



TCO reduzieren und widerstandsfähige, reaktionsschnelle Datenbanken mit Kingstons DC1500M Enterprise NVMe SSDs und VMware vSAN HCI aufbauen

Verfasst von: Hazem Awadallah, Systemtechniker, Kingston Technology

Geprüft von: Chris Selden, Leiter der SSD-Produktentwicklung, Kingston Technology

Inhalt

- [Kurzfassung](#)
- [Häufige Herausforderungen an die Infrastruktur, mit denen RDBMS im Rechenzentrum heute konfrontiert sind](#)
- [Lösung: Kingston Technology stellt die DC1500M Enterprise NVMe SSD für Rechenzentren vor](#)
- [Testumgebung](#)
 - [I. Infrastruktur](#)
 - [II. Datenbankkonfiguration](#)
 - [III. vSAN-Speicherleistung](#)
- [Testergebnisse](#)
 - [Test 1, DC1500M 960GB vSAN SQL Server 2017 VM mit einer variierenden Anzahl an DRAMs](#)
 - [Test 1, Ergebnisse, DC1500M 960GB vSAN SQL Server 2017 VM mit einer variierenden Anzahl an DRAMs](#)
 - [Test 2: Vergleich der Leistung von SQL Server 2017 auf Kingston DC500M SATA SSD, Micron 5200 eco SATA SSD und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher](#)
 - [Test 2, Ergebnisse: Vergleich der Leistung von SQL Server 2017 auf Kingston DC500M SATA SSD, Micron 5200 eco SATA SSD und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher](#)
 - [Test 3: SQL Server 2017 Leistungsvergleich DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN-Datenspeicher, größere Schema-Größe und längere Testdauer](#)
 - [Test 3, Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN-Datenspeicher, größere Schema-Größe und längere Testdauer](#)
 - [Test 4: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, Sicherungs- und Wiederherstellungsleistung, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN](#)
 - [Test 4: Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, Sicherungs- und Wiederherstellungsleistung, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN](#)
 - [Test 5: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, „Noisy Neighbor-Test“, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN](#)
 - [Test 5, Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, „Noisy Neighbor-Test“, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN](#)
- [Fazit](#)

In den letzten Jahren hat die Einführung von NVMe den Bereich der Datenspeicherung revolutioniert und einen großen Sprung nach vorne gemacht, indem die Leistung von NAND-Flash maximiert wurde und die Vorteile des funktionsreichen, bandbreitenstarken, kostengünstigen und zukunftssicheren Bus-Standards für Erweiterungen genutzt wurden, nämlich PCI Express. PCIe Gen5 befindet sich derzeit in der 5. Generation und ermöglicht Übertragungsraten von bis zu 8GB/s pro Lane. Damit wird der Engpass des Erweiterungsbusses im Speicherstapel beseitigt und der Weg für Innovation und Weiterentwicklung wird nicht nur bei SSD-Controllern und NAND-Flash, sondern im gesamten Hardware-Stapel geebnet. Prozessoren, Gehäusedesigns, Motherboards und Hardware-IO-Topologien werden ständig weiterentwickelt, um die zusätzliche Bandbreite zu unterstützen. In den Datenzentren haben sich mit der NVMe-OF-Spezifikation die Netzwerkschnittstellen, Switches und Transportprotokolle geändert und werden weiter verbessert, um die erhöhte Bandbreite besser zu unterstützen und gleichzeitig QoS und verlustfreien Pakettransport zu gewährleisten.

Doch wie wirkt sich die Einführung von NVMe auf die Anwendungsleistung aus? Können Sie Ihren Speicherplatzbedarf verringern und gleichzeitig den Transaktionsdurchsatz verbessern und die Reaktionszeiten für Transaktionen verkürzen? Können wir die Zeit für Datenbank-Backups deutlich reduzieren, um das Noisy Neighbor-Problem zu entschärfen und seine Auswirkungen in einer Produktionsumgebung zu minimieren? In diesem Artikel versuchen wir, diese Fragen zu beantworten, indem wir typische OLTP-Arbeitslasten untersuchen, wie sie in der TPCC-Spezifikation definiert sind, und einige praktische Vergleiche anstellen, um die Auswirkungen von NVMe auf die Transaktionsleistung in realistischen Szenarien aufzuzeigen.

Häufige Herausforderungen an die Infrastruktur, mit denen RDBMS im Rechenzentrum heute konfrontiert sind

Kosten, Kapazitätsplanung und Skalierbarkeit

Mit dem enormen Anstieg der Internet-Bandbreite, der Verarbeitungsgeschwindigkeiten und dem Boom der Datenanalyse in den letzten 2 Jahrzehnten wachsen die produktiven OLTP-Datenbanken schnell, oft viel schneller als von den Anwendungs- und Infrastrukturarchitekten geplant. Die zugrunde liegende Speicher- und Netzwerkarchitektur muss von Grund auf skalierbar sein, um der im Lauf der Zeit steigenden Nachfrage gerecht zu werden und ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kosten, einfacher Verwaltung und Leistung zu bieten. Es ist eine schwierige Entscheidung, ob die Anwendung in lokalen Rechenzentren oder mit IaaS/PaaS-Cloud-Diensten erstellt werden soll. Die Ausführung der Anwendung in lokalen Rechenzentren bietet Lösungsarchitekten die volle Kontrolle über Skalierbarkeit, Sicherheit, Ausfallsicherheit und Leistung, erfordert jedoch eine sorgfältige Planung und ist mitunter mit hohen Vorlaufkosten verbunden. Die Nutzung von IaaS/PaaS-Cloud-Diensten beschleunigt die Bereitstellung und vereinfacht die Skalierbarkeit, bietet aber weniger Kontrolle über Leistung und Ausfallsicherheit und kann bei der Skalierung der Anwendung schnell kostspielig werden. Einige Unternehmen bevorzugen einen hybriden Ansatz, bei dem wichtigere Tier-1-Anwendungen in lokalen Rechenzentren verbleiben können und Tier-2- und Legacy-Anwendungen in die Cloud migriert werden. Für Anwendungen, die intern bleiben, bieten hyperkonvergente Infrastrukturlösungen, wie VMware vSAN, mit All-Flash-Plattengruppen ein gutes Gleichgewicht zwischen Kosten, Einfachheit, Leistung und leichter Skalierbarkeit.

Stabilität

Tier-1-Anwendungen müssen auf eine Infrastruktur aufgebaut oder migriert werden, die mehr als einem Hardwareausfall im gesamten Hardware-Stack standhält. Wenn sie nicht richtig geplant sind, können Geräteausfälle in Rechenzentren zu erheblichen finanziellen Verlusten durch Serviceunterbrechungen oder im schlimmsten Fall zu einem dauerhaften Datenverlust führen. In gemeinsam genutzten Speicherumgebungen ist eine sorgfältige Planung erforderlich, um sicherzustellen, dass die zugrunde liegende Infrastruktur so ausgelegt ist, dass sie Speicherausfällen und einer Überlastung der Komponenten standhält.

Mit vSAN sollten beispielsweise Tier-1-Anwendungen bei aktivierter vSphere High Availability (HA) mindestens eine FTT (Failure to Tolerate) von 1 aufweisen, um sicherzustellen, dass die Anwendungs- und Datenbank-VMs vor mindestens einem Computer-, Netzwerk- oder Speicherausfall geschützt sind. Darüber hinaus kann vSphere Distributed Resource Scheduler (DRS) aktiviert werden, um die CPU-/Speicherressourcen auf die physischen Server im Cluster zu verteilen.

Variierende Erwartungen an die Leistung

Die Nachfrage nach höherer Transaktionsgeschwindigkeiten und niedrigeren Latenzzeiten nimmt weiter zu, da OLTP-Anwendungen immer weiter skaliert werden und mehr Benutzer eine höhere Transaktionslast für die Backend-Datenbank darstellen. Anwendungsarchitekten müssen eine Speicherinfrastruktur planen, die sich an die gestiegene Nachfrage anpassen kann und flexibel genug ist, um zwischen verschiedenen Speicherebenen migriert zu werden. SQL-Datenbanken, die sich auf virtuellen Platten befinden und von SAN-Storage-Arrays bereitgestellt wurden, können beispielsweise mit VMwares Storage VMotion auf einen NVMe-All-Flash-vSAN-Datenspeicher mit schnelleren Speicherebenen migriert werden, z. B. NVMe.

Das Noisy Neighbor-Dilemma

Es ist unerlässlich, eine Infrastruktur zu entwickeln, die den wichtigsten Arbeitslasten die für ihre Ausführung erforderlichen Ressourcen zur Verfügung stellt. In einer gemeinsam genutzten Speicherumgebung mit mehreren Workloads kann die Leistung unvorhersehbar werden, und abnorme Workloads können Probleme für wichtige Produktions-Workloads verursachen. Dies ist eine Definition des Noisy Neighbor-Problems. Ein Beispiel wäre, wie wir später noch sehen werden, ungeplante Datenbank-Backup-Vorgänge auf einem Server, die dabei Speicher- und Netzwerkressourcen beanspruchen und damit die Leistung und Latenz anderer Server beeinträchtigen, die dieselben Ressourcen nutzen.

Wir stellen vor: Kingston DC1500M Enterprise NVMe SSDs

[Die Kingston DC1500M](#) ist das neueste Enterprise U.2 PCIe 3.0x4 NVMe-Angebot von Kingston mit Speicherkapazitäten von (960GB–7680G). Mit einem 16-Kanal-Controller und 3D TLC NAND wurde sie nach strengen Anforderungen an die Servicequalität (QoS) entwickelt, um eine anhaltend hohe Leistung und Konsistenz von Unternehmens-Workloads bei geringster Latenz zu gewährleisten. Die auf Unternehmen ausgerichtete Firmware unterstützt Funktionen wie Overprovisioning, mehrere Namespaces (mit Unterstützung für bis zu 64 Namespaces) sowie ausgefeiltere ECC-Algorithmen, um die Zuverlässigkeit von Unternehmens-Workloads während der gesamten Lebensdauer des Laufwerks sicherzustellen.

Da SATA SSDs immer noch die am weitesten verbreiteten SSDs in Rechenzentren sind, möchten wir in diesem Dokument zeigen, dass die Migration oder der Aufbau Ihrer Speicherinfrastruktur auf Enterprise NVMe SSDs, wie Kingstons DC1500M NVMe, einige der oben genannten Probleme lösen kann.

In unseren internen Tests bietet eine einzelne Kingston DC1500M NVMe SSD einen bis zu 6,5-fachen Durchsatz und eine 5,6-fache Latenzverbesserung (Abbildung b unten) im Vergleich zur 1 Micron 5200 eco Enterprise SATA SSD, und das bei geringer bis Null Kostenparität.

Dieses Leistungsniveau in einer hyperkonvergenten Umgebung führt zu einem höheren Transaktionsdurchsatz und geringeren Latenzzeiten für SQL Server-Datenbanken. Dies führt wiederum auch zu einem geringeren Speicherbedarf und einem niedrigeren Stromverbrauch. In diesem Beispiel sind 6 micron 5200 eco Laufwerke nötig, um den Durchsatz von 1 DC1500M-Laufwerk zu erreichen. Wir werden später sehen, wie sich diese Leistung in realistischen SQL OLTP-Workloads auf VMware vSAN übertragen lässt.

Die dramatischen Leistungsverbesserungen, die NVMe SSDs, wie die DC1500M, im Vergleich zu SATA SSDs mit sich bringen, bedeuten auch, dass ihr Einsatz in gemeinsam genutzten, hyperkonvergenten Umgebungen dazu beitragen kann, die Auswirkungen des Noisy Neighbor-Problems auf Tier-1-Anwendungen zu verringern. Enterprise NVMe SSDs wie die DC1500M können unerwartete Arbeitslasten wie Sicherungs-/Wiederherstellungsvorgänge während der Produktionszeiten viel schneller erledigen und gleichzeitig niedrige Latenzzeiten und einen hohen Transaktionsdurchsatz für geschäftskritische Tier-1-Produktions-Workloads aufrechterhalten, wie wir in den Noisy Neighbor-Tests weiter unten in diesem Dokument demonstrieren.

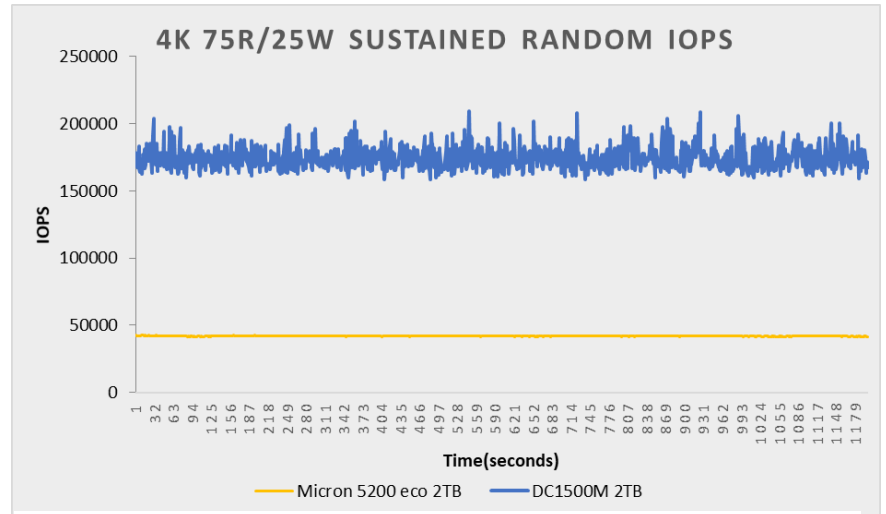


Abbildung a) IOPS-Vergleich im Sekundentakt von DC1500M 1920G und Micron 5200 ECO 1920G SATA SSD. Getestet auf einem einzelnen physischen Laufwerk, das als Sekundärlaufwerk an ein Linux-System mit fio v3.17 angeschlossen ist, sobald die SSDs einen stabilen Leistungszustand erreicht haben. Basierend auf einer Blockgröße von 4k, einem Leseanteil von 75 % und einer Warteschlangentiefe von 32

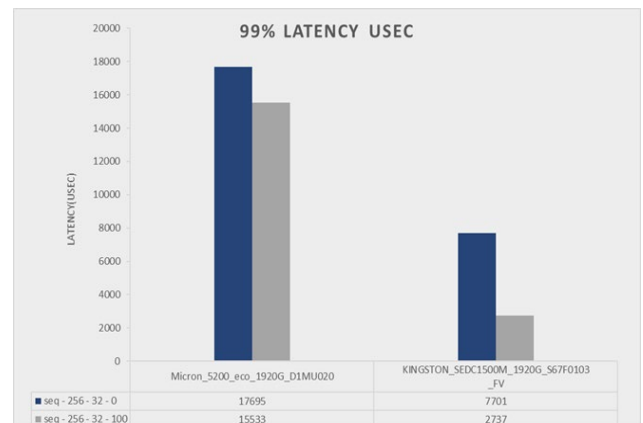
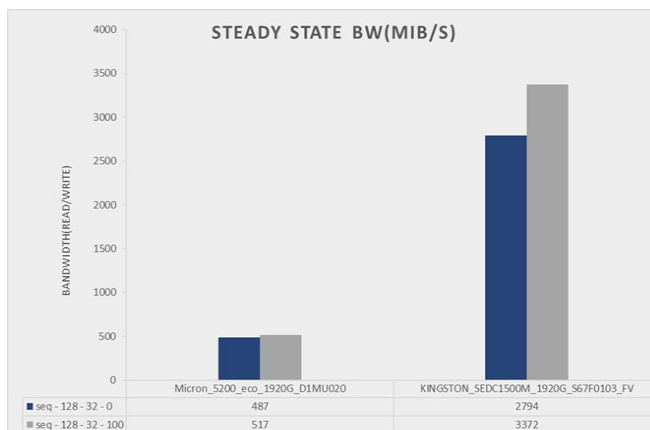


Abbildung b) Vergleich der sequenziellen Lese- und Schreibgeschwindigkeit (MB/s) und der Latenzzeit (µs) von DC1500M 1920G und Micron 5200 ECO 1920G SATA SSD. Getestet auf einem einzelnen physischen Laufwerk, das als Sekundärlaufwerk an ein Linux-System mit fio v3.17 angeschlossen ist, sobald die SSDs einen stabilen Leistungszustand erreicht haben. Basierend auf einer Blockgröße von 256k und einer Warteschlangentiefe von 32

Testumgebung

I. Infrastruktur

Unsere Testumgebungen sind in den folgenden Abbildungen 1.1 und 1.2 dargestellt. Wir haben uns für VMware vSAN als HCI entschieden, da es eine hoch skalierbare, robuste, zentralisierte und kostengünstige Speicheroption für hyperkonvergente, virtualisierte Umgebungen ist.

Mit VMware vSAN können Anwender lokale Speichergeräte von mehreren Servern in einem einzigen Datenspeicher zusammenfassen, der von allen Hosts im vSAN-Cluster gemeinsam genutzt wird. Die physischen Platten aller einzelnen Server werden in Plattengruppen zusammengefasst, wobei 1 Laufwerk/Plattengruppe als Cache-Gerät und bis zu 7 Laufwerke/Plattengruppe als Speicherkapazitätsgeräte eingesetzt werden. Ein Server kann höchstens 5 Plattengruppen haben, also wirken maximal 35 Speicherkapazitätsgeräte/Server am vSAN-Cluster mit. Die Plattengruppen aller ESXi-Hosts in einem vSAN-Cluster werden zu einem vSAN-Datenspeicher zusammengefasst, wobei der Datenverkehr zwischen den Hosts und dem vSAN-Datenspeicher über ein dediziertes Netzwerk für vSAN isoliert wird (eine Voraussetzung ist mehr als 10Gbps für alle Flash-vSANs). Administratoren können mit einem kleinen Speicherplatz beginnen und je nach Bedarf Speicherknoten hinzufügen, um die Kapazität zu erhöhen (bis zu 64 Knoten/Cluster), und so auf relativ einfache Weise die Leistungsanforderungen für bestimmte VMs kontrollieren.

