

BACHELORARBEIT

Performance – Optimierung von Datenbanken

vorgelegt am 13. März 2025
Daniel Freire Mendes

Erstprüferin: Prof. Dr. Stefan Sarstedt
Zweitprüfer: Prof. Dr. Olaf Zukunft

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Informatik
Berliner Tor 7
20099 Hamburg

Zusammenfassung

Relationale Datenbanken sind ein essenzieller Bestandteil moderner IT-Systeme und bilden die Grundlage für zahlreiche Anwendungen, die täglich von Millionen von Nutzern verwendet werden. Mit wachsender Datenmenge steigen jedoch die Antwortzeiten von Abfragen, was die Systemnutzung erschwert. Die Herausforderung besteht darin, geeignete Optimierungsstrategien zu finden, die sowohl Lese- als auch Schreiboperationen effizient gestalten und eine hohe Skalierbarkeit gewährleisten. Diese Arbeit untersucht verschiedene Ansätze zur Optimierung der Performance, darunter Datentypen, Indexierung, Views, Partitionierung und Replikation. Zur Analyse der Auswirkungen dieser Methoden wird das Tool Sysbench für Benchmarks eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des kleinstmöglichen Datentyps und die Verwendung von NOT NULL-Spalten die Leistung optimieren, indem sie Speicherplatz sparen. Hash-Indizes sind besonders bei exakten Schlüsselvergleichen effektiv, während B-Baum-Indizes vielseitigere Einsatzmöglichkeiten bieten. Materialisierte Sichten bieten Performancevorteile durch gespeicherte Abfrageergebnisse, während virtuelle Sichten Echtzeitdaten liefern, aber bei jedem Zugriff die Abfrage neu ausführen und daher langsamer sind. Bei großen Datenmengen kann Partitionierung eine effektive Lösung darstellen, während Replikation die Lastverteilung insbesondere bei hoher CPU-Last verbessert. Es gibt keine universelle Lösung, aber je nach Anwendungsfall können geeignete Konzepte ausgewählt, optimiert und auch miteinander kombiniert werden.

Abstract

Relational databases are an essential component of modern IT systems and form the foundation for numerous applications used daily by millions of users. However, as data volumes grow, query response times increase, making system usage more challenging. The challenge lies in identifying suitable optimization strategies that make both read and write operations efficient while ensuring high scalability. This paper examines various approaches to performance optimization, including data types, indexing, views, partitioning, and replication. The impact of these methods is analyzed through benchmarking with the Sysbench tool. The results show that choosing the smallest possible data type and using NOT NULL columns optimize performance by saving storage space. Hash indexes are particularly effective for exact key comparisons, while B-tree indexes offer more versatile applications. Materialized views provide performance benefits by storing query results, whereas virtual views deliver real-time data but execute the query anew with each access, making them slower. For large datasets, partitioning can be an effective solution, while replication improves load distribution, especially under high CPU load. There is no universal solution, but depending on the use case, suitable concepts can be selected, optimized, and even combined.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in Benchmarks	1
1.2 Kennzahlen	3
1.3 Auswahl der Tools	4
2 Grundlagen	6
2.1 Einführung in die Tools	6
2.2 Projektaufbau mit Beispiel	10
2.3 GitHub Actions	18
2.4 Optimierung des Workflows	21
3 Optimierungen von Datentypen	24
3.1 Allgemeine Faktoren	24
3.2 Verhaltensweise einzelner Datentypen	25
3.3 Analyse der Benchmarks	28
4 Indizes	30
4.1 Grundlagen	30
4.2 B-Baum-Index	34
4.3 Hash-Index	38
4.4 Vergleich von B-Tree- und Hash-Index	41
5 Views	42
5.1 Virtuelle Views	42
5.2 Materialisierte Views	46
5.3 Durchführung der Benchmarks	49
6 Partitionen	53
6.1 Grundlagen	53

6.2	Arten der Partitionierung	56
6.3	Analyse	59
7	Replikation	62
7.1	Grundlagen	62
7.2	Konfiguration des Master-Replikat-Ansatzes	65
7.3	Analyse	68
8	Fazit	72
	Literatur	75
	Anhang	77

Abbildungsverzeichnis

2.1	Demo: Gnuplot vs. Pandas	9
2.2	Join-Typ: Skriptvergleich	17
2.3	Join-Typ: Metrikvergleich	18
3.1	Datentypen: Vergleich mit Not Null, sowie Int und Char	28
3.2	Datentypen: Numerische Datentypen	29
3.3	Datentypen: Zeichenkettenbasierte Typen	29
4.1	Binärbaum-Visualisierung	34
4.2	B-Tree-Indexing: Mit Index vs Ohne	36
4.3	B-Tree-Indexing: Unterschiedliche Selects mit Index und Ohne	37
4.4	Hash-Indexing: Auswirkungen von Hashkollisionen	40
4.5	Hash-Indexing: Unterschiedliche Abfragen mit Index und Ohne	40
4.6	Indexing: Vergleich von B-Tree- und Hash-Index	41
5.1	Views: Keine View, virtuelle View und Ansatz mit Triggern	50
5.2	Views: Beide Triggeransätze sowie materialisierte Sicht	51
6.1	Range-Partitionierung: Unterschiedliche Selects mit und ohne Partition	60
6.2	List-Partitionierung: Unterschiedliche Abfragen mit und ohne Partition	60
6.3	Hash-Partitionierung: Variationen der Partitionsanzahl	61
7.1	Master-Replikant-Visualisierung	63
7.2	Replikation: Master-Replikant-Ansatz vs Single-Server	69
7.3	Replikation: Threadanzahl aufgeteilt an Master-Replikate	70
7.4	Replikation: Unterschiedliche Binlog-Typen	71

Tabellenverzeichnis

3.1	Ergebnis der SQL-Abfrage aus 3.1	26
4.1	Performance-Vergleich	33
4.2	Ergebnisse der COUNT(*)-Abfragen für B-Tree-Index	37
4.3	Ergebnisse der COUNT(*)-Abfragen für Hash-Index	40
7.1	Auslastung mit unterschiedlichen Threadanzahlen	70

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit untersucht verschiedene Datenbankobjekte in relationalen Datenbanken. Dabei werden zunächst die einzelnen Konzepte detailliert erläutert, bevor ihre praktische Umsetzung in einem Datenbankmanagementsystem erfolgt. Um die Effizienz der verschiedenen Implementierungen bewerten zu können, benötigen wir eine geeignete Messmethode. Dafür sind Benchmarks das optimale Werkzeug. Anhand der Benchmark-Ergebnisse lassen sich Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Ansätze ziehen. Dieses Kapitel behandelt die Grundlagen und Typen von Benchmarks, die relevanten Kennzahlen sowie die Auswahl geeigneter Tools für eine korrekte Durchführung.

