, SAMSUNG Electronics Co., 31.03.2007, [Online]. Abrufbar: www.atlantic.com.hk/. [Zugriff: 14.01.2009]
- [9] HP, „Serial ATA Technology, technology brief“ *Hewlett-Packard*, August 2007. [Online]. Abrufbar: <http://h20000.www2.hp.com/bc/docs/support/SupportManual/c00301688/c00301688.pdf>. [Zugriff: 12.01.2009].
- [10] Intel, „X25-E SATA Solid State Drive, Advance Product Manual“ *Intel*, Juli 2008. [Online]. Abrufbar: download.intel.com/design/flash/nand/extreme/extreme-sata-ssd-datasheet.pdf. [Zugriff: 12.01.2009].
- [11] Amber Huffman und Joni Clark, „Serial ATA Native Command Queuing, Whitepaper“ *Seagate Technology und Intel Corporation*, Juli 2003. [Online]. Abrufbar: <http://www.seagate.com/specials/ncqpaper/>. [Zugriff: 13.01.2009]

- [12] Mesut Güneş, *TI 2: Computer Architecture*, Sommersemester 2008, Berlin: Freie Universität Berlin, 2008
- [13] Intel, „X18-M/X25-M SATA Solid State Drive, Advance Product Manual“ *Intel*, Juli 2008. [Online]. Abrufbar: <http://download.intel.com/design/flash/nand/mainstream/mainstream-sata-ssd-datasheet.pdf>. [Zugriff: 16.01.2009].
- [14] WD, „WD Caviar Black, datasheet“, Western Digital Corporation, 2008, [Online]. Abrufbar: www.wdc.com/de/library/sata/2879-701276.pdf. [Zugriff: 16.01.2009]
- [15] Samsung, „SilentSeek Technology, whitepaper“, SAMSUNG Electronics Co., 2006, [Online]. Abrufbar: www.samsung.com/global/business/hdd/learningresource/whitepapers/LearningResource_SilentSeek.html. [Zugriff: 16.01.2009]
- [16] Samsung, „Spinpoint F1 DT, product sheet“, SAMSUNG Electronics Co., 2008, [ONLINE]. Abrufbar: www.samsung.com/global/system/business/hdd/prdmodel/2008/8/19/447609F1_DT_R4.8.pdf. [Zugriff: 16.01.2009]
- [17] "Head Crash", Microsoft Encarta Online Encyclopedia, 2008, [Online]. Abrufbar: encarta.msn.com. [Zugriff: 16.01.2009]
- [18] „HDD product lineup“, SAMSUNG Electronics Co., 2009, [Online]. Abrufbar: www.samsung.com. [Zugriff: 16.01.2009]
- [19] „Alternate, Hardware – Software, Online-Shop“, 2009, [Online]. Abrufbar: www.alternate.de. [Zugriff: 16.01.2009]
- [20] Patrick Schmid, „Kapazität übertrifft Leistung: Dramatische Trend bei Festplatten?“ *Toms Hardware*, 15.12.2006. [Online]. Abrufbar: www.tomshardware.com/de/kapazitaet-schlaegt-leistung,testberichte-237298.html. [Zugriff: 12.01.2009]
- [21] „The World's First Hybrid Storage Netbook- MSI U115 Hybrid“, 2008, [Online]. Abrufbar: global.msi.com.tw/index.php?func=news_desc&news_no=710. [Zugriff: 16.01.2009]
- [22] „Whitepaper: what is hybrid HDD?“, SAMSUNG Electronics Co., 2009, [Online]. Abrufbar: www.samsung.com/us/consumer/learningresources/. [Zugriff: 16.01.2009]
- [23] „Sun Newsflash: Neue Sun Storage-Linie setzt vollständig auf Flash“, Sun Microsystems, 2008, [Online]. Abrufbar de.sun.com/sunnews/press/2008/20080605.jsp. [Zugriff: 16.01.2009]