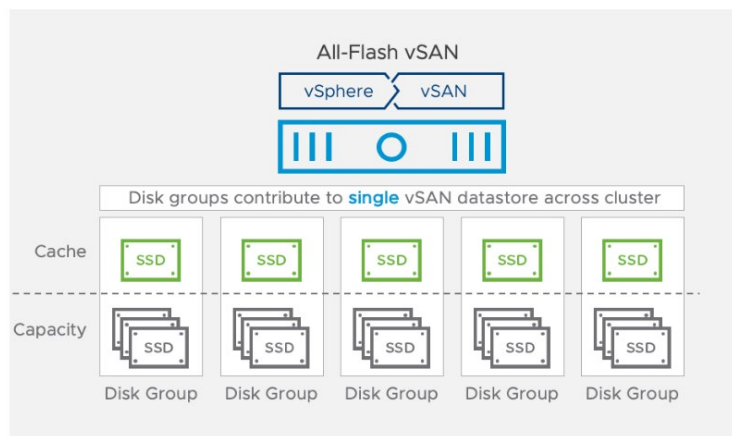


Abbildung 1 All-Flash vSAN-Architektur

vSAN verwendet Speicherrichtlinien, um den erforderlichen Schutzgrad und das Striping für bestimmte virtuelle Platten festzulegen. Bei Verwendung der Standard-Speicherrichtlinie spiegelt vSAN alle vom vSAN-Datenspeicher bereitgestellten Objekte, bietet Administratoren aber auch eine granulare Kontrolle über das Schutzniveau der virtuellen Platten, die den VMs vom vSAN-Datenspeicher bereitgestellt werden. Wenn beispielsweise das SQL-Datenlaufwerk VMDK mindestens einen Ausfall im Cluster (gesamter Server, Festplatte oder

Netzwerkschnittstelle) tolerieren soll, kann eine primäre Ausfalltoleranzstufe (FTT) von 1 festgelegt werden. Eine RAID-1-Spiegelung des VMDK-Objekts würde dann mit einer Replikatkomponente auf einem Host und einer weiteren Replikatkomponente auf einem anderen Host im vSAN-Cluster erstellt werden. Ebenso können Administratoren eine RAID 0-Speicherrichtlinie (nur Striping) mit einem FTT von 0 festlegen, wenn das Sicherungslaufwerk VMDK nicht über eine Ausfallsicherheit und maximale Leistung verfügen soll, wenn die VM über SQL AlwaysOn Failover--Clustering hochverfügbar ist oder wenn die Datenbank regelmäßig über gängige Sicherungslösungen wie Commvault oder NetBackup gesichert wird.

In unserem Kingston Technology SSD Test- und Validierungslabor und für diesen Artikel haben wir 3 [PowerEdge R740xD Server](#) verwendet, die 8 2,5"-NVMe- und 16 2,5"-SATA/SAS-Laufwerksschächte/Server unterstützen, mit einem dedizierten 10Gb-Netzwerk, das von 2 [Cisco Nexus 5k Switches](#) für vSAN-Verkehr für SATA SSD-Tests unterstützt wird. Für die NVMe-Tests haben wir den 4-Knoten-Superserver Big Twin Supermicro [SYS-2029BT-HNR](#) mit einem dedizierten 40Gb-Netzwerk verwendet, das von 1 [Cisco 9k-Switch](#) für den vSAN-Datenverkehr unterstützt wird. In unseren Tests haben wir eine benutzerdefinierte Speicherrichtlinie (FTT=0) genutzt, die der virtuellen Festplatte der Gast-VM zugewiesen wurde, um die Blockspeicherleistung für alle in diesem Dokument durchgeführten Tests zu maximieren. Für die

verschiedenen Tests, die wir durchgeführt haben, haben wir verschiedene SSDs verwendet, die am Anfang jedes Testergebnisses unten dokumentiert sind, aber als Standard haben wir 3 physische Laufwerke mit der gleichen Kapazität pro Plattengruppe sowohl für SATA- als auch für NVMe-Tests verwendet. Für den Vergleichstest haben wir die beliebte Micron 5200 eco SATA SSD ausgewählt. Für Management- und VMotion-Datenverkehr haben wir ein 1Gb-Netzwerk verwendet, das von einem Netgear JGS524PE Managed Switch mit 24 Ports unterstützt wird.

NVMe-Testumgebung (Hardware)	SATA/SAS/HYBRID-Testumgebung (Hardware)
Supermicro SYS-2029BT-HNR 4-Knoten-Cluster mit 6 Hot-swap-fähigen 2,5"-NVMe-Laufwerksschächten/Server	PowerEdge Dell R740xD 3-Knoten-Cluster mit Unterstützung für 8 2,5"-NVMe- und 16 2,5"-SATA/SAS-Laufwerksschächte/Server
Intel(R) Xeon(R) Gold 6252 CPU (48c/96t) bei 2,10GHz x 8	Intel(R) Xeon(R) Silver 4114 CPU (10c/20t) bei 2,20GHz x 8
64 x 32GB Kingston DDR4-2933 2Rx4 ECC REG DIMM (16x32GB pro Knoten), 512GB/Knoten, 2048GB/Cluster	768 GB 24x32GB Kingston Dual Rank ECC Speicher bei 2400MHz/Knoten, 2304GB/Cluster
2 x Cisco nexus N5K-C5010 20 Port 10Gbe Switches der Rechenzentrumsklasse für vSAN-Netzwerkverkehr	1 x Cisco Nexus 9332PQ Switch 32 Port 40Gbe Switch der Rechenzentrumsklasse, dediziert für vSAN-Netzwerkverkehr
	PERC H740P konfiguriert im HBA-Passthru-Modus

Abbildung 1.1 Für unsere Tests verwendete Hardware

NVMe-Testumgebung (Betriebssystem und Software)	SATA-Testumgebung (Betriebssystem und Software)
Hypervisor: VMware ESXi, 7.0.3, 19193900	Hypervisor: VMware ESXi, 7.0.3, 19193900
vSAN 7U3c (VMware ESXi, 7.0.3, 19193900 + VMware VirtualCenter 7.0.3 Build-19234570)	vSAN 7U3c (VMware ESXi, 7.0.3, 19193900 + VMware VirtualCenter 7.0.3 Build-19234570)
Gast-Betriebssystem: Windows Server 2019 Datacenter, v1809	Gast-Betriebssystem: Windows Server 2019 Datacenter, v1809
Microsoft SQL Server 2017 (RTM) - 14.0.1000.169 (X64)	Microsoft SQL Server 2017 (RTM) - 14.0.1000.169 (X64)
HammerDB-v3.2	HammerDB-v3.2
HCIBench 2.5.3	HCIBench 2.5.3

Abb. 1.2: Betriebssystem und Software

II. Datenbankkonfiguration

In den hier durchgeführten Tests haben wir eine Server 2019-Gast-VM mit SQL Server 2017 und eine separate VMDK verwendet, die vom vSAN-Datenspeicher für Daten, Log und Backup bereitgestellt wurde. HammerDB ist eine Open-Source-Anwendung für Datenbanktests, die die Durchführung des TPCC-Benchmarks für OLTP-Anwendungen und des TPC-H-Benchmarks für Datenanalyse-Workloads unterstützt. Für die verschiedenen Tests in diesem Dokument wurde die TPCC-Benchmark-Spezifikation gewählt, um OLTP-Transaktionsarbeitslasten zu simulieren und die Konformität und Zuverlässigkeit der Testergebnisse zu gewährleisten.

Der TPCC-Benchmark (formale Definition auf tpc.org (TPCC-Homepage)) ist ein bekannter OLTP-Benchmark nach Industriestandard, der ein Computersystem zur Ausführung von Kundenbestellungen zur Lieferung von Produkten eines Unternehmens implementiert. Das Unternehmen vertreibt 100.000 Artikel und hält seinen Bestand in Lagern vor. Jedes Lager hat 10 Vertriebsbereiche, und jeder Bereich bedient 3000 Kunden. Die Kunden rufen bei dem Unternehmen an, dessen Mitarbeiter die Bestellung entgegennehmen, wobei jede Bestellung mehrere Artikel umfasst, die dann in der Regel vom örtlichen Lager aus geliefert werden. Einige wenige Artikel sind jedoch zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht vorrätig und werden von einem anderen Lager geliefert. Es ist wichtig zu wissen, dass die Größe des Unternehmens nicht festgelegt ist und mit dem Wachstum des Unternehmens weitere Lager und Vertriebsbereiche hinzukommen können. Aus diesem Grund kann das Testschema so klein oder groß sein, wie Sie es wünschen, wobei ein größeres Schema zu einer größeren TPC-C-Datenbank führt und ein leistungsfähigeres Computersystem erfordert, um die erhöhte Anzahl von Transaktionen zu verarbeiten (HammerDB).

Für diesen Artikel haben wir verschiedene Tests durchgeführt, wobei die Anzahl der Lager (Schemagröße) und die Anzahl der virtuellen Benutzer zu Beginn jedes Tests dokumentiert und in den Testergebnissen erläutert wurden. Während aller Testläufe zeichnen wir die HammerDB-Ergebnisse jedes Testlaufs auf, während wir gleichzeitig CPU-, Netzwerk-, Speicher- und Plattenstatistiken mit dem Windows-Leistungsmonitor (Perfmon), mit dem nativen Modul Get-counter in Windows PowerShell und dem auf dem vCenter-Server verfügbaren vSAN-Leistungsmonitor erfassen.

III. vSAN-Speicherleistung

Wir haben die Leistung des vSAN-Datenspeichers für die Konfigurationen getestet, auf die wir uns in diesem Dokument konzentrieren, bevor wir unsere SQL-Tests durchgeführt haben, um das Leistungsniveau zu bewerten, das wir von dem DC1500M NVMe- und Micron 5200 eco SATA SSD vSAN-Datenspeicher erwarten können. Wir haben das von VMware empfohlene Tool für das Benchmarking des vSAN-Datenspeichers verwendet: [HCIBench v2.5.3](#). Dabei handelt es sich um ein Automatisierungs-Toolkit, mit dem mehrere VMs auf allen Hosts im vSAN-Cluster bereitgestellt werden, während bestimmte Arbeitslasten mit Vdbench auf allen Gast-VMs parallel ausgeführt werden. Wir stellen einige Ergebnisse aus unserem Lauf mit 6 VMs auf dem DC1500M NVMe vSAN-Cluster und dem Micron 5200 eco SATA-Cluster vor.

Abbildung 1.3 und 1.4 zeigen die Ergebnisse der gemischten Arbeitslast bei einer anhaltenden Zufallsarbeitslast von 70 % Lesen und 30 % Schreiben mit verschiedenen Blockgrößen für eine Dauer von 30 Minuten für den DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher und den Micron 5200 eco SATA SSD vSAN-Datenspeicher. Bei einer Blockgröße von 4k konnte der DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher doppelt so viele 70 % L/30 % S IOPS (355k gegenüber 178K) liefern wie der SATA SSD vSAN-Datenspeicher, wobei jede IO 33 % schneller abgeschlossen wurde (0,4ms gegenüber 0,6ms für SATA SSD vSAN). Der NVMe-Leistungsvorteil wird deutlich, wenn die IO-Transfergröße steigt. Betrachtet man die 64k-Arbeitslast mit 70 % Lese- und 30 % Schreibzugriff, so konnte der NVMe vSAN-Datenspeicher dreimal so viele IOPS (121.240 gegenüber 31.756) bei einer um 66 % besseren Latenz pro IO (2,1ms gegenüber 6,4ms für SATA SSD vSAN) liefern.

Abbildung 1.5 und 1.6 zeigen einen Vergleich des anhaltenden Lese- und Schreibdurchsatzes und der Latenzen für den DC1500M NVMe- und den Micron 5200 eco SATA SSD vSAN-Datenspeicher mit verschiedenen Blockgrößen in HCIBench. Wir konnten einen Durchsatz von 17,8GB/s (128k) mit dem DC1500M-NVMe-Datenspeicher, den 6,3-fachen Lesedurchsatz des SATA-SSD-vSAN-Datenspeichers (2,79GB/s) und eine 5x geringere Latenz (0,9ms gegenüber 4,4ms für SATA vSAN) erzielen. Bei Schreibvorgängen erreichte der DC1500M vSAN einen Durchsatz von 6,7GB/s (128k), also 5,9 Mal mehr als der SATA vSAN bei 5 Mal geringerer Latenz.

Wie groß ist dieser Leistungsunterschied zwischen NVMe- und SATA-vSAN-Datenspeicher in Bezug auf die SQL Leistung? Rechtfertigt der Leistungsvorteil von NVMe die Kosten? Werden SQL Backup- oder -Wiederherstellungsvorgänge schneller abgeschlossen, um die Auswirkungen auf geschäftskritische Workloads zu minimieren? In den folgenden Abschnitten versuchen wir, diese Frage anhand einiger Experimente zu beantworten.

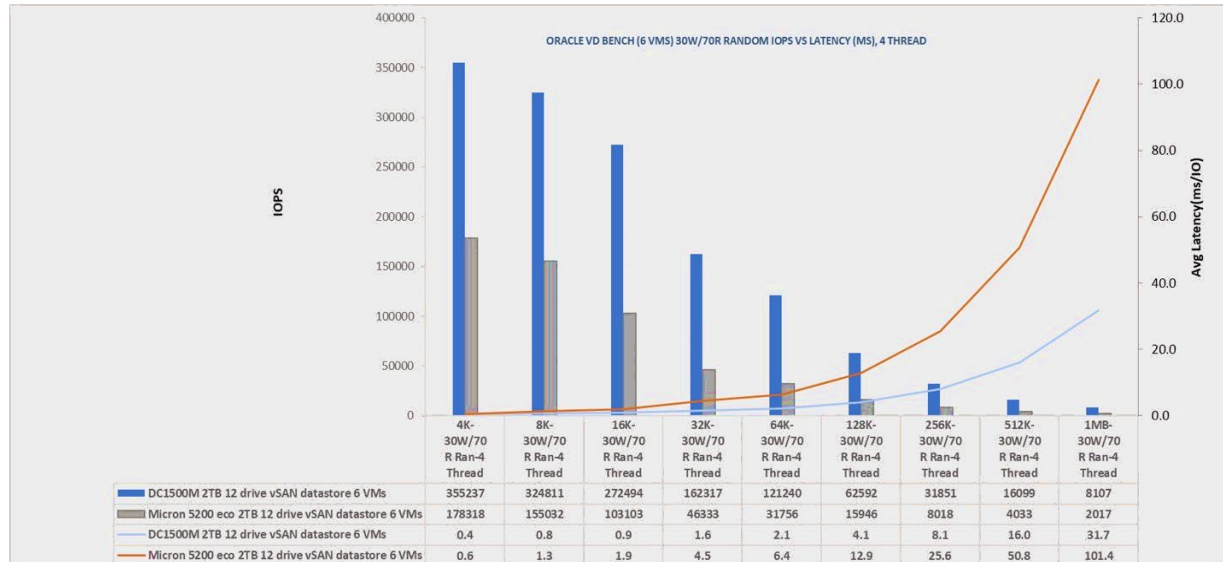


Abbildung 1.3 DC1500M vSAN-Datenspeicher vs. Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher, 4k 70 L/30 S, zufällig, QD=8, Threads=4, 6 VMs. HCIBench IOPS vs. durchschnittliche Latenz (ms)

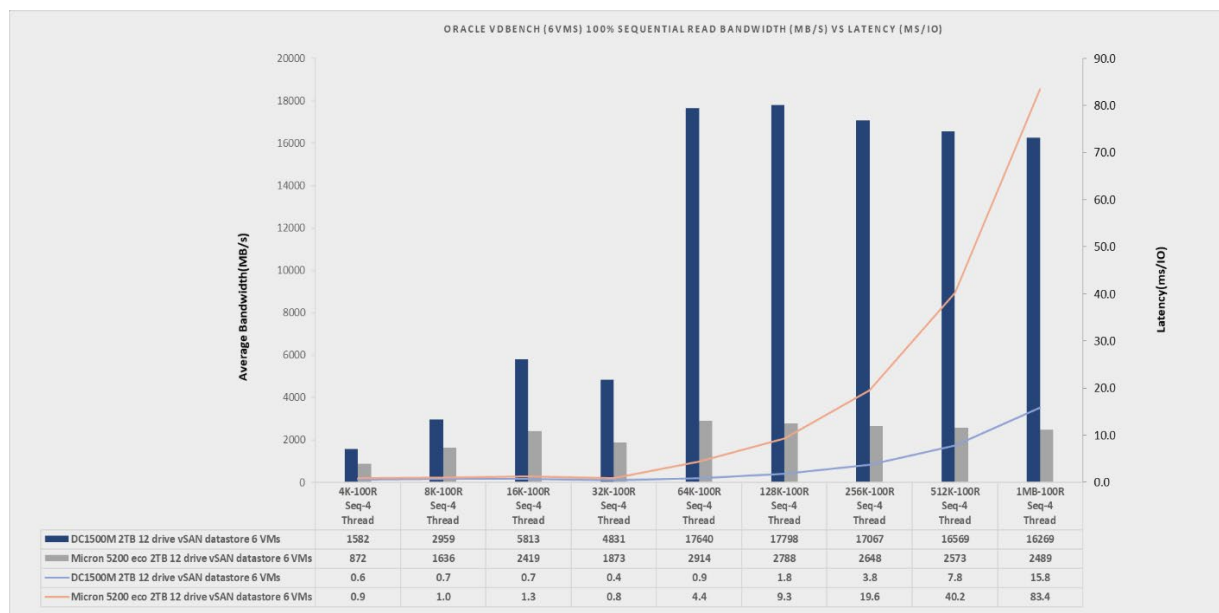


Abbildung 1.4 DC1500M vSAN-Datenspeicher vs. Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher, 100 L/0 S, sequenziell, QD=8, Threads=4, HCIBench 6 VMs. Lesedurchsatz (MB/s) und durchschnittliche Leselatenz (ms/IO)