1.1 Einführung in Benchmarks

Benchmarks dienen dazu, das Verhalten eines Systems unter Last praktisch und effektiv zu untersuchen. Die wichtigste Erkenntnis, die aus Benchmarks gewonnen werden kann, ist die Identifikation von Problemen und Fehlern, die systematisch dokumentiert und nach Priorität bearbeitet werden sollten. Das Ziel von Benchmarks ist die Reduzierung und Bewertung von unerwünschtem Verhalten sowie die Analyse, wie sich das System derzeit und unter simulierten, zukünftigen und anspruchsvolleren Bedingungen verhalten könnte.

Es gibt zwei verschiedene Techniken für Benchmarks (Schwartz et al., 2012, pp. 35–49). Die erste zielt darauf ab, die Applikation als Ganzes zu testen (engl. full-stack). Dabei wird nicht nur die Datenbank getestet, sondern die gesamte Applikation, einschließlich des Webservers, des Netzwerks und des Applikationscodes. Der Grundgedanke dahinter ist, dass der Nutzer genauso lange auf eine Antwort warten muss, wie das gesamte System für die Verarbeitung der Anfrage benötigt. Um den Kunden kürzere Wartezeiten zu ermöglichen, sollte das Ziel sein, diese Zeit möglichst zu verkürzen. Es kann dabei auch vorkommen, dass das Datenbanksystem nicht das Bottleneck ist.¹ Full-Stack-Benchmarks haben jedoch auch Nachteile, denn sie sind schwieriger zu erstellen und insbesondere schwieriger korrekt einzurichten.

¹Ein Bottleneck ist ein Engpass beim Transport von Daten oder Waren, der einen maßgeblichen Einfluss auf die Abarbeitungsgeschwindigkeit hat. Wenn der Bottleneck weiterhin bestehen bleibt, führen Optimierungsversuche an anderen Stellen nur zu marginalen oder gar keinen messbaren Verbesserungen der Gesamtleistung (Vogel, 2009).

Die zweite Art von Benchmarks sind sogenannte Single-Component-Benchmarks, die verwendet werden, wenn man lediglich verschiedene Schemas und Abfragen im DBMS auf ihre Performance testen möchte. Sie analysieren ein spezifisches Problem in der Applikation und sind deutlich einfacher zu erstellen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass nur ein Teil des gesamten Systems getestet wird, wodurch die Antwortzeiten kürzer sind und man schneller Ergebnisse erhält. Da sich diese Bachelorarbeit ausschließlich mit den verschiedenen Objekten in Datenbanken beschäftigt, habe ich mich für einen Single-Component-Benchmark entschieden.

Das Gefährliche bei der Verwendung von Benchmarks ist, dass schlechte Designentscheidungen zu falschen Interpretationen des Systems führen. Ein möglicher Grund dafür kann sein, dass die Ergebnisse nicht die Realität widerspiegeln. Deshalb ist es wichtig, dass die Größe des Datensatzes und des Workloads realistisch sind. Idealerweise verwendet man einen Snapshot des tatsächlichen produktiven Datensatzes.² Weil in dieser Arbeit keine echten Produktionsdaten zur Verfügung stehen, müssen die Daten und der Workload nicht durch Snapshots, sondern zufällig generiert werden. Ein Problem bei der Verwendung zufällig erzeugter Werte ist die unrealistisch gleichmäßige Verteilung der Datensätze. Im Gegensatz dazu können in der Realität Hotspots auftreten, die die Verteilung erheblich beeinflussen. In den folgenden Kapiteln werden die Ansätze möglichst allgemein erläutert, weshalb wir diesen Kompromiss in Kauf nehmen können. Für die Analyse eines speziellen Systems sollten jedoch Snapshots aus der Produktivumgebung verwendet werden, um fehlerhafte Schlüsse zu vermeiden.

Ein weiterer Fehler, der noch bei Benchmarks auftreten kann, ist das falsche Nachstellen des tatsächlichen Benutzerverhaltens. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass Caching-Effekte nicht zu falschen Annahmen über die Performance führen. Teilweise wird auch die Aufwärmphase des Systems vollständig ignoriert und kurze Benchmarks können die Performance ebenfalls verfälschen.

Um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, sollten Benchmarks über einen ausreichend langen Zeitraum durchgeführt werden, um den stabilen Zustand des Systems zu erfassen. Dies gilt besonders für Server mit großen Datenmengen und viel Speicher. Zudem muss gewährleistet sein, dass der Benchmark reproduzierbar ist, da unzureichende oder fehlerhafte Tests keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern. Zu guter Letzt empfiehlt es die Ergebnisse eines Benchmarks in einem Diagramm darzustellen, da bestimmte Phänomene oft nur so erkennbar werden und nicht in tabellarischer Form sichtbar sind.

²Snapshots bestehen größtenteils aus Metadaten, die den Zustand Ihrer Daten definieren und sind keine vollständige Duplikation der Daten auf Ihrer Festplatte. Snapshots werden häufig für Test- und Entwicklungsaufgaben verwendet (Germany, 2024).

1.2 Kennzahlen

Bevor wir ein geeignetes Benchmark-Tool auswählen, sollte zunächst geklärt werden, welche Kennzahlen im Datenbankkontext relevant sind und welche davon für die eigenen Zwecke von besonderem Interesse sind. Das Benchmark-Tool, für das man sich entscheidet, muss in der Lage sein, diese Kennzahlen zu erfassen und zugänglich zu machen.

Die erste Kennzahl, die betrachtet wird, ist der Durchsatz (engl. throughput). Der Durchsatz gibt an, wie viele Transaktionen pro Zeiteinheit durchgeführt werden, wobei ein höherer Wert eine bessere Performance zur Folge hat. Üblicherweise wird als Einheit Transaktionen pro Sekunde verwendet, gelegentlich auch Transaktionen pro Minute. Man kann Transaktionen auch in verschiedene Kategorien unterteilen, wie beispielsweise Lese- und Schreibtransaktionen. Diese Unterscheidung ist wichtig, da bestimmte Implementierungen schnellere Lese-, aber langsamere Schreibtransaktionen zur Folge haben können.