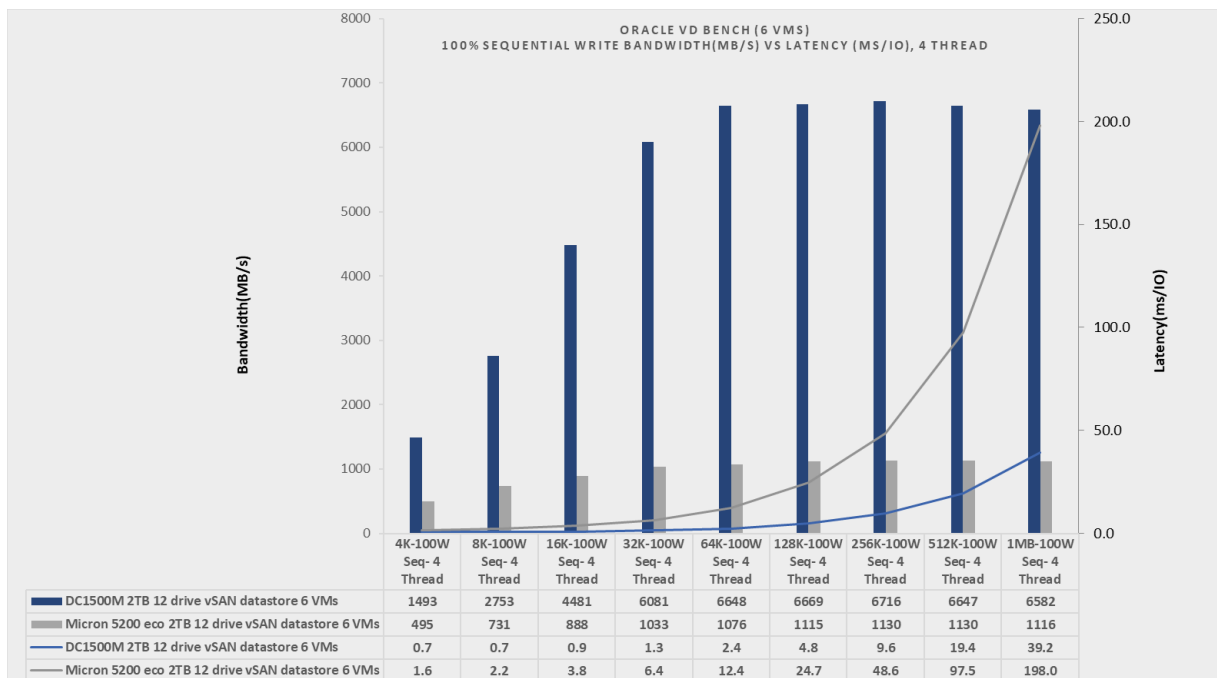


Abbildung 1.5 DC1500M vSAN-Datenspeicher vs. Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher, 100 S/O L, sequenziell, QD=8, Threads=4, HClBench 6 VMs Lesedurchsatz (MB/s) und durchschnittliche Leselatenz (ms/IO)

Testergebnisse

Test 1, DC1500M 960GB vSAN SQL Server 2017 VM mit einer variierenden Anzahl an DRAMs

Speicherkonfiguration für vSAN-Datenspeicher: 3 DC1500M 960G FW S67F0103/Plattengruppe, 4 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), NVMe vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem.

Test 1a Beschreibung	Test 1b Beschreibung	Test 1c Beschreibung
Virtuelle Festplatte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 1200-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 100GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 128GB RAM ausgestattet. Eine weitere vSAN-VM mit 16c/128GB RAM wurde als Lastgenerierungsserver bereitgestellt, um Transaktionen an das SUT zu senden. Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89. Es wurden eine 2-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 5 Minuten/Benutzersequenz gewählt.	Wie Test 1a; allerdings wurde der zugewiesene DRAM für die Gast-VM auf 32GB reduziert, um die IO zum Datenbereich zu erhöhen. Ein Remote-Lastgenerierungsserver wurde außerdem verwendet, um Transaktionen an das SUT zu senden, aber der zugewiesene DRAM für den LGS wurde ebenfalls auf 32GB reduziert.	Wie Test 1a; allerdings wurde der zugewiesene DRAM für die Gast-VM auf 32GB reduziert, um die IO zum Datenbereich zu erhöhen, und dieser Test wurde lokal auf der SUT VM ausgeführt, um etwaige Netzwerkengpässe auszuschließen.

Abb. 2.1 Test 1: DC1500M vSAN-Datenspeicher, verschiedene DRAM-Konfigurationen

Unser Ziel für Test 1 war es, eine Grundlage für die erwartete Leistung des TPCC-Benchmarks auf SQL Server 2017 auf VMware vSAN mit einem DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher mit Flash-Technologie zu erhalten, wobei SQL Server unterschiedliche Mengen an Speicher zugewiesen wurden. Die Idee hinter der Variation der DRAM-Menge, die dem zu testenden SQL-System (SUT) zugewiesen wird, basiert auf diesen Konzepten:

- Eine Verringerung des der SQL Server-Datenbank-VM zugewiesenen Arbeitsspeichers erhöht die E/A Leistung des Datenbereichs und legt den Schwerpunkt stärker auf die E/A Leistung der Datenbank, die das Schema enthält (OLTP-Datenbank auf der Festplatte)
- Wenn die SQL Server-Datenbank-VM über genügend DRAM verfügt, werden die meisten Daten während eines OLTP-Tests zwischengespeichert und E/A zum Datenbereich ist minimal (In-Memory-OLTP-Test)

Wir haben ein Schema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, was eine tpcc-Datenbankgröße von ca. 100GB ergab. Im ersten Test haben wir der SUT 128GB DRAM zugewiesen, damit das gesamte Schema in den Speicher passt. Dann haben wir die virtuelle Benutzersequenz auf einem entfernten Lastgenerierungsserver (LGS) ausgeführt, um Benutzer zu simulieren, die Transaktionen an die Datenbank senden. Die Skalierung reichte von 1–89 Benutzern, um die Größe unseres Schemas und die Menge der zugewiesenen CPU-/Speicherressourcen der SQL Server-VM anzupassen. Nach dem Abschluss des Tests stellten wir die TPCC-Datenbank wieder her, reduzierten den zugewiesenen DRAM im SUT und dem LGS auf 32GB und wiederholten denselben Test mit derselben Benutzersequenz. Schließlich führten wir denselben Test lokal auf dem System unter der Test-VM durch, um etwaige Netzwerkengpässe zu beseitigen, die durch den entfernten Lastgenerierungsserver verursacht wurden.

Test 1, Ergebnisse, DC1500M 960GB vSAN SQL Server 2017 VM mit einer variierenden Anzahl an DRAMs

Abbildung 2.2 und 2.3 zeigen die Transaktionen pro Minute (TPM) und die neuen Aufträge pro Minute (NOPM), die wir für die Tests 1a, 1b und 1c mit dem DC1500M vSAN-Datenspeicher erzielt haben. Bei allen Testläufen ist zu beobachten, dass TPM und NOPM mit zunehmender Anzahl virtueller Benutzer ansteigen. Bei 89 virtuellen Nutzern konnte die SQL Server 2017-VM mit einer überwiegend speicherbasierten OLTP-Datenbank 1.113.300 TPM mit 259.631 NOPM erreichen. Als wir den zugewiesenen DRAM auf der SUT- und LGS-VM auf 32GB reduzierten, konnten wir 958.338 TPM und 208.311 NOPM erreichen. Als wir den Test jedoch lokal auf der SUT VM durchführten, erreichten wir phänomenale 1.463.290 TPM und 318.092 NOPM!

Hier zeigt sich der Latenzvorteil von Enterprise NVMe SSDs in Aktion. Das bedeutet, dass die virtuelle NVMe-Platte schnell genug reagieren kann, um den höheren Transaktionsdurchsatz aufrechtzuerhalten und zu skalieren, bis die CPU zum Engpass wird, wenn die Anzahl der Transaktionen steigt und die SQL Server-Datenbank Daten aus dem Speicher in die Transaktionsprotokolldatei schreiben muss. Aus Abbildung 2.4, Test 1c, geht hervor, dass selbst bei 89 virtuellen Benutzern jeder Benutzer 16.441 Transaktionen pro Minute verarbeiten kann. Anhand dieser empirischen Ergebnisse können wir feststellen, dass Sie beim Aufbau Ihrer Datenbank auf einer hyperkonvergenten NVMe-Infrastruktur Kosten für zusätzlichen DRAM für SQL Server 2017 sparen können.

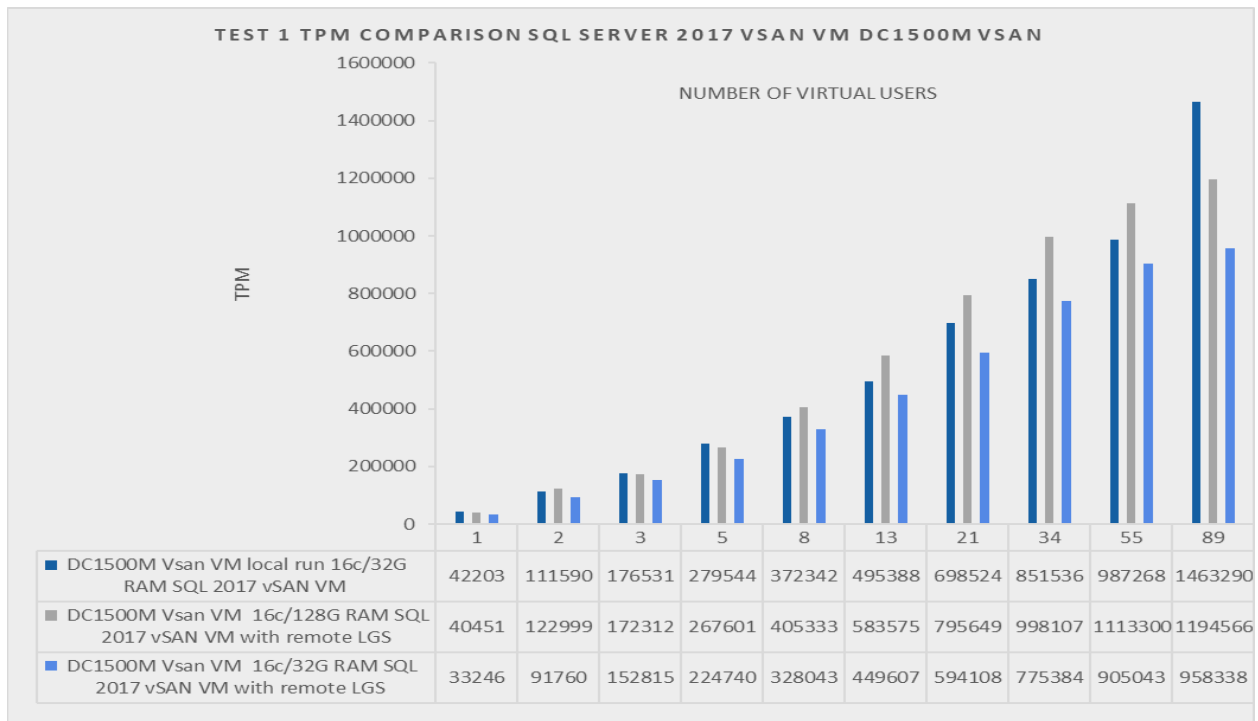


Abbildung 2.2 Test 1a, b, c: DC1500M vSAN-Datenspeicher, TPM-Vergleich bei unterschiedlicher DRAM-Größe

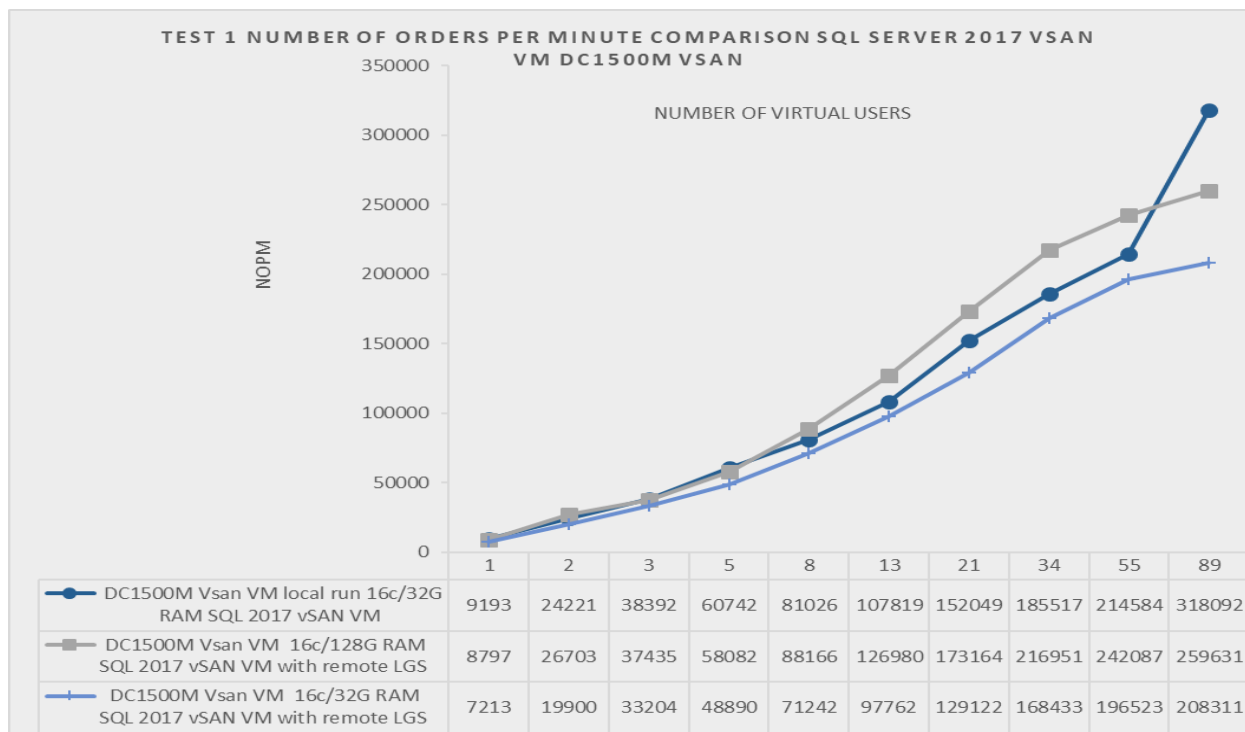


Abbildung 2.3 Test 1a, b, c: DC1500M vSAN-Datenspeicher, NOPM-Vergleich bei unterschiedlicher DRAM-Größe

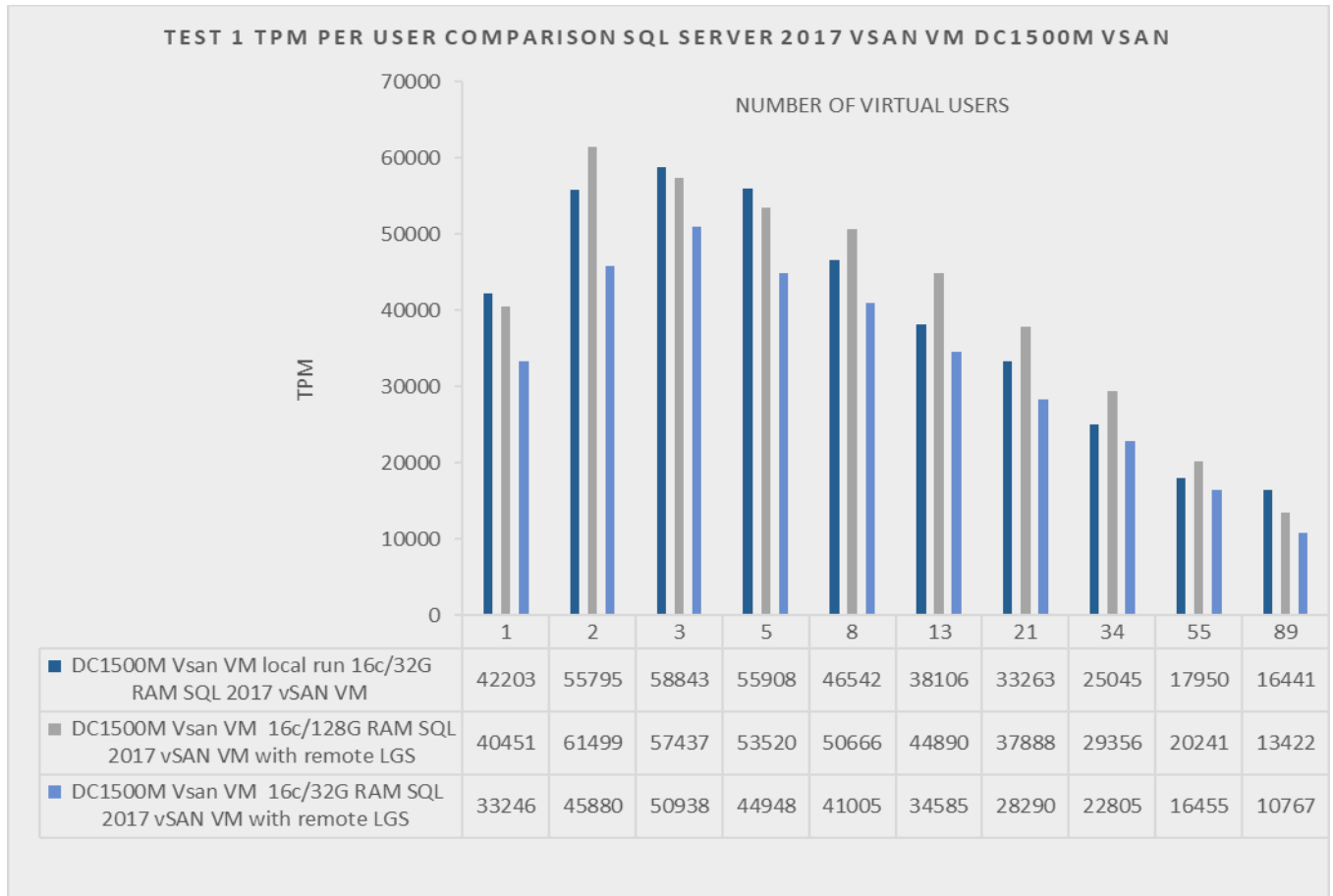


Abbildung 2.4 Test 1a, b, c: DC1500M vSAN-Datenspeicher, TPM-Vergleich bei unterschiedlicher DRAM-Größe

Test 2: Vergleich der Leistung von SQL Server 2017 auf Kingston DC500M SATA SSD, Micron 5200 eco SATA SSD und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

- NVMe vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 1a: 3 DC1500M 960G FW S67F0103/Plattengruppe, 4 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), NVMe vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 1a) - SATA vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 1b: 3 DC500M 1920G FW SCEJK2.8/Plattengruppe, 3 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), SATA vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 1b) - SATA vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 1c: 3 Micron 5200 ECO 1920G FW D1MU004/Plattengruppe, 3 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), SATA vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 1b)		
Test 2a Beschreibung	Test 2b Beschreibung	Test 2c Beschreibung
Virtuelle Festplatte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 1200-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 100GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet. Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89. Es wurden eine 2-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 5 Minuten/Benutzersequenz gewählt. Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.	Virtuelle Festplatte, die vom D500M vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 1200-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 100GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet. Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89. Es wurden eine 2-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 5 Minuten/Benutzersequenz gewählt. Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.	Virtuelle Festplatte, die vom Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 1200-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 100GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet. Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89. Es wurden eine 2-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 5 Minuten/Benutzersequenz gewählt. Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.

Abbildung 3.1 Beschreibung von Test 2: Vergleich der Leistung von SQL Server 2017 auf einem SATA- und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Test 2 vergleicht die Leistung beim TPCC-Benchmark für die getestete VM des SQL Server 2017-Systems, wenn er lokal auf drei verschiedenen Datenspeichern ausgeführt wird: Kingston DC1500M Enterprise NVMe vSAN-Datenspeicher, [Kingston DC500M](#) und Micron 5200 eco SATA SSD vSAN-Datenspeicher. In Test 2 führten wir eine lokale Ausführung auf dem getesteten SQL Server 2017-VM System durch, um die E/A Leistung des Datenbereichs zu erhöhen und die E/A Leistung der Datenbank mit dem Schema hervorzuheben. Außerdem testeten wir eine Benutzersequenz zur Skalierung von 1–89 Benutzern, um unsere Schemagröße und die Menge der der SQL Server-VM zugewiesenen CPU-/Speicherressourcen anzupassen.

Test 2, Ergebnisse: Vergleich der Leistung von SQL Server 2017 auf Kingston DC500M SATA SSD, Micron 5200 eco SATA SSD und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Abbildung 3.2 und 3.3 zeigen die Transaktionen pro Minute (TPM) und die neuen Aufträge pro Minute (NOPM), die wir für die Tests 2a, 2b und 2c erzielt haben. Bei allen Testläufen ist zu beobachten, dass TPM und NOPM mit der Anzahl der virtuellen Benutzer ansteigen, aber die Skalierung weicht bei NVMe im Vergleich zu SATA dramatisch ab. Bei 89 virtuellen Benutzern konnte der auf DC1500M basierende vSAN-Datenspeicher SQL Server 2017-VM 1.463.290 TPM mit 318.092 NOPM erreichen. Im Vergleich dazu erreichten wir 738.067 TPM/160.410 NOPM für die DC500M SQL Server vSAN VM und 628.499 TPM/136.436 NOPM für den Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher. Das bedeutet, dass Sie mit der gleichen Anzahl von DC1500M NVMe-Laufwerken auf einem NVMe-basierten vSAN-Datenspeicher den Transaktionsdurchsatz

und die Bestellungen pro Minute effektiv verdoppeln können, verglichen mit einem SATA-gestützten vSAN-Datenspeicher mit der gleichen Anzahl von SSDs. In einem Unternehmenskontext mit 89 Benutzern, die gleichzeitig Transaktionen an die Datenbank senden, kann jeder Benutzer 235 % mehr Transaktionen (d. h. mehr Bestellungen pro Minute) verarbeiten (Abbildung 3.4), wenn Sie Ihre VMware-Infrastruktur so aufrüsten, dass sie von Enterprise NVMe-Lösungen wie DC1500M unterstützt wird.

Abbildung 3.5 zeigt die durchschnittliche CPU-Leerlaufzeit im Vergleich zur Anzahl der virtuellen Benutzer für Test 2a, b und c. Dies ist ein effektives Maß für die Effizienz der virtuellen Festplatte – wie schnell die virtuelle Festplatte reagieren kann, wenn die Anzahl der Transaktionen steigt und die SQL Server-Datenbank Daten aus dem Speicher in die Transaktionsprotokolldatei schreiben muss. Bei 89 virtuellen Anwendern beträgt die CPU-Leerlaufzeit (iowait) für unsere DC1500M NVMe-basierte vSAN-VM 15,5 % im Vergleich zu 37,8 % für die DC500M-basierte VM und 44,2 % für die Micron 5200-basierte VM. Das bedeutet, dass unsere virtuelle NVMe-Festplatte viel schneller auf E/A-Anforderungen reagiert und so verhindert, dass die CPU im Leerlauf auf den Abschluss der E/A wartet, wodurch mehr Transaktionen verarbeitet werden können. In einem geschäftlichen Kontext ermöglicht das Upgrade Ihrer VMware-Infrastruktur auf NVMe eine effizientere Nutzung der virtuellen Kerne, die Ihrer SQL Server-VM zugewiesen werden, um den Transaktionsdurchsatz zu erhöhen und die Kosten zu senken, indem unnötige Kerne von älteren SQL-VMs, die auf langsameren Speicherebenen laufen, entfernt werden.

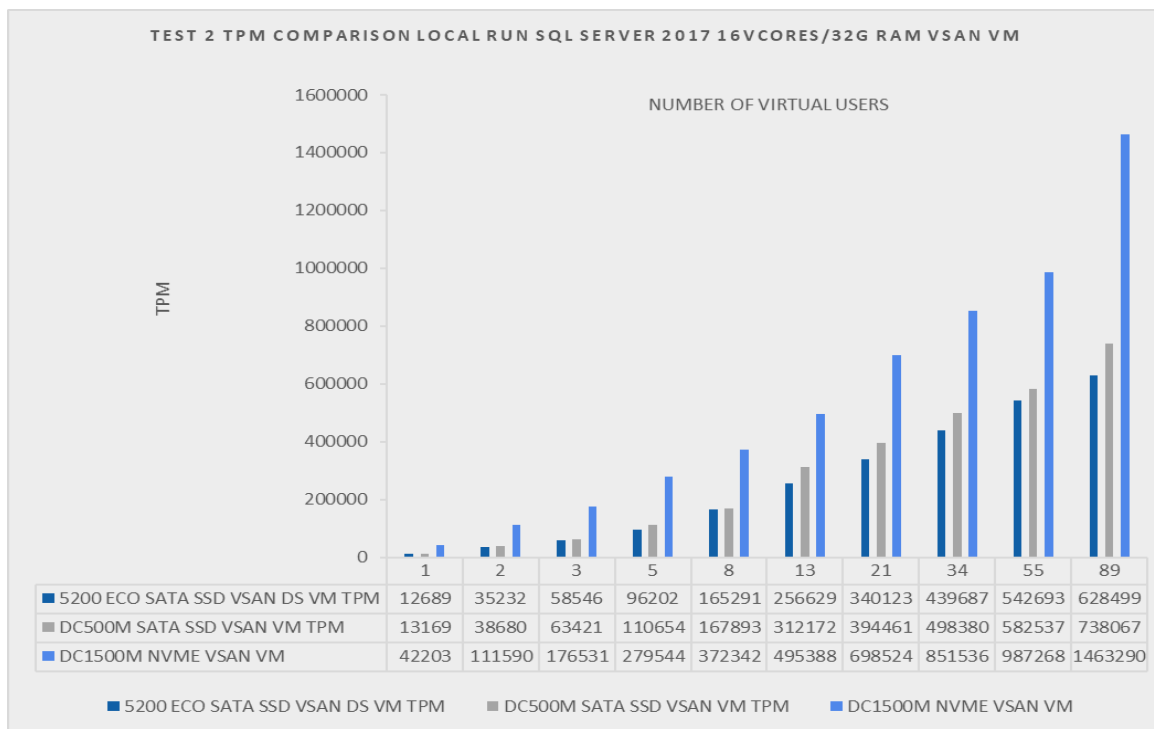


Abb. 3.2 Test 2: TPM-Vergleich NVME VS SATA VSAN-Datenspeicher

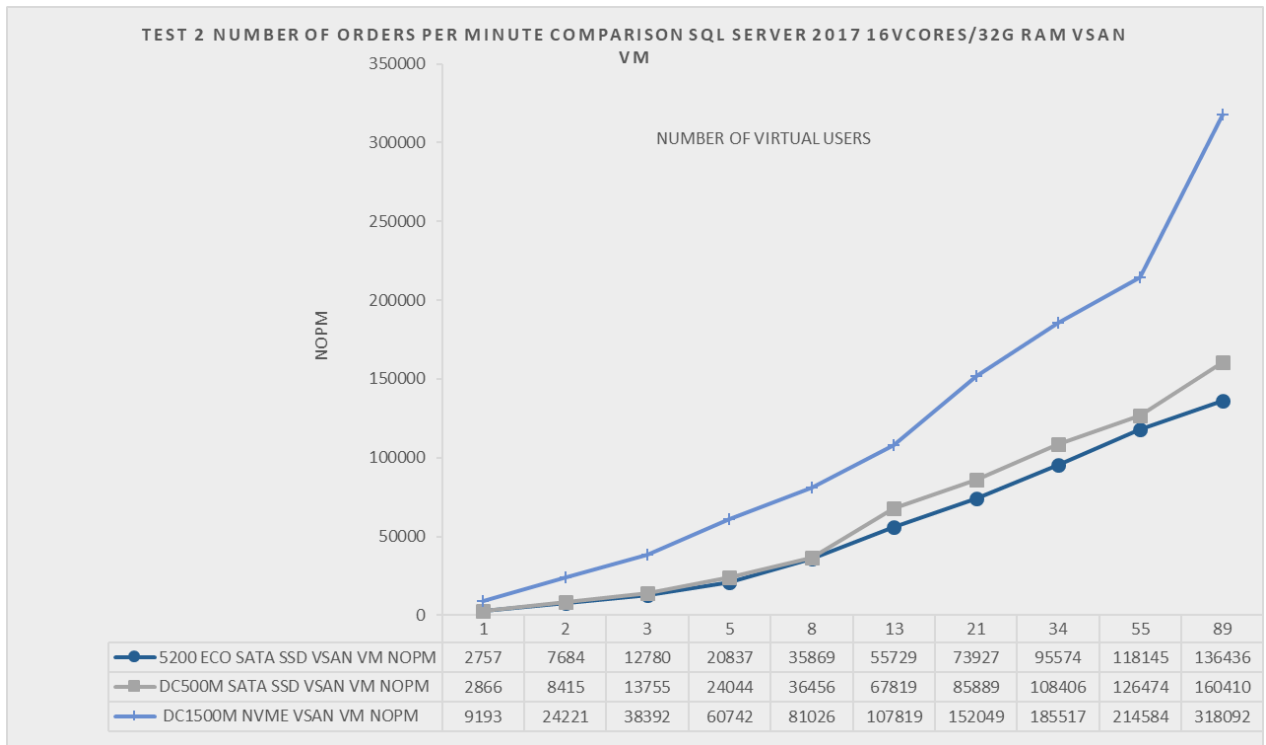


Abb. 3.3 Test 2: NOPM-Vergleich NVME VS SATA VSAN-Datenspeicher

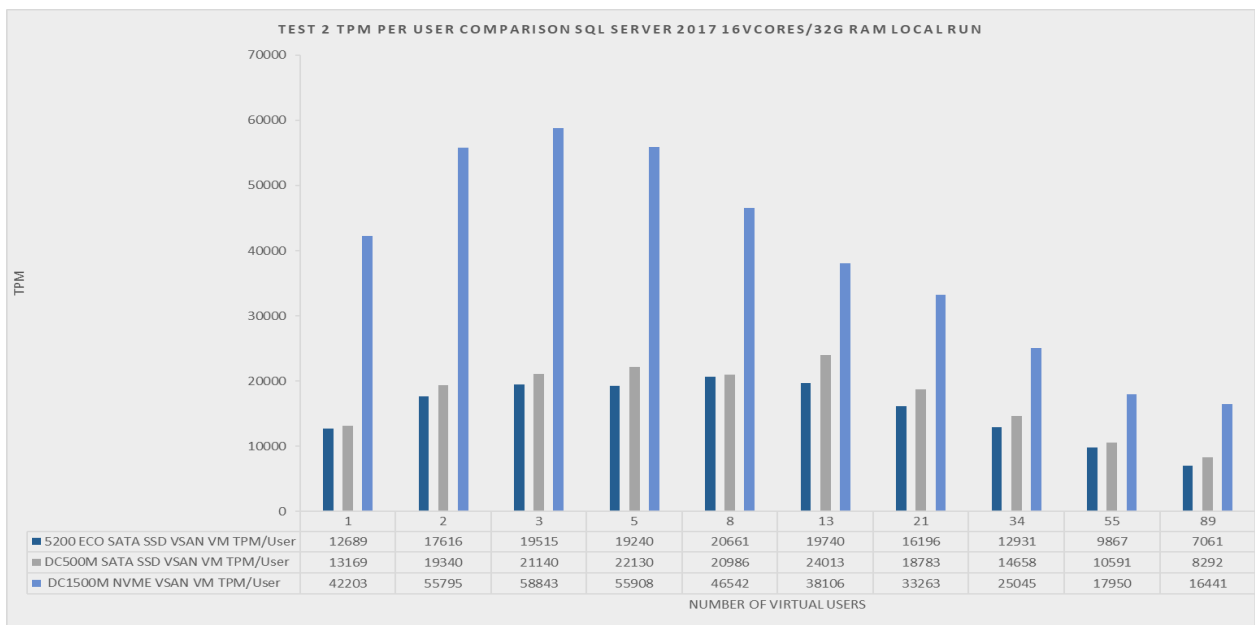


Abb. 3.4 Test 2: TPM-Vergleich pro Benutzer NVME VS SATA VSAN-Datenspeicher

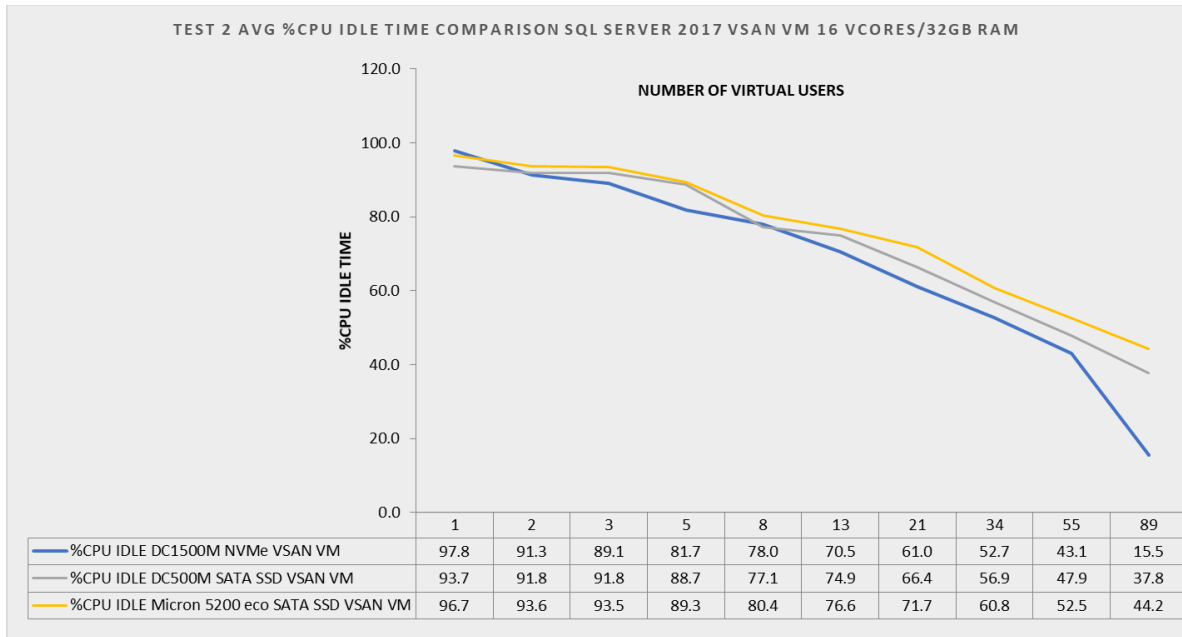


Abb. 3.5 Test 2: %CPU-Leerlauf-Vergleich NVME VS SATA VSAN-Datenspeicher

Test 3: SQL Server 2017 Leistungsvergleich DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN-Datenspeicher, größeres Schema und längere Testdauer

- NVMe vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3a: 3 DC1500M 960G FW S67F0103/Plattengruppe, 4 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), NVMe vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 3a) - SATA vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3b: 3 Micron 5200 ECO 1920G FW D1MU004/Plattengruppe, 3 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), SATA vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 3b)	
Test 3a Beschreibung	Test 3b Beschreibung
Virtuelle Festplatte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 2000-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 157GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 40vCores und 32GB RAM ausgestattet Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 89, 128 Es wurden eine 10-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 20 Minuten/Benutzersequenz gewählt. Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.	Virtuelle Festplatte, die vom Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt wurde. Es wurde ein 2000-Lager-Datenbankschema gewählt, das eine 157GB-Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 40vCores und 32GB RAM ausgestattet Die erstellte virtuelle Benutzersequenz war 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 89, 128 Es wurden eine 10-minütige Anlaufzeit und eine Testdauer von 20 Minuten/Benutzersequenz gewählt. Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.