Die nächste Metrik ist die Antwortzeit (engl. latency), die die gesamte Zeit misst, die für eine Abfrage benötigt wird. Abhängig von der Applikation kann sie in Mikrosekunden (μ s), Millisekunden (ms), Sekunden oder sogar Minuten angegeben werden. Oft wird die Latenz in einer aggregierten Form angegeben, wie beispielsweise dem Durchschnitt, Maximum, Minimum oder Perzentilen. Bei der Betrachtung von Latenzzeiten macht es aber wenig Sinn, Maximal- oder Minimalwerte zu betrachten, da diese oft Ausreißer sind und die allgemeine Performance nicht repräsentieren. Daher nutzt man eher Perzentile bei den Antwortzeiten. Perzentile bezeichnen den Wert, unter dem ein bestimmter Prozentsatz der gemessenen Latenzzeiten liegt. Wenn beispielsweise das 95. Perzentil der Antwortzeit bei 5 ms liegt, bedeutet dies, dass 95% der Abfragen in weniger als 5 ms abgeschlossen sind (Reinboth, 2020).

Eine weitere Kennzahl ist die Gleichzeitigkeit (engl. concurrency), die angibt, wie viele Anfragen gleichzeitig bearbeitet werden können. Ein genauerer Ansatz zur Messung der Gleichzeitigkeit auf dem Webserver besteht darin, die Anzahl der gleichzeitig ausgeführten Anfragen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu bestimmen. Es kann auch geprüft werden, ob der Durchsatz sinkt oder die Antwortzeiten steigen, wenn die Gleichzeitigkeit zunimmt. Beispielsweise könnte eine Website mit 50.000 gleichzeitigen Benutzern nur 10 oder 15 gleichzeitige Abfragen erfordern. Ein weiterer wichtiger Messwert, der die Leistung bei mehreren Nutzern beschreibt, ist die Skalierbarkeit (engl. scalability). Sie gibt an, wie sich das Verhalten des Systems verändert, wenn die Anzahl der Benutzer oder die Größe der Datenbank steigt. In einem idealen System würden doppelt so viele Abfragen bearbeitet werden, wenn doppelt so viele „Arbeiter“ versuchen, die Aufgaben zu erledigen.

Es gibt noch zahlreiche weitere Messgrößen, wie beispielsweise die Verfügbarkeit oder die CPU-Auslastung. Auf Letztere werden wir im Kapitel 7 näher eingehen. Für das Benchmark-Tool sind die Metriken Durchsatz und Antwortzeit unverzichtbar und sollten daher unbedingt

berücksichtigt werden. Das Tool sollte auch dazu in der Lage sein, zwischen Lese- und Schreibtransaktionen zu unterscheiden. Die anderen Metriken sind vor allem im Zusammenhang mit Mehrbenutzer-Systemen wichtig und nehmen daher in den meisten Kapiteln dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle ein.

1.3 Auswahl der Tools

Zu Beginn muss ein geeignetes relationales Datenbankmanagementsystem ausgewählt werden. In dieser Bachelorarbeit wird MySQL in der Version 8.0 verwendet, das erstmals am 19. April 2018 veröffentlicht wurde (Oracle, 2025e). Die aktuellste eingesetzte Version ist 8.0.41. Im Kapitel 5 wird zudem das DBMS PostgreSQL verwendet, um ein spezifisches Konzept zu untersuchen. Dieses Konzept wird mit MySQL verglichen, da MySQL keine native Implementierung dafür bereitstellt. Das ist aber die einzige Ausnahme, denn der Schwerpunkt im weiteren Verlauf der Arbeit wird überwiegend auf MySQL liegen.

Die Grundlage dieser Bachelorarbeit bildet die Untersuchung des Verhaltens der MySQL-Datenbank (Reimers, 2017) im Hinblick auf verschiedene Konzepte mithilfe eines zentralen Benchmark-Tools. Nach eingehender Überlegung habe ich mich für Sysbench (Kopytov, 2024) entschieden. Sysbench ist ein Open-Source-Tool, das ein skriptfähiges und multi-threaded Benchmark-Tool ist und auf LuaJIT basiert (Schwartz et al., 2012, pp. 50–66). Es wird hauptsächlich für Datenbankbenchmarks verwendet, kann jedoch auch dazu eingesetzt werden, um beliebige komplexe Arbeitslasten zu erstellen, die keinen Datenbankserver erfordern. Das Tool erfasst verschiedene Metriken, die im vorherigen Kapitel vorgestellt wurden, wie etwa Transaktionen pro Sekunde und Latenz. Außerdem kann genauer spezifiziert werden, wie oft diese Metriken geloggt werden sollen. Ein weiterer Vorteil von Sysbench ist, dass es nicht auf ein einzelnes Datenbanksystem beschränkt ist, sondern die Auswahl aus mehreren DBMS ermöglicht, darunter auch PostgreSQL.

Bei der Auswahl des Benchmark-Tools habe ich auch andere Optionen wie Benchbase (Difallah et al., 2013) und Mybench (Shopify, 2024) in Erwägung gezogen. Im Vergleich zu diesen Tools bietet Sysbench jedoch eine deutlich höhere Skriptfähigkeit und Flexibilität. Das bedeutet, dass Sysbench in großem Umfang über Skripte gesteuert werden kann, was eine benutzerdefinierte Konfiguration der Tests ermöglicht. Allerdings ist die Verwendung von Sysbench im ersten Projekt aufwendiger, da die Skripte von Grund auf neu erstellt werden müssen. Sobald jedoch ein Projekt einmal eingerichtet ist, können viele Aspekte übernommen und präzise sowie schnelle Änderungen vorgenommen werden. Dieser Vorteil wird im Kapitel 2.2 näher erklärt.

Sysbench zeichnet sich zudem dadurch aus, dass es als de facto Standard im Bereich der Datenbankbenchmarks gilt (Shopify, 2022b). Durch diese Positionierung im Markt gibt es viele aktive Nutzer und dadurch bedingt viele verfügbaren Ressourcen. Ein Vorteil der anderen

Tools besteht jedoch in der präziseren Steuerung der Ergebnisraten und Transaktionen im Vergleich zu Sysbench. Zudem beschränkt sich Sysbench hinsichtlich des Outputs auf das Wesentliche, da es lediglich eine Reihe von Log-Dateien erzeugt. Die Visualisierung der Ergebnisse muss vom Benutzer selbst mithilfe anderer Tools umgesetzt werden. Anders sieht das bei dem Tool Mybench aus, da dort die Möglichkeit besteht, in Echtzeit umfassende Abbildungen anzuzeigen (Shopify, 2022a). Trotz dieses Features habe ich mich aufgrund der hohen Anpassbarkeit sowie der Stellung als de facto Standard für Sysbench entschieden.