Abbildung 4.1 Beschreibung von Test 3: SQL Server 2017 DB-Stresstest auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Dieser Test wurde als längerer Stresstest mit einer größeren Datenbankschema-Größe konzipiert, um unsere früheren Ergebnisse zu validieren und die Leistung beim TPCC-Benchmark für die getestete VM des SQL Server 2017-Systems Test-VM zu vergleichen, wenn er lokal auf zwei verschiedenen Datenspeichern ausgeführt wird, dem Kingston DC1500M Enterprise NVMe vSAN-Datenspeicher und dem Micron 5200 eco SATA SSD vSAN-Datenspeicher. Diesmal haben wir eine Schema-Größe von 2000 Lagerhäusern gewählt, was zu einer TPC-C-Datenbankgröße von 157GB führte. Wir verwendeten 40 virtuelle Kerne für jede SQL Server-

VM, um genügend CPU-Ressourcen zuzuweisen, damit mehr Transaktionen generiert werden und den Transaktionsdurchsatz zu sättigen, wiesen aber nur 32GB RAM zu, um den Test für E/A zu spezifizieren. Wir haben die virtuelle Benutzersequenz leicht angepasst, um eine Skalierung von 1–128 Benutzern zu ermöglichen, und haben alle virtuellen Benutzersequenzen viel länger laufen lassen (20 Minuten, mit einer 10-minütigen Anlaufzeit). Auf diese Weise konnten wir während der gesamten Dauer des Testlaufs Plattenlatenzmetriken erfassen.

Test 3, Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN-Datenspeicher, größeres Schema und längere Testdauer

Abbildung 4.2 und 4.3 zeigen die Transaktionen pro Minute (TPM) und die neuen Aufträge pro Minute (NOPM), die wir für die Tests 3a und 3b erzielt haben. Selbst bei einer längeren Laufzeit konnten sowohl die auf NVMe als auch die auf SATA-SSDs basierenden SQL Server 2017-VMs bei einem Anstieg der Anzahl der virtuellen Benutzer auf 128 skalieren, aber der Skalierungsgradient ist bei NVMe viel höher. Bei 89 Benutzern erreichten wir 1,84 Mio. TPM im Vergleich zu 0,96 TPM und 361.743 NOPM im Vergleich zu 184.451 NOPM für die SATA-SSD-basierte vSAN-SQL-VM. Dies ist eine 200%ige Steigerung von TPM/NOPM für den DC1500M NVMe-basierten vSAN-Datenspeicher im Vergleich zur Micron 5200 eco vSAN-basierten VM, mit der gleichen Anzahl von vCores und zugewiesenem DRAM.

Abbildung 4.4 und 4.5 zeigen einen Vergleich der durchschnittlichen virtuellen Plattenlatenz und der 99%igen virtuellen Plattenlatenz im Vergleich zur Anzahl der Benutzer, die mit Windows Perfmon auf den SQL NVMe- und SATA SSD-basierten gestützten vSAN-VMs erfasst wurden. Für jede virtuelle Benutzersequenz kann die DC1500M-basierte virtuelle Festplatte eine durchschnittliche Latenzzeit von <1ms aufrechterhalten, selbst wenn die Anzahl der Benutzer weiter ansteigt. Bei 89 virtuellen Benutzern hatte die DC1500M-basierte virtuelle Festplatte eine durchschnittliche Latenz von 0,92ms/IO im Vergleich zu 2,36ms/IO für die SATA-SSD-basierte virtuelle Platte – ein Anstieg der durchschnittlichen Latenz um 256% im Vergleich zu NVMe. Noch interessanter ist die QoS-Latenz von 99% – bei 89 Nutzern konnte die virtuelle DC1500M-Platte 99% aller IOs in 1,61ms abschließen, während die SATA-SSD-gestützte vdisk 99% alle IOs in 7,05ms abschloss – eine Steigerung von 437% im Vergleich zu NVMe. Der Latenzunterschied zwischen NVMe und SATA wird hier hervorgehoben, und da die DC1500M so konzipiert ist, dass sie bei anhaltenden OLTP-Workloads eine vorhersehbare QoS-Latenz aufrechterhält, sehen wir keine plötzlichen Latenzspitzen, selbst wenn die Anzahl der virtuellen Benutzer steigt, wodurch sich die parallelen IO-Anforderungen auf Blockebene erhöhen. Aus geschäftlicher Sicht bedeutet dies, dass ein Upgrade Ihrer VMware-Infrastruktur von SATA-SSDs auf Enterprise-NVMe-Laufwerke, wie die DC1500M, es Ihnen ermöglicht, Transaktionen zu skalieren und die Transaktionslatenz drastisch zu senken, wodurch Anwendungen schnell skaliert und die Kosten langfristig reduziert werden können.

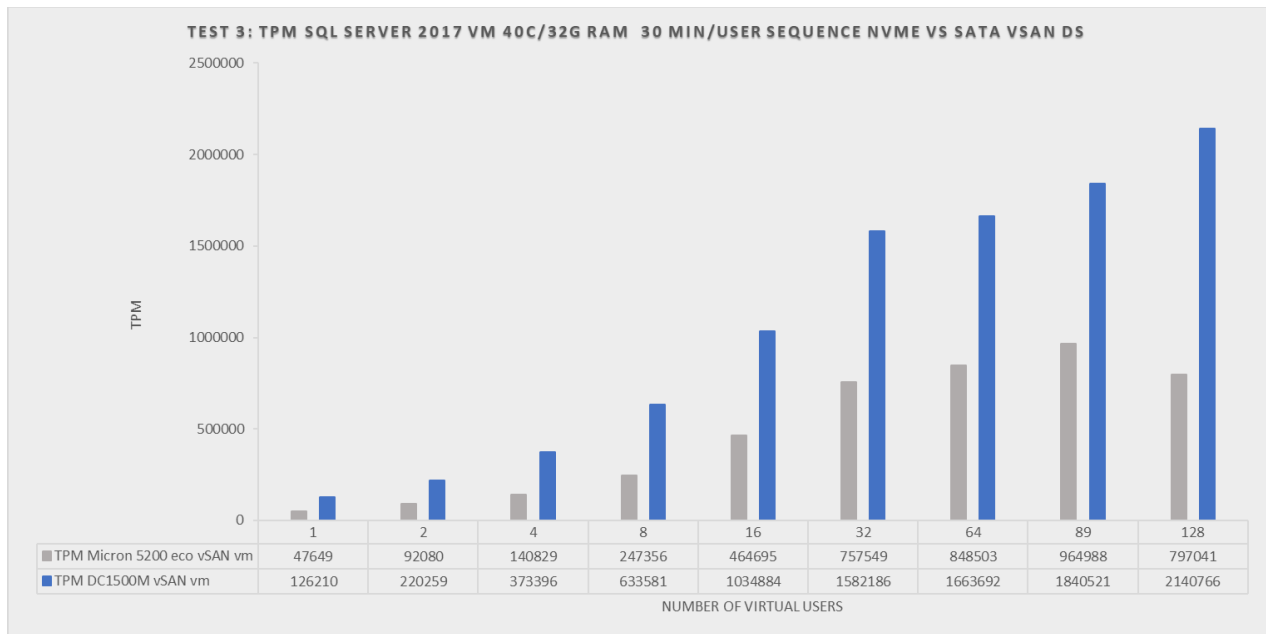


Abbildung 4.2 Test 3 TPM-Vergleich SQL Server 2017 DB-Stresstest auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

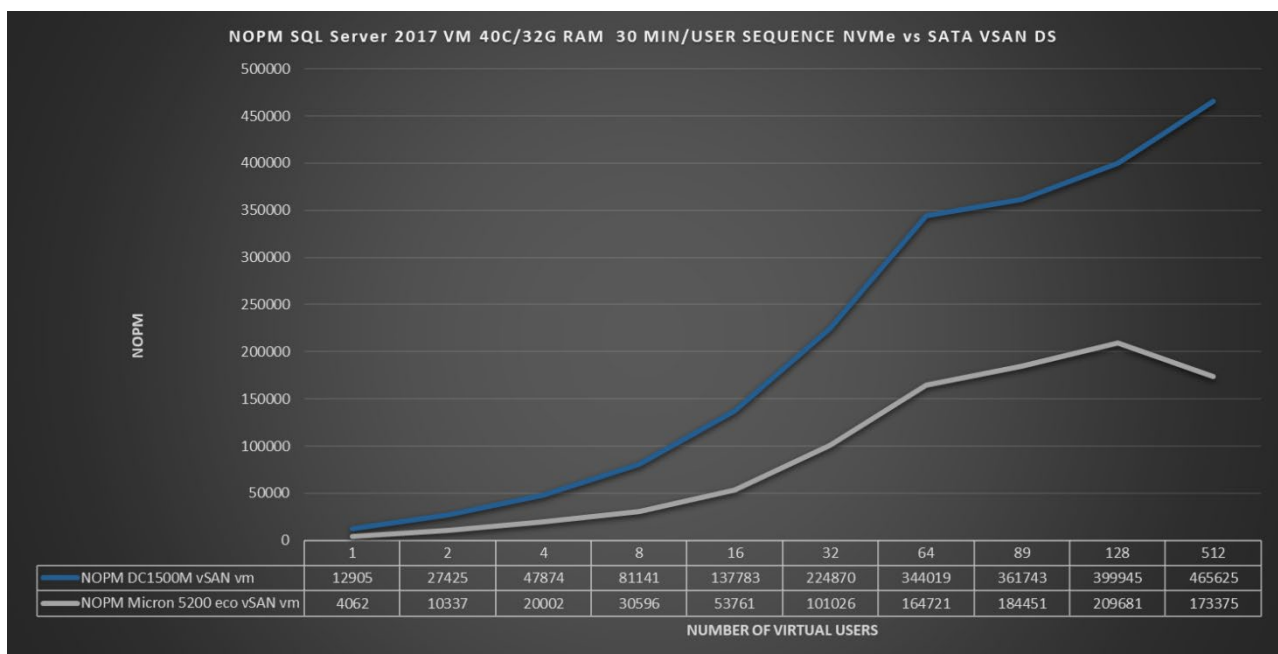


Abbildung 4.3 Test 3 TPM-Vergleich SQL Server 2017 DB-Stresstest auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

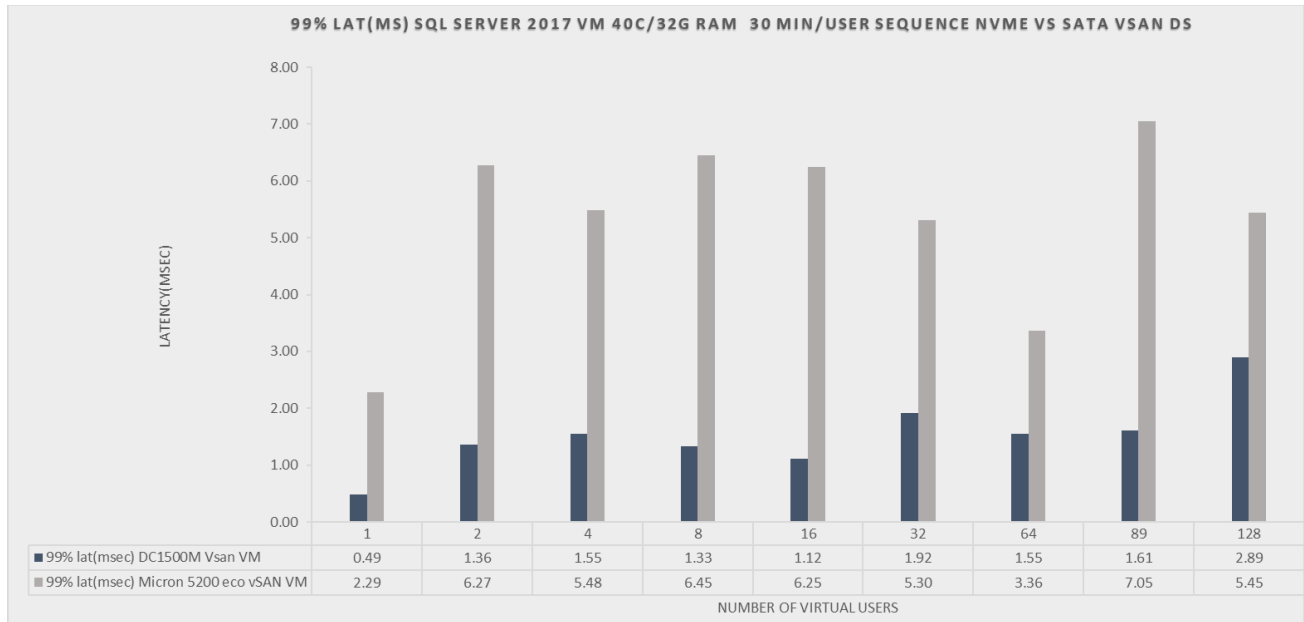


Abbildung 4.4 Test 3 Durchschnittliche Latenz (ms) Vergleich SQL Server 2017 DB-Stresstest auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

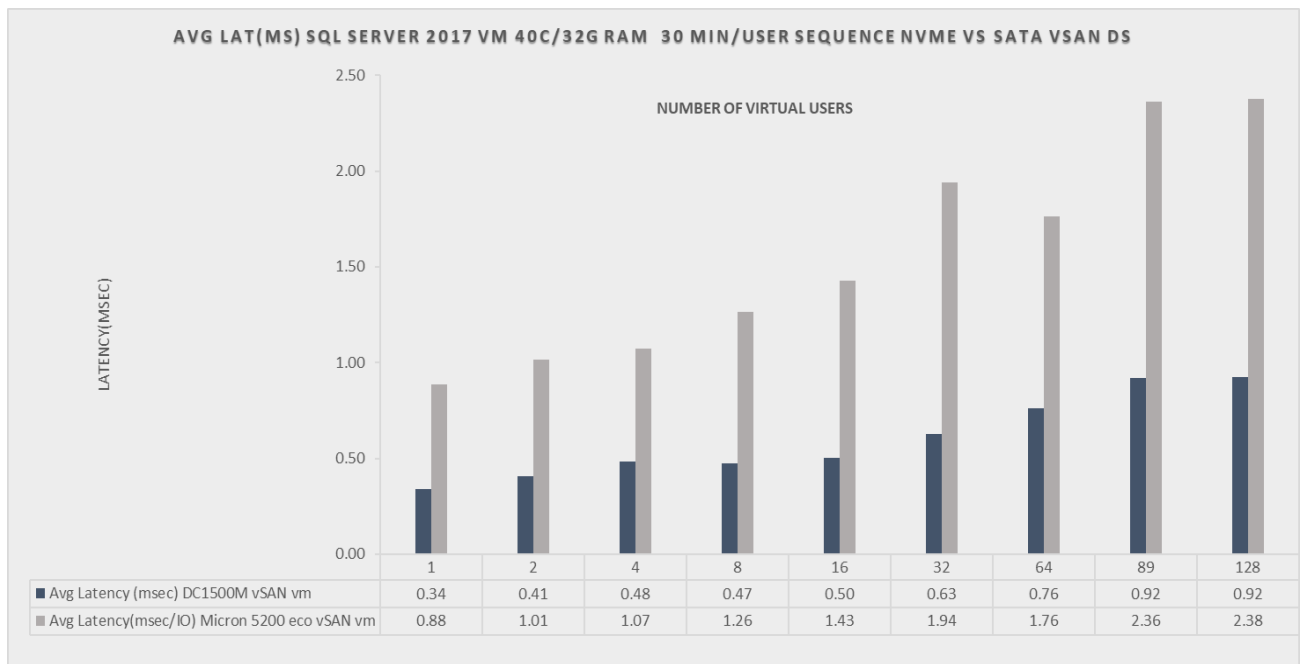


Abbildung 4.5 Test 3 99. % Latenz (ms) Vergleich SQL Server 2017 DB-Stresstest auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Test 4: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, Sicherungs- und Wiederherstellungsleistung, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN

- NVMe vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3a: 3 DC1500M 960G FW S67F0103/Plattengruppe, 4 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), NVMe vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 4a) - SATA vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3b: 3 Micron 5200 ECO 1920G FW D1MU004/Plattengruppe, 3 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), SATA vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 4b)	
Test 4a Beschreibung	Test 4b Beschreibung
Virtuelle Festplatte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 2000 Lagerhäusern erstellt, das eine 157GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet 3 Zyklen eines Sicherungs-/Wiederherstellungsskripts wurden ausgelöst, um die tpcc-Datenbank zu sichern und wiederherzustellen, und die Leistungsmetriken wurden mit Windows Performance Monitor aufgezeichnet Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.	Virtuelle Festplatte, die vom Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt wurde. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, das eine 157GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet 3 Zyklen eines Sicherungs-/Wiederherstellungsskripts wurden ausgelöst, um die tpcc-Datenbank zu sichern und wiederherzustellen, und die Leistungsmetriken wurden mit Windows Performance Monitor aufgezeichnet Der Test wurde lokal auf der SUT VM durchgeführt.