Auf die Erstellung von Grafiken sollte aber auch mit Sysbench nicht verzichtet werden. Durch Abbildungen lassen sich Entwicklungen im Zeitverlauf wesentlich besser erkennen als in einer Log-Datei. Anhand der reinen Zahlen in einem Log lassen sich möglicherweise einige Trends erkennen, doch vor allem zyklische Schwankungen sind ohne Grafiken schwer zu identifizieren. Mit Graphen, die eine Zeitachse enthalten, werden Zyklen sofort erkennbar und der Vergleich unterschiedlicher Messungen wird wesentlich erleichtert. Um die Kennzahlen, die mithilfe von Sysbench ermittelt worden sind, in eine grafische Darstellung umzuwandeln, gibt es unterschiedliche Tools. Eine erste Möglichkeit bietet Gnuplot (Williams et al., 2010), das sich gut für die Darstellung von CSV-Dateien eignet. Wenn jedoch nur bestimmte Spalten der Tabelle angezeigt werden sollen, stößt man schnell an seine Grenzen. Aus diesem Grund habe ich mich mit einem Python-Script für eine flexiblere Alternative entschieden. Für die grafische Darstellung kommen dabei die Bibliotheken pandas (pandas development team, 2020) und matplotlib.pyplot (Hunter, 2007) zum Einsatz. Die genaue Verwendung von Sysbench wird im nächsten Kapitel erklärt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel betrachten wir die Grundlagen der Bachelorarbeit, die in den späteren Kapiteln für die Durchführung der Benchmark-Tests und Analysen erforderlich sind. Zunächst legen wir die einzelnen Schritte dar, um die im vorherigen Kapitel 1 ausgewählten Tools korrekt zu verwenden. Besonders beim Benchmark-Tool untersuchen wir die verschiedenen Argumente, die übergeben werden können und zeigen anhand eines kurzen Beispiels, wie die Resultate dieses Tools aussehen könnten. Danach betrachten wir eine komplexere Demonstration, die wir bei späteren Tests wiederverwenden können. Zu guter Letzt zeigen wir, wie GitHub Actions funktionieren, uns bei den Benchmark-Tests Aufwand ersparen und wie wir die Workflows sowohl zeitlich als auch ressourcenschonend optimieren können.

2.1 Einführung in die Tools

Zuallererst muss der MySQL-Server gestartet sein. Dabei ist es egal, ob dies lokal auf dem Rechner oder über einen Docker in eines GitHub CI/CD-Workflows erfolgt. Das Wichtigste dabei ist, dass man sich die Zugangsdaten, bestehend aus Benutzer- und Passwortdaten, speichert, da diese gebraucht werden, um den Benchmark-Test mit Sysbench zu starten. Nachdem das RDBMS gestartet worden ist, muss zunächst eine Datenbank erstellt werden. Das könnte beispielsweise folgendermaßen aussehen:

```
1 CREATE DATABASE sbtest;
```

Zusätzlich zu erfolgreichen Erstellung der Datenbank muss das Tool Sysbench installiert werden. Auf einem Linux-basierten System kann Sysbench wie folgt installiert werden. Wenn man das Betriebssystem macOS verwendet, muss `sudo apt` durch `brew` ersetzt werden.

```
1 sudo apt install sysbench
```

Damit wir auch unsere Grafiken erstellen können, müssen wir die Tools Gnuplot und Pandas in Kombination mit matplotlib installieren. Auch hier können wir `sudo apt` durch `brew` ersetzen, wenn wir macOS verwenden. Es kann sein, dass wir `pip3` anstelle von `pip` benutzen müssen.

```
1 pip install pandas matplotlib
2 sudo apt install gnuplot
```

Im nächsten Schritt machen wir uns mit dem Tool Sysbench näher vertraut. Dazu gehen wir die verschiedenen Argumente, die beim Aufruf mitgegeben können oder müssen, durch und erklären sie kurz:

- **db-driver**: Treiber der Datenbank, in unserem Fall **mysql**
- **mysql-host**: Hostname oder IP-Adresse des Servers (Standard: localhost)
- **mysql-user**: Benutzername der Datenbank
- **mysql-password**: Passwort des DB-Benutzers (kann weggelassen werden, wenn keine Authentifizierung erforderlich ist)
- **mysql-db**: Name der zu verwendenden Datenbank, bei uns: **sbtest**
- **time**: Laufzeit des Benchmarks in Sekunden und ist verpflichtend
- **report-interval**: Intervall in Sekunden, in dem Zwischenergebnisse angezeigt werden (Standard: nur Gesamtstatistiken am Ende)
- **tables**: Anzahl der zu erstellenden Tabellen (Standard: 1)
- **table-size**: Anzahl der Datensätze pro Tabelle (optional)

Neben den sieben aufgelisteten Argumenten gibt es zwei weitere wichtige Optionen:

1. Wie im Abschnitt 1.3 erwähnt, kann ein Lua-Skript angegeben werden, um eigene Tabellen zu erstellen, Beispieldaten einzufügen und bestimmte Abfragen durchzuführen. Dazu muss am Ende der Sysbench-Befehlszeile lediglich der Pfad zur Lua-Datei hinzugefügt werden. Ein erklärendes Beispiel dazu folgt weiter unten in diesem Abschnitt.
2. Die Methode, den Sysbench ausführen soll, muss ebenfalls spezifiziert werden. Auch dieser wird am Ende der Sysbench-Befehlszeile angehängt.

Um die korrekte Verwendung des Tools zu überprüfen, betrachten wir ein kurzes Demo-Beispiel, bei dem vordefinierte Testtypen von Sysbench genutzt werden. Auf diese Weise kann man schnell kontrollieren, ob die Einrichtung des Tools korrekt ist, ohne dafür SQL-Befehle oder Lua-Skripte für die eigenen Bedürfnisse zu schreiben. Es stehen verschiedene Testtypen zur Auswahl, wie das Einfügen von Daten (**oltp_insert**), das Abfragen von Daten (**oltp_read_only**) oder beides (**oltp_read_write**). Als letztes müssen wir die unterschiedlichen Methoden auflisten, um sie mit den Testtypen kombinieren zu können:

- **prepare**: Bereitet die Datenbank für den Test vor, u.a. das Erstellen der Tabellen.
- **run**: Ist die Ausführungsphase des Tests. Je nach Testtyp führt diese Methode die spezifizierten Operationen aus, wie etwa **oltp_read_write**. Dabei wird die Performance der Datenbank unter der angegebenen Arbeitslast gemessen.
- **cleanup**: Diese Methode stellt die Datenbank in ihren ursprünglichen Zustand zurück und stellt sicher, dass keine Testdaten zurückbleiben.

Für unser Demo-Beispiel wählen wir den Testtyp **oltp_read_write** aus und kombinieren diesen mit allen Methoden. Für die Methode RUN würde unsere Query so aussehen, wobei YOUR_USER und YOUR_PASSWORD durch die tatsächlichen Benutzerdaten der verwendeten Datenbank ersetzt werden müssten:

```
1 sysbench oltp_read_write \  
2   --db-driver=mysql \  
3   --mysql-user=YOUR_USER \  
4   --mysql-password=YOUR_PASSWORD \  
5   --mysql-db="sbtest" \  
6   --time=10 \  
7   --report-interval=1 \  
8   run
```

Wenn man nur diese Query ausführt, fällt er auf, dass die Query scheitert. Die Fehlermeldung lautet dabei wie folgt:

```
1 FATAL: MySQL error: 1146 "Table 'sbtest.sbtest1' doesn't exist"
```

Der entstandene Fehler wird offensichtlich dadurch verursacht, dass die Tabelle nicht erstellt worden ist. Daher müssen wir vor der Ausführung der RUN-Methode zunächst die PREPARE-Methode durchführen. Um die Datenbank wieder in den Ausgangszustand zu versetzen, muss nach dem oltp_read_write-Testtyp auch die CLEANUP-Methode aufgerufen werden. Um sich die manuelle Ausführung dieser drei Befehle in der korrekten Reihenfolge zu sparen, bietet es sich an, ein Shell-Skript zu schreiben, indem die Methoden nacheinander aufgerufen werden.

Codeblock 2.1: Ausführung der Sysbench-Methoden in korrekten Reihenfolge

```
1 # Define necessary variables: DB_HOST, DB_USER, DB_PASS, DB_NAME, TABLES, TABLE_SIZE, DURATION,  
2 SYSBENCH_OPTS="--db-driver=mysql --mysql-host=$DB_HOST --mysql-user=$DB_USER --mysql-password=$DB_PASS --mysql-db=  
3   $DB_NAME --tables=$TABLES --table-size=$TABLE_SIZE"  
4 # Prepare the database  
5 sysbench oltp_read_write $SYSBENCH_OPTS prepare >> "$RAW_RESULTS_FILE" 2>&1  
6  
7 # Run the benchmark  
8 sysbench oltp_read_write $SYSBENCH_OPTS --time=$DURATION --threads=1 --report-interval=1 run >> "$RAW_RESULTS_FILE"  
9   2>&1  
10 # Cleanup the database  
11 sysbench oltp_read_write $SYSBENCH_OPTS cleanup >> "$RAW_RESULTS_FILE" 2>&1
```

Die Ergebnisse werden nun der Log-Datei (unter output/sysbench.log) gespeichert, aber uns fehlt noch die Erstellung der Graphen. Um die Erstellung zu vereinfachen, bietet es sich an, die Kennzahlen aus der Log-Datei zu extrahieren und die Werte mit korrekten Spaltenüberschriften in einer CSV-Datei zu speichern. Dies geht mit dem Shell-Kommando grep:

Codeblock 2.2: Extraktion der Ergebnisse aus der Log-Datei in eine Tabelle

```
1 RAW_RESULTS_FILE="output/sysbench.log"
2 OUTPUT_FILE="output/sysbench_output.csv"
3
4 echo "Script,Time (s),Threads,TPS,QPS,Reads,Writes,Other,Latency (ms;95%),ErrPs,ReconnPs" > "$OUTPUT_FILE"
5 grep '^\\[ ' $RAW_RESULTS_FILE | while read -r line; do
6     time=$(echo $line | awk '{print $2}' | sed 's/s//')
7     threads=$(echo $line | awk -F 'thds: ' '{print $2}' | awk '{print $1}')
8     # Extract other measures
9     latency=$(echo $line | awk -F 'lat \\(ms,95%\\): ' '{print $2}' | awk '{print $1}')
10    echo "demo,$time,$threads,$tps,$qps,$reads,$writes,$other,$latency,$err_per_sec,$reconn_per_sec" >> "
        $OUTPUT_FILE"
11 done
12 echo "Results saved to $OUTPUT_FILE."
```

Der letzte Schritt ist die Erstellung der Graphen mithilfe der Tools Gnuplot oder der Python-Library Pandas. Die kompletten Scripts `plot_sysbench.gp` und `generatePlot.py` befinden sich am Ende dieser Bachelorarbeit. Das Python-Skript, das zuständig für die Visualisierung ist, muss als Argument zum einen die CSV-Datei übermittelt bekommen und zum anderen kann es nur eine bestimmte Auswahl an Messwerten übergeben, damit nur für diese die Graphen erzeugt werden. In der Abbildung 2.1 können wir die Ergebnisse der Grapherstellung sehen.

Codeblock 2.3: Erstellung der Graphen aus der CSV-Datei

```
1 OUTPUT_FILE="$OUTPUT_DIR/sysbench_output.csv"
2
3 # Gnuplot
4 GNUPLOT_SCRIPT="/Users/danielmendes/Desktop/Bachelorarbeit/Repo/plot_sysbench.gp"
5 gnuplot $GNUPLOT_SCRIPT
6 echo "Plots generated with gnuplot"
7
8 # Python with Library Pandas
9 PYTHON_SCRIPT="/Users/danielmendes/Desktop/Bachelorarbeit/Repo/generatePlot.py"
10 python3 "$PYTHON_SCRIPT" "$OUTPUT_FILE"
11 echo "Plots generated with pandas"
```

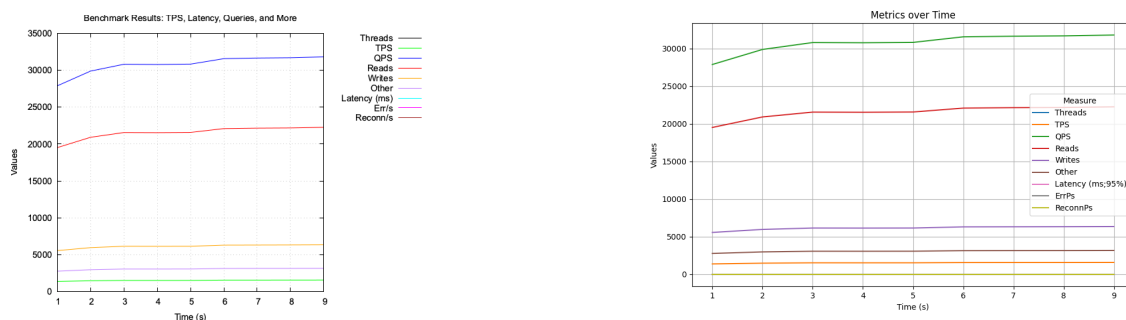


Abbildung 2.1: Grafik zeigt Erstellung mit Gnuplot (links) und Pandas (rechts)

Die Metriken in der Abbildung sind: Transaktionen, Abfragen, Fehler und Wiederverbindungen pro Sekunde (engl. TPS, QPS, ErrPs, ReconnPs), Anzahl der Operationen (engl. Reads, Writes, Other), die Latenz im 95. Perzentil und die Anzahl der Threads.