Abbildung 5.1 Beschreibung von Test 4: SQL Server 2017 Vergleich der Sicherungs-/Wiederherstellungsleistung auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Die Sicherungs- und Wiederherstellungsvorgänge der SQL Datenbank sind eine gute Möglichkeit, den Durchsatz und die Latenz der zugrunde liegenden virtuellen Platte zu messen. Wir wollten eine Basislinie für die Durchsatz- und Latenzmetriken einer einzelnen NVMe- und einer SATA-basierten vSAN-VM erstellen, indem wir die Metriken der virtuellen Festplatte mit Windows Performance Monitor erfasst haben, wenn die TPC-C-Sicherungs-/Wiederherstellungsvorgänge ausgelöst wurden.

Test 4: Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, Sicherungs- und Wiederherstellungsleistung, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN

Abbildung 5.2-5.4 zeigt den sekundengenauen Durchsatz und die Latenz, die von unserem Windows Performance Monitor-Skript für einen der Sicherungs-/Wiederherstellungszyklen für Test 4a) und Test 4b) erfasst wurden. Die auf dem DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher basierende SQL Server-VM schloss den TPCC-Datenbank-Backup-Vorgang in 265 Sekunden ab und erreichte dabei einen durchschnittlichen Durchsatz von 593MB/s und eine durchschnittliche Latenz von 1,46ms/IO. Der TPCC-Datenbankwiederherstellungsvorgang wurde in 129 Sekunden abgeschlossen, mit einer durchschnittlichen BW von 1,4GB/s und einer durchschnittlichen Latenz von 2,65ms/IO. Im Vergleich zur Micron 5200 eco vSAN-basierten VM wurde der Sicherungsvorgang 1,5 Mal schneller und der Wiederherstellungsvorgang 2,15 Mal schneller auf der NVMe vSAN-basierten SQL-VM abgeschlossen.

Normalerweise werden Sicherungs- und Wiederherstellungsvorgänge außerhalb der Geschäftszeiten durchgeführt, um Auswirkungen auf die Produktions-VMs zu vermeiden. Das ist allerdings nicht immer der Fall. Wenn SQL-Sicherungs- oder -Wiederherstellungsvorgänge während der Hauptgeschäftszeiten durchgeführt werden, sollten sie so schnell wie möglich abgeschlossen werden, um die Auswirkungen von Latenzzeiten auf Benutzer zu vermeiden, die Transaktionen mit der Tier-1-Anwendung durchführen, die denselben vSAN-Datenspeicher nutzt. Wenn Sie Ihre SQL-Datenbanken auf NVMe-basierte vSAN-Datenspeicher migrieren, können Sie diese Auswirkungen abfedern. Selbst wenn die Sicherungs-/Wiederherstellungsvorgänge außerhalb der Geschäftszeiten durchgeführt werden, führt die schnellere Fertigstellung zu weniger Ausfallzeiten für Tier-1-Datenbanken, die dieselben Ressourcen teilen.

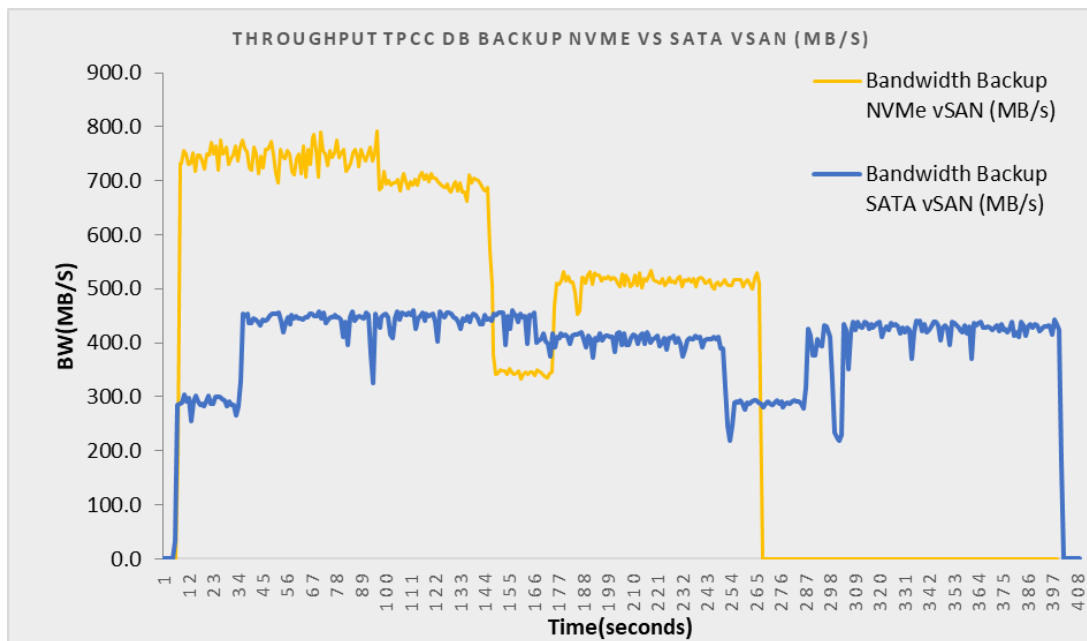


Abbildung 5.2 Durchsatzvergleich SQL Server 2017 TPCC DB-Backup Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher (MB/s)

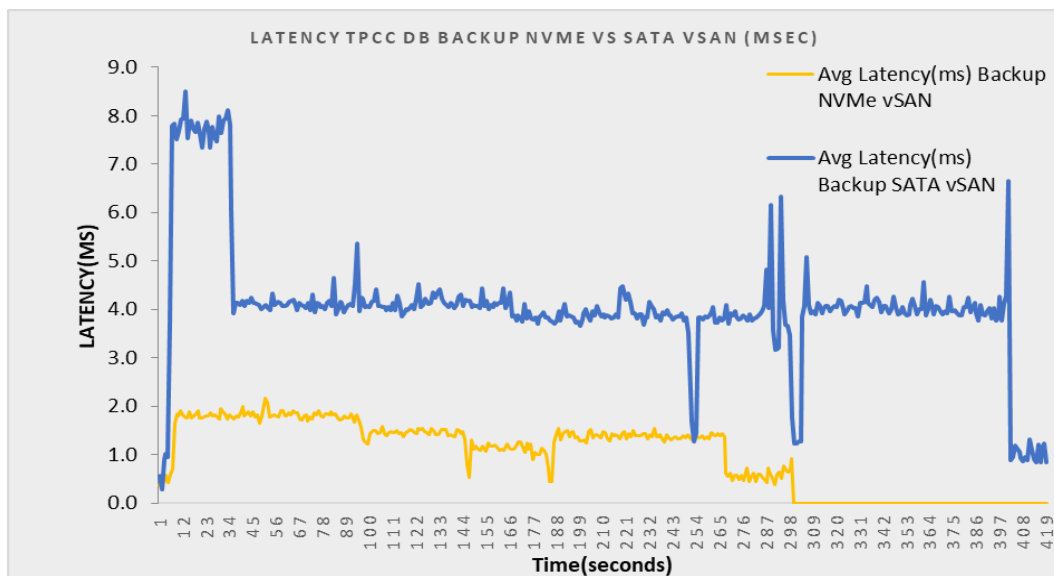


Abbildung 5.3 Vergleich der durchschnittlichen Latenzzeit (ms) SQL Server 2017 TPCC DB-Backup Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

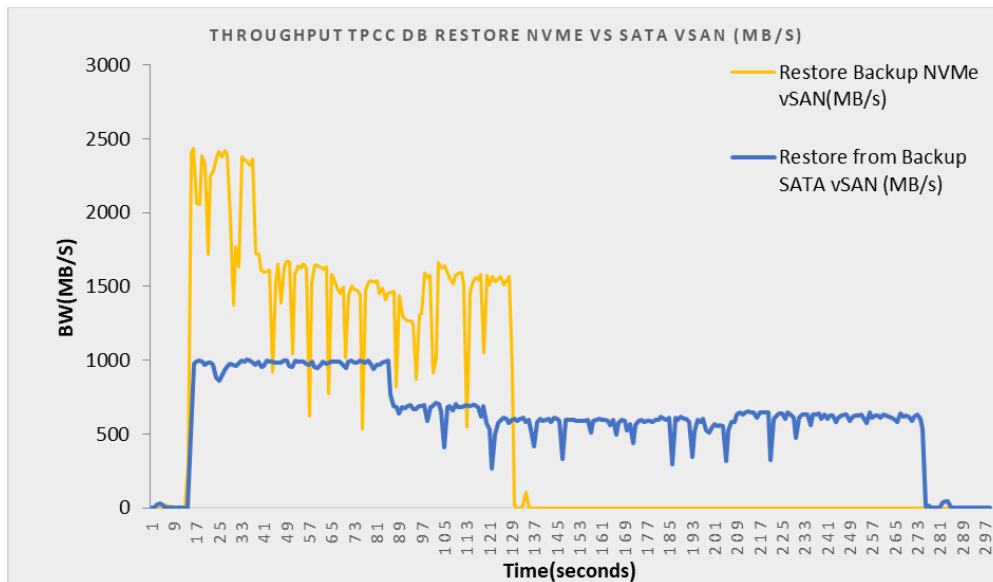


Abbildung 5.4 Durchsatzvergleich SQL Server 2017 TPCC DB-Wiederherstellung Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher (MB/s)

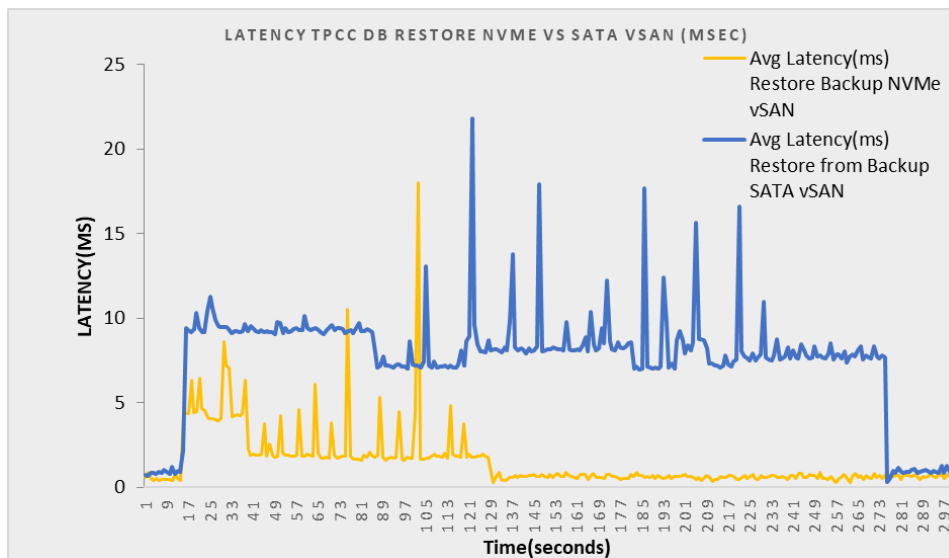


Abbildung 5.5 Vergleich der Latenz (ms) von SQL Server 2017 TPCC DB-Wiederherstellung Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

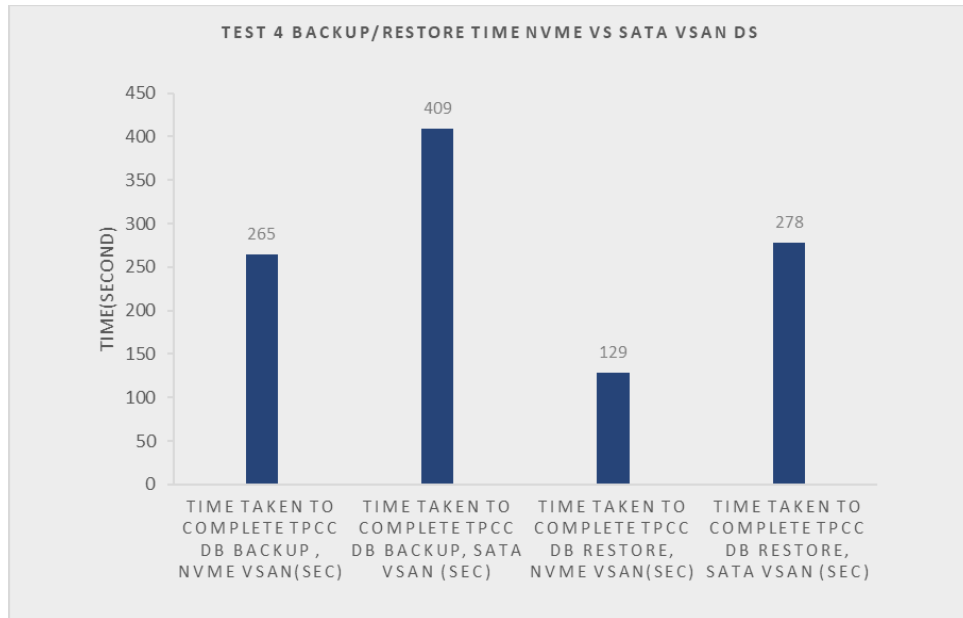


Abbildung 5.6 Zeit für den Abschluss des Vorgangs SQL Server 2017 TPCC DB-Backup/Wiederherstellung Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher (sek.)

Test 5: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, „Noisy Neighbor-Test“, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN

- NVMe vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3a: 3 DC1500M 960G FW S67F0103/Plattengruppe, 4 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), NVMe vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 5a) - SATA vSAN-Datenspeicher, Speicherkonfiguration für Test 3b: 3 Micron 5200 ECO 1920G FW D1MU004/Plattengruppe, 3 Plattengruppen insgesamt (1 pro Server), SATA vSAN-Testumgebung. SQL Server 2017 mit Server 2019 Datacenter Gastbetriebssystem. (Test 5b)			
Test 5a Beschreibung	Test 5b Beschreibung	Test 5c Beschreibung	Test 5d Beschreibung
SQL 2017 VM Virtuelle Platte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, das eine 100GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet Das zu testende SUT wurde 11 Mal geklont und 3 SUT VMs/physikalischer Server wurden zugewiesen (insgesamt 12 SUT VMs) Der Test wurde so konfiguriert, dass 89 virtuelle Benutzer mit 30 Minuten Hochlaufzeit und 300 Minuten Testdauer auf jeder SUT VM ausgeführt werden Der Test wurde auf allen 12 SUT-VMs parallel gestartet	SQL 2017 Virtuelle Platte, vom Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, das eine 100GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet Das zu testende SUT wurde 8 Mal geklont und 3 SUT VMs/physikalischer Server wurden zugewiesen (insgesamt 9 SUT VMs) Der Test wurde so konfiguriert, dass 89 virtuelle Benutzer mit 30 Minuten Hochlaufzeit und 300 Minuten Testdauer auf jeder SUT VM ausgeführt werden Der Test wurde auf allen 9 SUT-VMs parallel gestartet	SQL 2017 VM Virtuelle Platte, die vom DC1500M vSAN-Datenspeicher in der NVMe-Testumgebung bereitgestellt wurde. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, das eine 100GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet Das zu testende SUT wurde 11 Mal geklont und 2 VMs/physischer Server wurden zugewiesen (insgesamt 8 SUT VMs), um die HDB-Arbeitslast auszuführen. Der Test wurde so konfiguriert, dass 89 virtuelle Benutzer mit 30 Minuten Hochlaufzeit und 300 Minuten Testdauer auf jeder SUT VM ausgeführt werden. 1 VM/physischer Server hatte eine 1200-Lager-Tpcc-Schema-Größe (100GB), und ein Backup-Skript wurde alle 100 Sekunden ausgelöst (insgesamt 4 VMs), während die Arbeitslast auf den anderen SUT-VMs 10 Zyklen lang lief 8 SUT-VMs mit HDB-Arbeitslast. 4 VMs, die ein Backup-Skript ausführen. Der Test wurde auf allen 12 VMs parallel gestartet.	SQL 2017 VM Virtuelle Festplatte, die vom Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher in der SATA-Testumgebung bereitgestellt wurde. Auf dem SUT wurde ein Datenbankschema mit 1200 Lagerhäusern erstellt, das eine 100GB große Datenbank darstellt. Das zu testende System VM (SUT) wurde mit 16vCores und 32GB RAM ausgestattet Das zu testende SUT wurde 8 Mal geklont und 2 VMs/physischer Server wurden zugewiesen (insgesamt 6 SUT VMs), um die HDB-Arbeitslast auszuführen. Der Test wurde so konfiguriert, dass 89 virtuelle Benutzer mit 30 Minuten Hochlaufzeit und 300 Minuten Testdauer auf jeder SUT VM ausgeführt werden. 1 VM/physischer Server hatte eine 1200-Lager-Tpcc-Schema-Größe (100GB), und ein Backup-Skript wurde alle 100 Sekunden ausgelöst (insgesamt 4 VMs), während die Arbeitslast auf den SUT-VM lief 6 SUT-VMs mit HDB-Arbeitslast. 3 VMs, die ein Backup-Skript ausführen. Der Test wurde auf allen 9 VMs parallel gestartet.

Abbildung 6.1 Beschreibung von Test 5: SQL Server 2017 Realistischer Noisy Neighbor-Test auf Micron 5200 eco SATA und DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

Unser Ziel bei diesem Test war es, ein realistisches Szenario zu simulieren, in dem unangenehme Arbeitslasten (in diesem Fall verwenden wir TPCC-Datenbank-Backup-Operationen) auf VMs, die sich denselben vSAN-Datenspeicher mit SQL-Server-VMs teilen, auf denen Produktionsarbeitslasten ausgeführt werden (in diesem Experiment fungiert der TPCC-Benchmark als Produktionsarbeitslast), und die Gesamtauswirkungen auf die Leistung zu beurteilen, indem wir die TPCC-Benchmark-Ergebnisse bewerten und wichtige Speichermetriken analysieren, die von Perfmon und dem vSAN Performance Monitor gesammelt werden.