2.2 Projektaufbau mit Beispiel

In dem vorausgegangenen Abschnitt wurde das Tool Sysbench und seine Funktionsweise anhand eines Demo-Projekts näher erläutert. Damit die Reihenfolge und die Bedeutungen der unterschiedlichen Methoden (prepare → run → cleanup) sowie die Vorgehensweise zur Erstellung unserer Grafiken deutlich geworden. Das bisherige Problem ist aber, dass wir bei dem dargelegten Beispiel keine Kontrolle über die getesteten Daten haben. Wenn man sich die Logs genauer anschaut, dann sieht man, dass man zwar über die Parameter an den Sysbench-Befehl die Anzahl der erstellten Tabellen und eingefügten Datensätze von außen steuern kann, aber die genaue Implementierung können wir auf diese Weise nicht verändern. Genau für diese Anwendungsfälle gibt es die Möglichkeit ein Lua-Skript, als Parameter beim Sysbench-Aufruf mit anzugeben. In diesen Lua-Dateien können die Implementierungen der einzelnen Methoden selbstständig gewählt werden.

Um das Vorgehen besser zu erklären, schauen wir uns ein Beispiel an, bei dem wir zwei Tabellen erstellen und mit zufälligen Testdaten befüllen. Die Abfrage, die wir auf Performance testen wollen, ist das Verbinden (Joinen) dieser beiden Tabellen. In unserem Fall erstellen wir eine Kundentabelle mit Name, Geburtstag und Adresse sowie eine Bestelltabelle mit Artikeldetails, Bestelldatum und einem Bezug zu dem Kunden, der die Bestellung aufgibt. Damit wir aber nicht nur ein Beispiel haben, das dargestellt wird, brauchen wir einen Vergleich zwischen zwei verschiedenen Implementierungen. Der Unterschied zwischen den beiden besteht darin, dass die Tabelle in der einen Version eine Kundennummer vom Typ INT enthält, während sie in der anderen vom Typ VARCHAR ist. Da Verbundoperationen aufwendig sind, nehmen wir an, dass der speichereffizientere Typ INT Performancevorteile bietet. Dies gilt es nun mit Benchmark-Tests genauer zu untersuchen.

Für die Durchführung der Benchmarks beginnen wir zunächst unabhängig von Sysbench und den Lua-Skripten mit der Spezifizierung der Tabellen, die erstellt werden sollen. Dies müssen wir einmal mit der Kundennummer und einmal mit dem Namen als Fremdschlüssel der Bestelltabelle machen. Damit müssen insgesamt vier unterschiedliche CREATE TABLE-Befehle umgesetzt werden. So sehen die CREATE TABLE-Ausdrücke für den Fall mit INT aus:

Codeblock 2.4: Create Table-Befehl für Tabelle Kunden

```
1 CREATE TABLE KUNDEN (  
2     KUNDEN_ID    INT PRIMARY KEY,  
3     NAME        VARCHAR(255),  
4     GEBURTSTAG   DATE,  
5     ADRESSE      VARCHAR(255),  
6     STADT       VARCHAR(100),  
7     POSTLEITZAHL VARCHAR(10),  
8     LAND        VARCHAR(100),  
9     EMAIL       VARCHAR(255) UNIQUE,  
10    TELEFONNUMMER VARCHAR(20)  
11 );
```


Codeblock 2.5: Create Table-Befehl für Tabelle Bestellung

```
1 CREATE TABLE BESTELLUNG (  
2     BESTELLUNG_ID INT PRIMARY KEY,  
3     BESTELLDATUM DATE,  
4     ARTIKEL_ID INT,  
5     UMSATZ INT,  
6     FK_KUNDEN INT NOT NULL,  
7     FOREIGN KEY (FK_KUNDEN) REFERENCES KUNDEN (KUNDEN_ID)  
8 );
```

Anschließend müssen wir diese Befehle in der `prepare()`-Funktion verwenden. Dafür müssen wir einfach die Create Table-Befehle an die Datenbank senden. Wenn wir bestimmte Indexe oder andere Datenbankstrukturen erstellen wollen würden, dann müssten wir dies ebenfalls in dieser Funktion machen. Dies ist ein Auszug aus der Prepare-Funktion:

Codeblock 2.6: Lua-Script für die Erstellung der Tabellen

```
1 local con = sysbench.sql.driver():connect()  
2 function prepare()  
3     local create_kunden_query = [[  
4         CREATE TABLE KUNDEN (...);  
5     ]]  
6     local create_bestellung_query = [[  
7         CREATE TABLE BESTELLUNG (...);  
8     ]]  
9  
10    con:query(create_kunden_query)  
11    con:query(create_bestellung_query)  
12    print("Tables KUNDEN und BESTELLUNG have been successfully created")  
13 end
```

Wenn die Datenbank beispielsweise in einer Produktivumgebung läuft, dann wollen wir, dass Benchmarks möglichst wenig Einfluss auf sie haben. Damit ist es das Ziel, dass die Datenbank möglichst nach dem Durchlauf wieder in ihrem Anfangszustand ist. Außerdem sollte der Benchmark idempotent sein, also beliebig oft nacheinander ausgeführt werden können, ohne zu Problemen zu führen. Wenn wir eine Tabelle erstellen, ohne sie zu löschen, schlägt der CREATE TABLE-Befehl im nächsten Durchlauf fehl. Dies lässt sich durch die Klausel IF NOT EXISTS vermeiden oder noch besser, indem die Tabelle am Ende des Benchmarks gelöscht wird. Dafür ist die `cleanup()`-Funktion vorgesehen:

Codeblock 2.7: Lua-Script für das Aufräumen

```
1 local con = sysbench.sql.driver():connect()  
2 function cleanup()  
3     con:query("DROP TABLE IF EXISTS BESTELLUNG;")  
4     con:query("DROP TABLE IF EXISTS KUNDEN;")  
5     print("Cleanup successfully done")  
6 end
```

Wichtig ist dabei, dass man keine Schlüsselintegritäten verletzt. Da in diesem Fall die Tabelle BESTELLUNG eine Referenz auf die Tabelle KUNDEN hat, muss zuerst die Bestelltabelle und danach erst die Kundentabelle entfernt werden.