In den Tests 5a) und 5b) erstellen wir eine Ausgangslage, indem wir den TPCC-Benchmark auf allen VMs parallel laufen lassen, ohne dass Backup-Vorgänge durchgeführt werden. Wir verwenden 3 SQL-VMs pro physischem Server, die sowohl auf den NVMe- als auch auf den SATA-vSAN-Clustern ausgeführt werden, sodass die Gesamtzahl 12 SUT-VMs für NVMe und 9 SUT-VMs für SATA beträgt. Unsere Schemagröße für diesen Test betrug 1200 Lager, was einer TPC-C-Datenbankgröße von circa 100GB entspricht. Wir haben die TPCC-Arbeitslast mit 89 Benutzern 300 Minuten lang und mit einer 30-minütigen Anlaufzeit ausgeführt.

In den Tests 5c) und 5d) haben wir die TPC-C-Datenbank auf allen SUT-VMs wiederhergestellt. Dann lösten wir ein Skript aus, um 10 Sicherungszyklen der TPC-C-Datenbank auf 4 VMs für den NVMe-Cluster und 3 VMs für den SATA-Cluster auszuführen, während wir gleichzeitig denselben TPC-C-Benchmark auf den verbleibenden SUT-VMs laufen ließen. Das bedeutet, dass auf dem NVMe vSAN-Cluster 8 VMs die TPC-C-Arbeitslast und 4 VMs die Backup-Arbeitslast parallel ausführten. In der Zwischenzeit liefen auf dem SATA vSAN-Cluster 6 VMs mit dem TPC-C-Workload und 3 VMs mit dem TPC-C-Datenbank-Backup-Workload parallel.

Test 5, Ergebnisse: SQL Server 2017 Leistungsvergleich, „Noisy Neighbor-Test“, DC1500M NVMe vs. Micron 5200 eco SATA vSAN

Abbildung 6.2 und 6.3 zeigen die Transaktionen pro Minute (TPM) und die neuen Aufträge pro Minute (NOPM), die wir für die Tests 5a und 5b erzielt haben. Mit 89 virtuellen Benutzern, die jeweils auf 12 DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher-basierten SQL Server-VMs liefen, konnten wir einen durchschnittlichen TPM-Wert von 523.516 und einen durchschnittlichen NOPM-Wert von 113.812 pro VM erreichen, verglichen mit einem durchschnittlichen TPM-Wert von 269.320 und 58.544 NOPM pro VM bei 9 SQL-VMs, die auf einem Micron 5200 eco SATA-Cluster basierten. Betrachtet man die vom vSAN-Performance-Monitor erfassten IOPS- und Latenzmetriken (Abbildung 6.4 und 6.5 unten), so ergibt sich auf Blockebene eine IO von 120.000 Lese-IOPS und 60.000 Schreib-IOPS auf dem NVMe-Cluster mit einer Latenz von 800µs für Lese-/Schreibvorgänge und 50.000 L/20.000 S auf dem SATA-vSAN-Cluster mit einer durchschnittlichen Leselatenz von 3,8ms und einer durchschnittlichen Schreiblatenz von 5,5ms. Dies unterstreicht erneut den Leistungsunterschied zwischen NVMe und SATA und verdeutlicht die Fähigkeit der DC1500M NVMe-gestützten virtuellen Platte, parallele Anfragen aufzunehmen und sie mit einer viel schnelleren Round-Trip-Latenz zu verarbeiten.

Abbildung 6.5 und 6.6 zeigen die Transaktionen pro Minute (TPM) und die neuen Aufträge pro Minute (NOPM), die wir für die Tests 5c und 5d erzielt haben. Mit 89 virtuellen Benutzern, die jeweils auf 8 DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher-basierten SQL Server-VMs liefen, während VM-Backups parallel auf 4 VMs ausgelöst wurden, konnten wir durchschnittliche TPM von 575.933 und durchschnittliche NOPM von 125.206 erreichen, verglichen mit durchschnittlich 351.258 TPM und 76.355 NOPM bei 6 SQL-VMs, auf denen die TPCC-Arbeitslast ausgeführt wurde, während VM-Backups parallel auf 3 VMs auf den SATA-vSAN-SQL-VMs ausgelöst wurden, die durch auf Micron 5200 eco SATA basierten. Für ein vollständiges Bild müssen wir die Latenz- und Speichermetriken sowohl des SATA- als auch des NVMe-vSAN-Clusters analysieren und uns ansehen, wie schnell die Backups auf beiden Clustern abgeschlossen wurden.

Abbildung 6.8 und 6.9 zeigen die vSAN IOPS- und Latenzmetriken, die vom NVMe- und SATA-Cluster mit vSAN Performance Monitor für Test 5c und 5d erfasst wurden. Das Sicherungsskript wurde so konfiguriert, dass es alle 100 Sekunden für 10 Zyklen ausgeführt wird. Wir können sehen, wie sich die ausgelösten VM-Backups auf die IOPS sowie die Lese- und Schreiblatenz des NVMe- und SATA-vSAN-Clusters auswirken. Die Auswirkungen auf die Latenzzeit sind jedoch unterschiedlich. Die maximale Lese-/Schreib-IO-Latenz des NVMe-Clusters stieg auf 4ms/IO, während die durchschnittliche Lese-/Schreiblatenz bei 2,5ms/IO lag, während die SATA-vSAN-Latenz auf 9ms/IO stieg und durchschnittlich 7,3ms/IO für Lese- und 4,9ms/IO für Schreib-IO betrug. Dies ist die Latenzzeit, die der Endbenutzer spürt, wenn er versucht, eine Bestellung aufzugeben, seinen Warenkorb zu aktualisieren oder Produkte aus anderen Lagern anzuzeigen.

Abbildung 6.11 zeigt die Zeit, die für den Abschluss der Sicherungszyklen auf einer der SQL Server DC1500M vSAN-basierten VMs und einer der Micron 5200 eco vSAN-basierten SQL-VM benötigt wurde, aber ohne die Wartezeit zwischen den Sicherungszyklen. 10 Backups dauerten 73 Minuten – durchschnittlich 7 Minuten/Backup für die SQL Server NVMe vSAN VM und 10 Backups dauerten 122,15 Minuten für die SQL Server SATA SSD-basierten vSAN VM – durchschnittlich 12 Minuten/Backup. Die auf DC1500M vSAN basierende VM schloss die Sicherungszyklen 1,67x schneller ab als die auf Micron 5200 eco vSAN basierende VM. Dies ist ein empirischer Beweis dafür, dass die Aufrüstung Ihrer VMware-Infrastruktur auf DC1500M NVMe-basierte Datenspeicher das Noisy Neighbor-Problem entschärft, indem unerwünschte Vorgänge wie Datenbank-Backups viel schneller abgeschlossen werden können, und aufgrund der enormen Latenz- und Durchsatzfähigkeit kann NVMe die Latenzauswirkungen dieser unangenehmen Arbeitslasten auf Tier-1-Anwendungen auffangen.

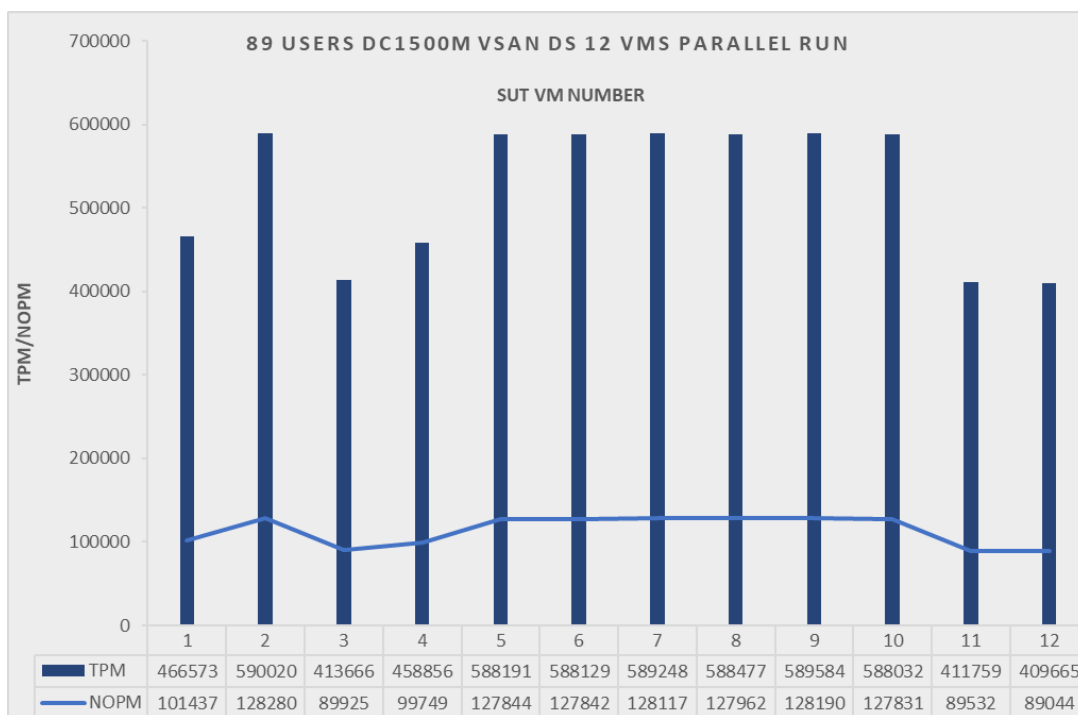


Abbildung 6.2 Test 5a TPM SQL Server 2017 300 min 12 VM Parallellauf, 89 virtuelle Benutzer, DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

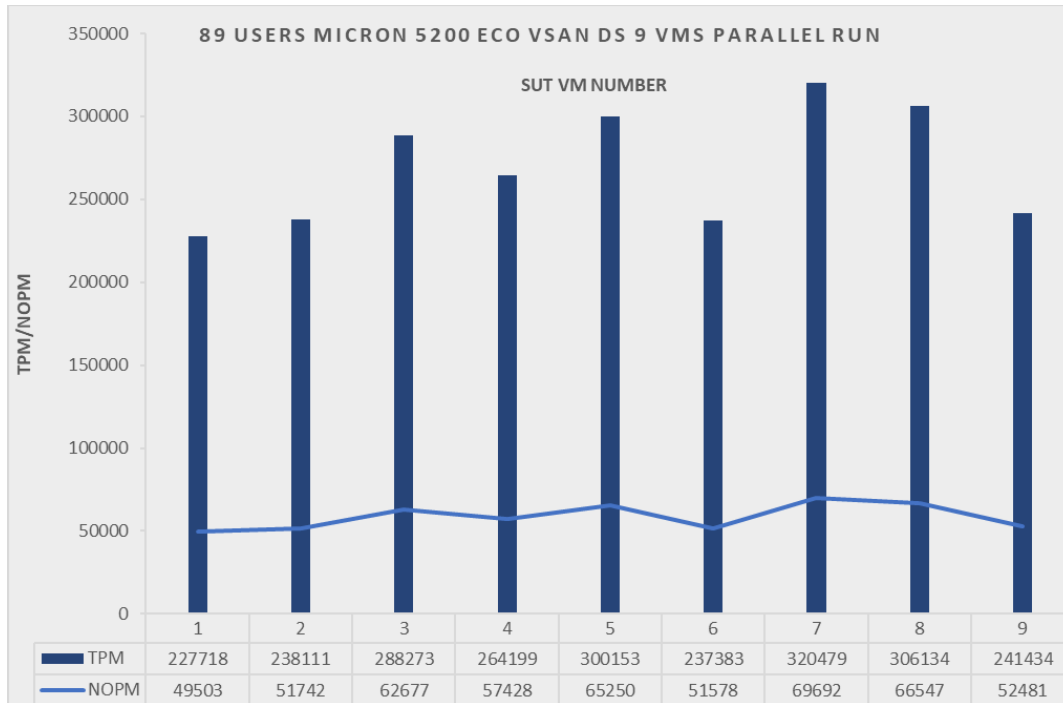


Abbildung 6.3 Test 5b TPM SQL Server 2017 300 min 12 VM Parallellauf, 89 virtuelle Benutzer, DC1500M NVMe SSD vSAN-Datenspeicher

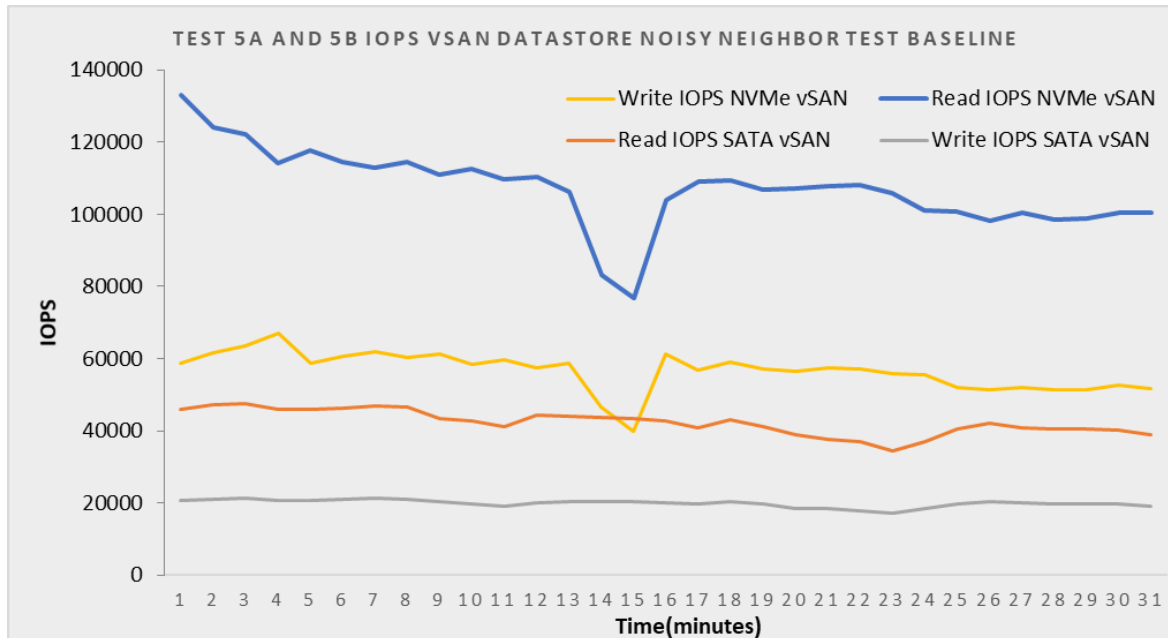


Abbildung 6.4 Test 5a und 5b Noisy Neighbor-IOPS, DC1500M NVMe und Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher

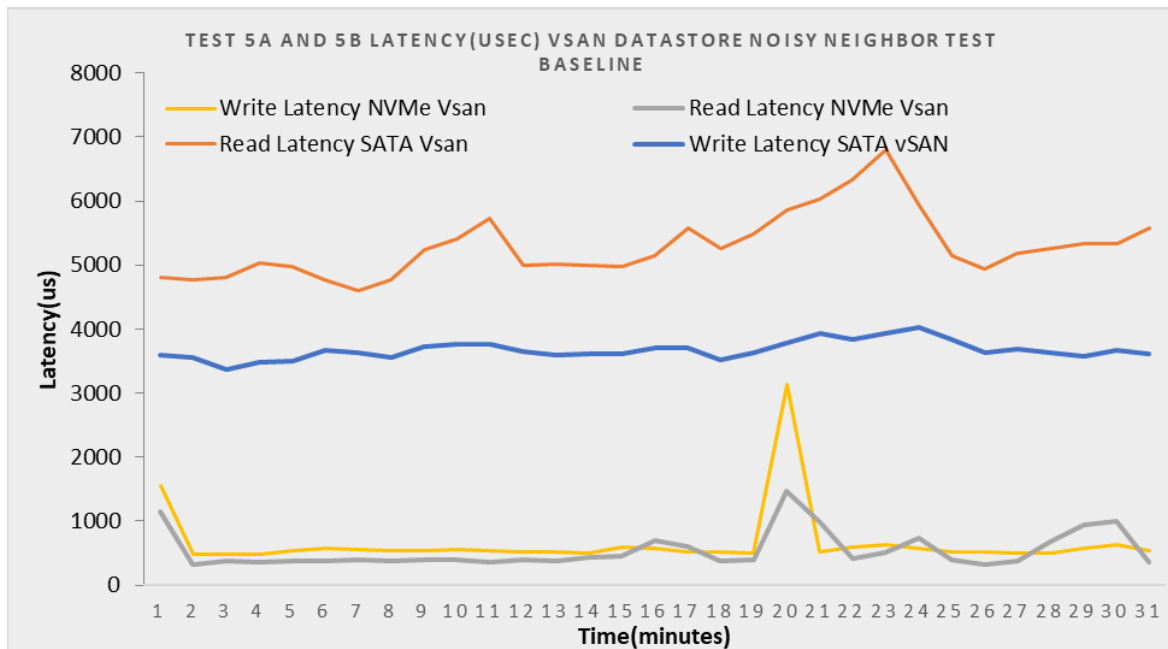


Abbildung 6.5 Test 5a und 5b Noisy Neighbor-Latenz, DC1500M NVMe und Micron 5200 eco vSAN-Datenspeicher

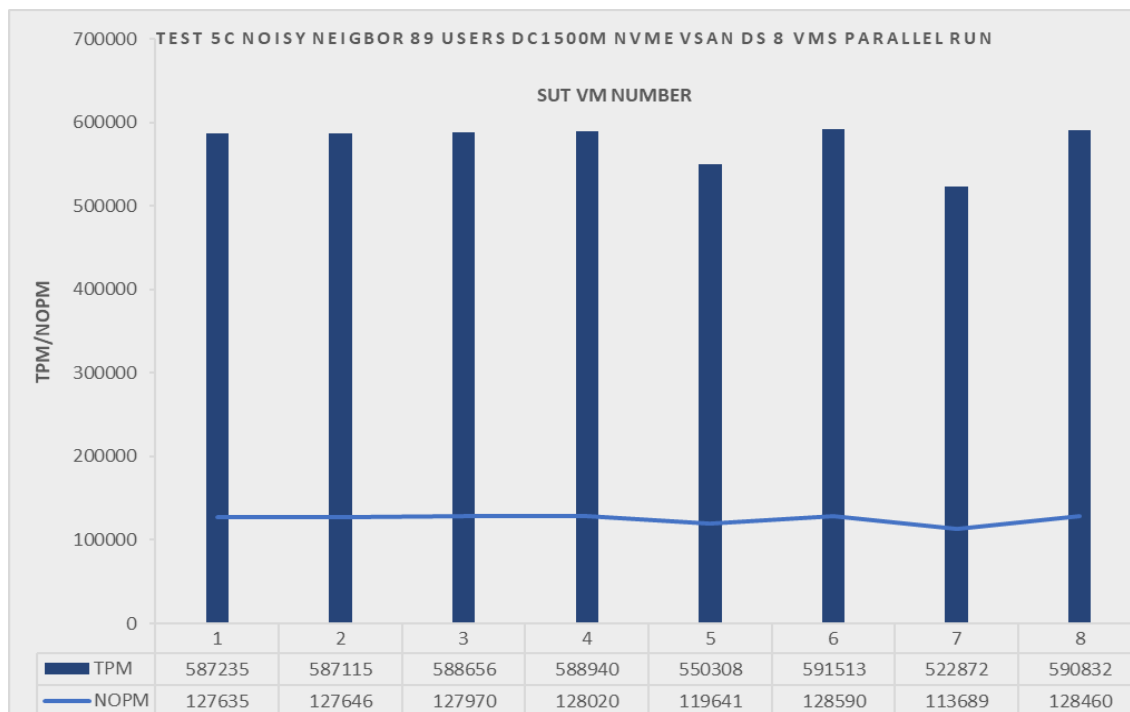


Abbildung 6.6 Test 5c TPM, Noisy Neighbor-Implementierung 8 VM Parallellauf DC1500M NVMe vSAN-Datenspeicher

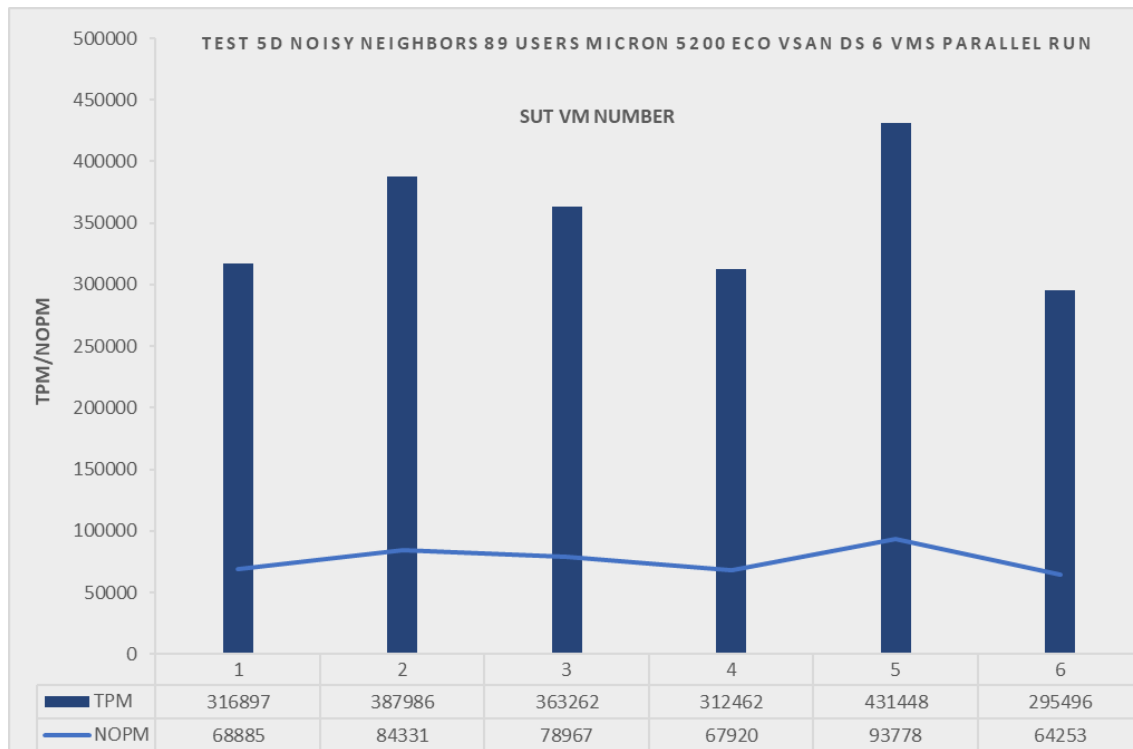


Abbildung 6.7 Test 5d TPM, Noisy Neighbor-Implementierung 6 VM Parallellauf Micron 5200 eco vSAN -Datenspeicher

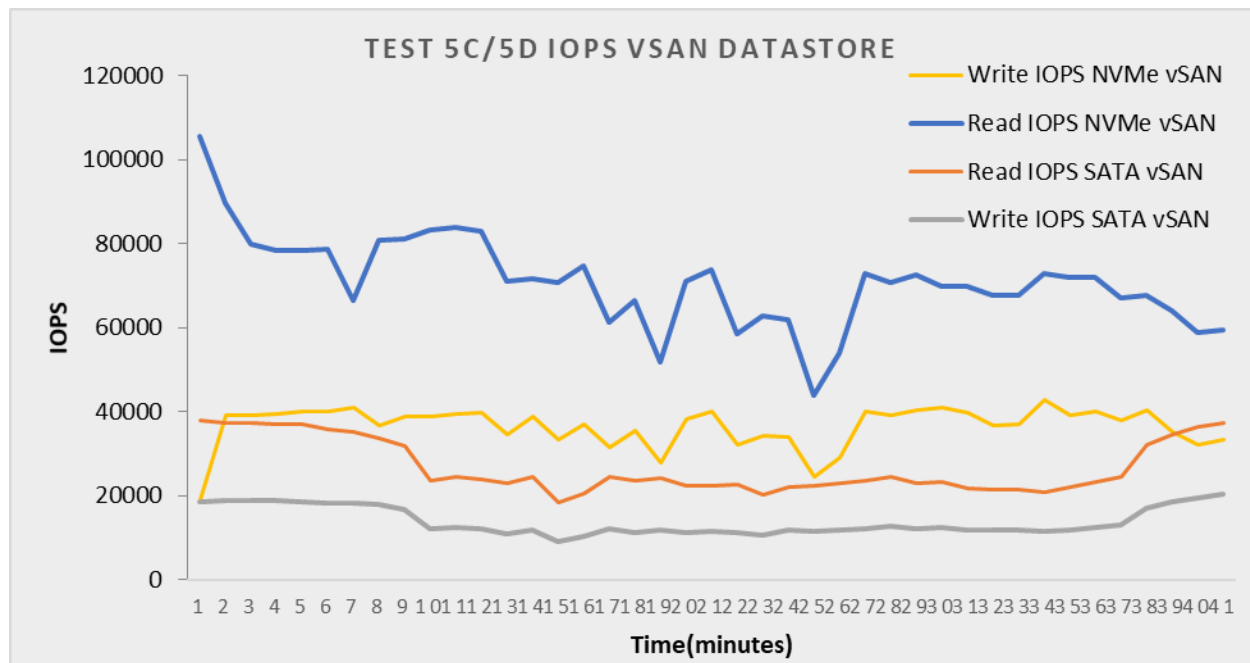


Abbildung 6.8 Test 5c/5d IOPS, Noisy Neighbor-Implementierung NVMe vs. SATA SSD vSAN-Datenspeicher

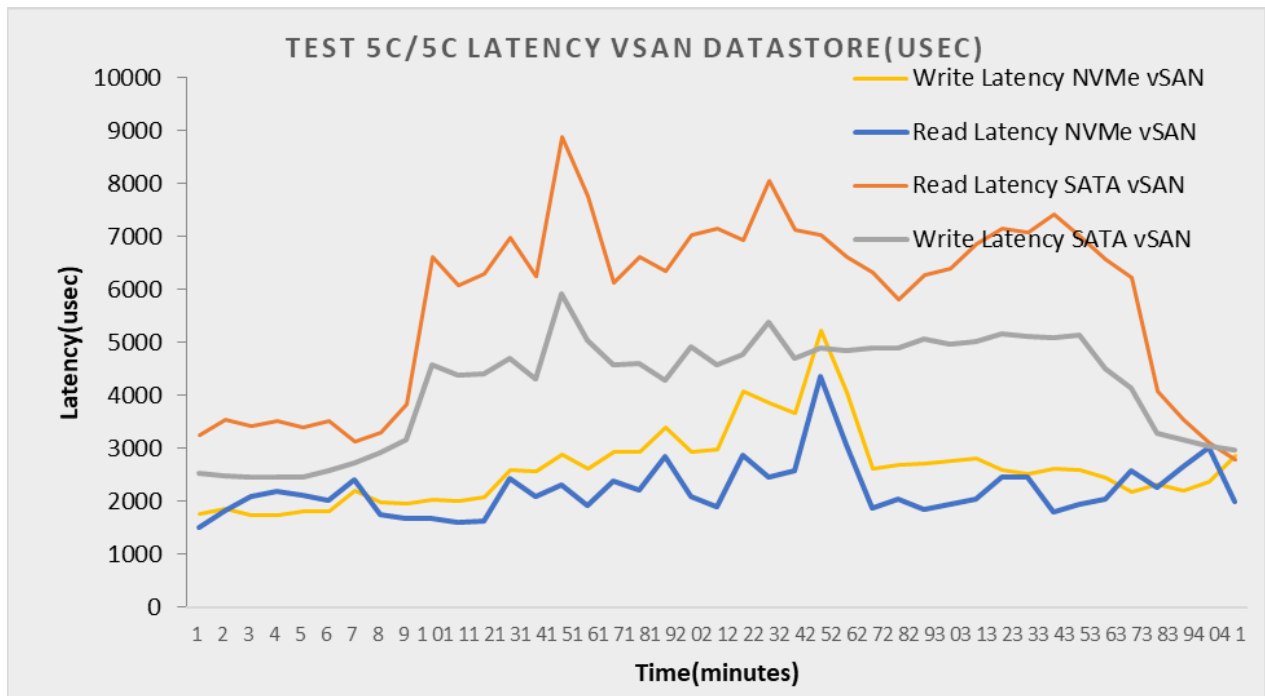


Abbildung 6.9 Test 5c/5d Latenz, Noisy Neighbor-Implementierung NVMe vs. SATA SSD vSAN-Datenspeicher

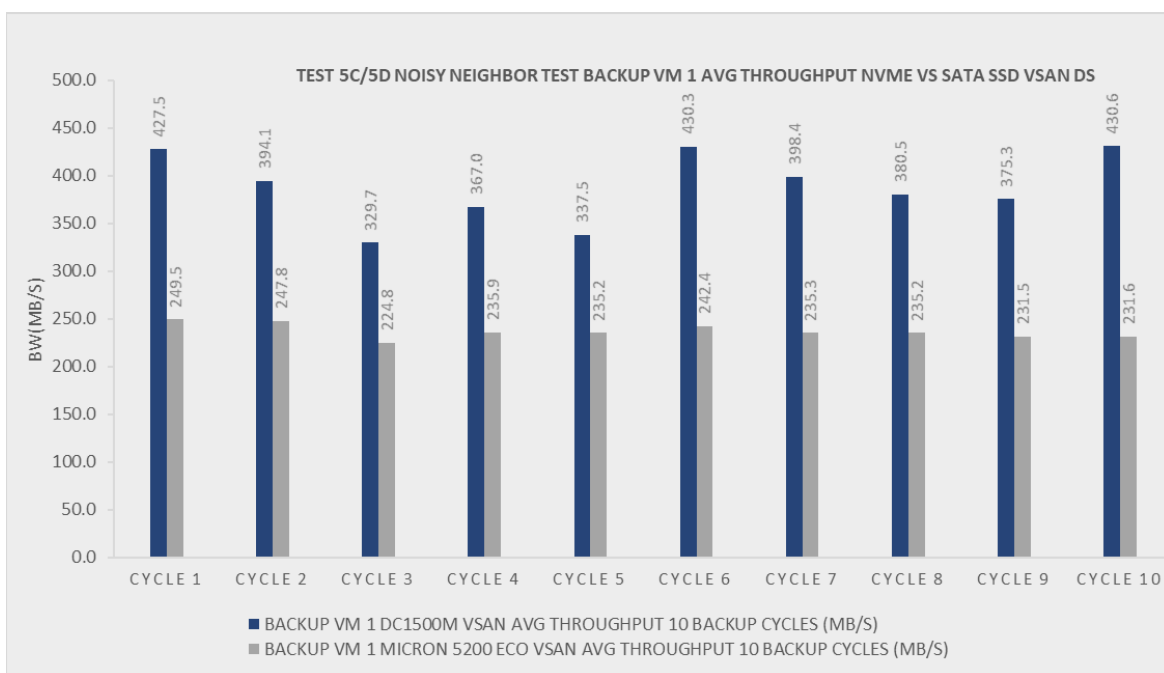


Abbildung 6.10 Test 5c/5d Backup-Durchsatz der VM, Noisy Neighbor-Implementierung NVMe vs. SATA SSD vSAN-Datenspeicher

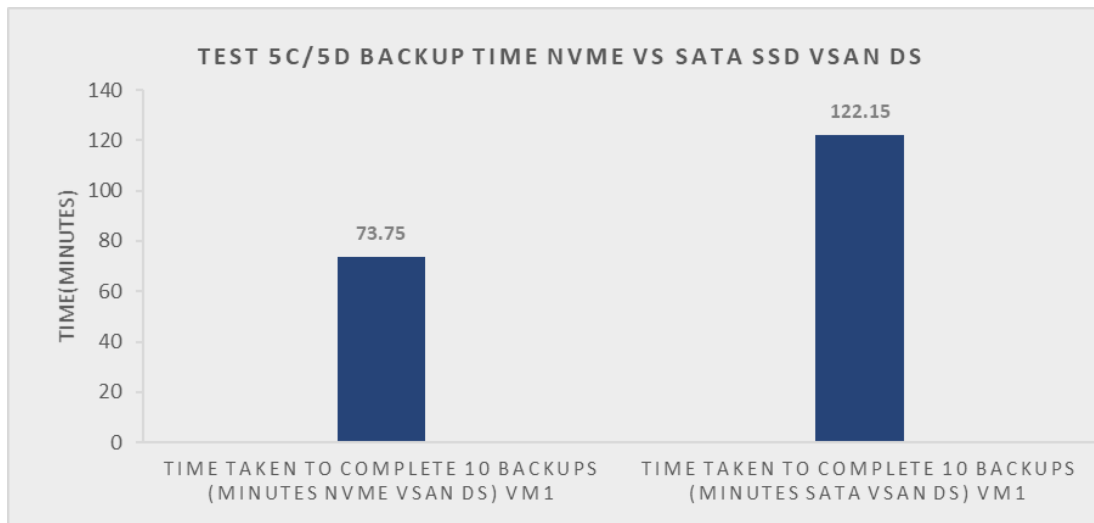


Abbildung 6.11 Test 5c/5d Backup-Zeit der VM bis zur vollständigen Sicherung, 10 Zyklen
Noisy Neighbor-Implementierung NVMe vs. SATA SSD vSAN-Datenspeicher

Fazit

In diesem Whitepaper haben wir gezeigt, wie die Konsolidierung Ihrer Datenbank-Workloads auf NVMe dazu beitragen kann, die vorhandene Hardware zu maximieren. Die unglaubliche Effizienz und die IO-Wartezeiten von nahezu 0 ermöglichen es Ihnen, weniger CPU-Kerne einzusetzen, um denselben Transaktionsdurchsatz zu erzielen. Wir haben einige Vergleiche mit Enterprise-SATA-SSDs angestellt und gezeigt, dass Sie Ihre Anwendungen durch die Migration Ihrer SQL-Workloads auf einen NVMe-gestützten Datenspeicher skalieren können, indem der Transaktionsdurchsatz verdoppelt und gleichzeitig eine Latenzzeit von unter einer Sekunde erreicht wird. Anschließend haben wir gezeigt, wie NVMe dazu beitragen kann, die Auswirkungen auf Tier-1-Anwendungen zu mindern, indem unerwünschte Arbeitslasten, wie z. B. Sicherungs- und Wiederherstellungsvorgänge von Datenbanken, schneller abgeschlossen werden können.

Kingstons Enterprise NVMe SSDs [DC1500M](#) in Kombination mit Kingston Server Memory (Server Premier) bieten eine hervorragende Lösung für Anwender, die ihre Datenbankinfrastruktur virtualisieren und die Effizienz ihrer Workloads maximieren möchten.

Besuchen Sie <https://www.kingston.com/en/solutions/servers-data-centers>, um mehr über Lösungen von Kingston für Rechenzentren zu erfahren

Referenzen

HammerDB. (n.d.). *Zum Verständnis der TPCC-Arbeitslast*. Abrufbar unter <https://www.hammerdb.com/docs3.3/ch03s05.html>

TPCC home. (n.d.). Abrufbar unter <https://www.tpc.org/>