Jetzt haben wir das Gerüst für die eigentlichen Insert- und Select-Befehle geschaffen. Bei den Insert-Befehlen können wir entweder zufällige Zahlen generieren oder aus vordefinierten Listen zufällig wählen. Allerdings müssen wir bei den zufällig generierten Daten aufpassen, dass wir nicht die Primärschlüsselbedingung verletzen. Deshalb bietet es sich an, mit inkrementellen Werten zu arbeiten. In unserem Beispiel vergeben wir die KUNDEN_ID fortlaufend mit dem Schleifendurchgang und die BESTELLUNG_ID wird aus einer Kombination der Kundennummer und der Bestellnummer berechnet. Wir müssen festlegen, wie viele Kunden und Bestellungen pro Kunde erstellt werden. Um sicherzustellen, dass keine Werte in den Tabellen enthalten sind, können wir alle Datensätze aus den Tabellen entfernen, bevor wir sie hinzufügen. Damit die Performance der Insert-Query auch gemessen wird, ist es wichtig, dass die insert()-Funktion in der event()-Funktion aufgerufen wird.

Codeblock 2.8: Lua-Script für das Einfügen von Daten

```
1 local con = sysbench.sql.driver():connect()
2 local num_rows = 1000
3 local bestellungProKunde = 4
4
5 function delete_data()
6     con:query("DELETE FROM BESTELLUNG;")
7     con:query("DELETE FROM KUNDEN;")
8 end
9
10 function insert_data()
11     delete_data()
12     for i = 1, num_rows do
13         local kunden_id = i -- define name, geburtstag, adresse, stadt, postleitzahl, land, email, telefonnummer
14         local kunden_query = string.format([[
15             INSERT IGNORE INTO KUNDEN
16             (KUNDEN_ID, NAME, GEBURTSTAG, ADRESSE, STADT, POSTLEITZAHL, LAND, EMAIL, TELEFONNUMMER)
17             VALUES (%d, '%s', '%s', '%s', '%s', '%s', '%s', '%s', '%s');
18         ]], kunden_id, name, geburtstag, adresse, stadt, postleitzahl, land, email, telefonnummer)
19         con:query(kunden_query)
20
21         for j = 1, bestellungProKunde do
22             local bestellung_id = (i-1) * bestellungProKunde + j -- define bestelldatum, artikel_id, umsatz
23             local bestellung_query = string.format([[
24                 INSERT IGNORE INTO BESTELLUNG
25                 (BESTELLUNG_ID, BESTELLDATUM, ARTIKEL_ID, UMSATZ, FK_KUNDEN)
26                 VALUES (%d, '%s', %d, %d, %d);
27             ]], bestellung_id, bestelldatum, artikel_id, umsatz, kunden_id)
28             con:query(bestellung_query)
29         end
30     end
31 end
32
33 function event()
34     insert_data()
35 end
```

Die letzte Anweisung, die wir noch brauchen, ist die Select-Abfrage. Hierbei muss man sich Gedanken machen, welche Abfrage benötigt wird, damit die untersuchten Effekte auch tatsächlich auftreten. In dem Beispiel brauchen wir deswegen einen Join zwischen den beiden Tabellen über den Fremdschlüssel.

Codeblock 2.9: Lua-Script für das Abfragen von Daten

```
1 local con = sysbench.sql.driver():connect()
2 function select_query()
3     local join_query = [[
4         SELECT k.STADT, SUM(b.UMSATZ) AS Total_Umsatz
5         FROM KUNDEN k
6         JOIN BESTELLUNG b ON k.NAME = b.FK_KUNDEN
7         GROUP BY k.STADT;
8     ]]
9     con:query(join_query)
10 end
11
12 function event()
13     select_query()
14 end
```

Damit haben wir für unseren Vergleich alle vier Operationen genauer definiert und müssen diese lediglich für die Implementierung mit VARCHAR als Primärschlüssel der Kundentabelle anpassen. Dazu muss beim CREATE TABLE-Befehl der Typ für die Spalten KUNDEN_ID und FK_KUNDEN angepasst werden und beim Einfügen muss die Variable i zu einem String umgewandelt werden.

Neben dem Vergleich zwischen INT und VARCHAR wollen wir auch das Verhalten mit unterschiedlichen Längen analysieren. Dadurch können wir den Performanceunterschied zwischen beiden Datentypen sowie den Einfluss der Länge des Verbundoperators feststellen. Dazu benötigen wir für beide Typen eine Hilfsfunktion, die eine Zeichenkette, bzw. eine Zahl mit einer bestimmten Länge erstellt. Das Ergebnis der Funktion wird in der INSERT-Methode verwendet und zur Sicherstellung der Eindeutigkeit der KUNDEN_ID mit der Schleifenvariable i konkateniert. Ein Problem besteht jetzt aber noch, da wir bisher nur eine Länge pro INSERT-Methode festlegen können. Wie könnten jetzt die beiden Ordner mit den Skripten duplizieren und die Längen in den neuen Dateien anpassen. Dies würde zu extremer Redundanz führen, weshalb es eine intuitivere Lösung gibt. Und zwar könnte man beim Aufruf des Shell-Scripts Variablen definieren, die im Skript exportiert werden und in den Lua-Dateien importiert werden können. Die Zeile mit der festgelegten Länge könnte so aussehen:

```
1 local length = 10
```

Um die im Skript exportierte Variable, beispielsweise LENGTH, zu verwenden, muss man Folgendes tun:

```
1 local length = tonumber(os.getenv("LENGTH"))
```

Jetzt müssen wir noch ermitteln welche Längen überhaupt zulässig sind. Bei VARCHAR gestaltet sich das einfach, da dort alle Längen bis 255 bei VARCHAR(255) möglich sind. INT kann Werte bis $2^{32} - 1$ (4.294.967.295) speichern, also bis zu 10 Stellen, während BIGINT Werte bis $2^{64} - 1$ (18.446.744.073.709.551.615) kann und damit 20 Stellen umfasst. Um größere Längen zu testen, ändern wir den Typ der Kundentabelle von INT auf BIGINT und wählen 4 sowie 16 Stellen als getestete Längen.

Wir haben also gesehen, dass sich mit Lua-Skripts Tabellen gezielt erstellen, eingefügte Daten verwalten und Abfragen steuern lassen. Um die Operationen in der korrekten Reihenfolge auszuführen und die Grafiken zu generieren, benötigen wir ein Shell-Skript. Diesem Skript wollen wir möglichst wenige Parameter übergeben, weshalb wir eine festgelegte Dateienstruktur benötigen. Wir brauchen einen Ordner mit einem beliebigen Namen, z.B. int_queries, in diesem Ordner befinden sich folgende Dateien:

- int_queries.lua \Rightarrow enthält die prepare()- und cleanup()-Funktionen
- int_queries_insert.lua \Rightarrow enthält die insert()-Funktion
- int_queries_select.lua \Rightarrow enthält die select()-Funktion

Analog muss auch ein Ordner für den Varchar-Fall erstellt werden. Wichtig ist dabei, dass die Namen der Dateien mit dem Namen des Ordners übereinstimmen. Das Shell-Skript bedient sich dieser Struktur, führt korrekte Lua-Skript aus und geht die einzelnen Schritte bis zur Erstellung der Grafiken durch. Wenn wir Variablen definieren, dann werde diese exportiert, um sie in den Lua-Dateien importieren zu können. Der Dateiname dieses Orchestrators ist sysbench_script.sh und man kann ihn wie folgt aufrufen:

Codeblock 2.10: Befehl zum Ausführen des Orchestrator Skripts

```
1 ./sysbench_script.sh \  
2 -out "YOUR_PATH_TO_DIRECTORY/Output" \  
3 -var '{"length":[4, 16]}' \  
4 -scripts '{  
5     "YOUR_PATH_TO_DIRECTORY/Scripts/varchar_queries": {  
6         "vars": "length"  
7     },  
8     "YOUR_PATH_TO_DIRECTORY/Scripts/int_queries": {  
9         "vars": "length"  
10    }  
11 }'
```

Wenn man will, kann man mehrere Select-Abfragen ohne unterschiedliche Insert-Befehle definieren. Dies wird später in der Bachelorarbeit nützlich sein, wenn wir verschiedene Indextypen untersuchen und mithilfe unterschiedlicher SELECT-Abfragen prüfen, ob ein bestimmter Indextyp bei Abfragen verwendet wird. Die eigentlichen Tabellen und deren

Datensätze müssen dabei nicht immer wieder neu befüllt werden. Wenn wir auf unsere Ordnerstruktur mit dem Int-Query Beispiel zurückkommen, dann könnte man anstelle von `int_queries_select.lua` auch einen Ordner erstellen mit den Namen `int_queries_select`. In diesem Ordner können beliebig viele unterschiedliche Lua-Skripts sein, die Select-Befehle durchführen. Dadurch werden alle Select-Befehle auf der gleichen Datenbasis verglichen und wir können im Kapitel 4.1 erkennen, wann der Index verwendet wird und wann nicht.

Auflistung aller möglichen Parameter:

- `-out`: Gibt den Pfad des Speicherorts für den Output-Ordner an
- `-var`: Gibt die Variablen und deren Werte im JSON-Format an
- `-scripts`: Gibt die Pfade der Ordner mit den jeweiligen Lua-Skripten im JSON-Format an. Der Schlüssel für jedes Skript ist der Pfad zur Datei, während die zu exportierenden Variablen unter dem Schlüssel `vars` angegeben werden.

Innerhalb von `-scripts` kann man folgendes angeben:

- `-vars`: Wählt aus, welche unter der `-var` angegebenen Variablen für das jeweilige Skript verwendet werden sollen
- `-selects`: Legt fest, welche Select-Abfragen verwendet werden sollen, wenn man mehrere in einem Ordner definiert
- `-db`: Gibt den Namen aller verwendeten Datenbankverbindungen aus der `db.env`-Datei in einer Liste an. Standardmäßig wird MySQL verwendet.

Damit kommen wir kurz zur Funktionsweise des Orchestrator-Skripts `sysbench_script.sh`. Im Grundlegenden arbeitet das Skript ähnlich wie schon das Skript im Demo-Beispiel, aber durch die zusätzlichen Anwendungsfälle kommt es zu mehr Komplexität. Zu Beginn des Skripts werden die Argumente des Scripts, die wir schon in 2.10 gesehen haben, definiert und überprüft. Beispielsweise wird sichergestellt, dass die für die Skripts verwendeten Parameter, in unserem Beispiel `length`, tatsächlich definiert werden mit `-var`. Danach wird der Output-Ordner erstellt und die Spaltenüberschriften in die CSV-Dateien geschrieben. Anschließend beginnt erst das eigentliche Durchgehen der unterschiedlichen Skripte, die unter dem Argument `-script` angegeben wurden. Zu Beginn der Schleife entnimmt man die Werte das Skript die verwendeten Datenbanken (unter dem Argument `-db`) und die Select-Abfragen (unter dem Argument `-selects`). Daraufhin geht man in weitere Schleife, um die unterschiedlichen Datenbankverbindungen durchzugehen. Innerhalb dieser Schleife wird eine Methode aufgerufen, die alle Variablen vorbereitet. Zum Beispiel werden für die jeweilige Datenbank die richtigen Umgebungsvariablen aus der Datei `envs.json` geladen. Diese Variablen sind unverzichtbar, da sonst keine Verbindung zur Datenbank aufgebaut werden kann.

Als Nächstes kommt eine Fallunterscheidung, die überprüft, ob das Skript im aktuellen Durchlauf Variablen exportiert. Für den Fall, dass keine Variablen exportiert werden, wird

direkt die Methode `process_script_benchmark` aufgerufen. Wenn aber Variablen exportiert werden, dann müssen weitere Zwischenschritte umgesetzt werden. Zunächst müssen alle Kombinationen zwischen den verschiedenen exportierten Variablen generiert werden. Wenn es drei Variablen gibt, von denen 2 jeweils 2 Werte und eine letzte nur einen Wert hat, dann gibt es $2 \times 2 \times 1 = 4$ unterschiedliche Kombinationen. Anschließend muss man für jede Kombination die entsprechenden Werte exportieren und dann die Methode `process_script_benchmark` aufrufen.

Die Funktion `process_script_benchmark` führt wie schon beim Demo-Beispiel (siehe 2.1) erwähnt, die Methoden `PREPARE`, `INSERT`, `SELECT` und `CLEANUP` durch. Außerdem überprüft sie, ob es sich bei dem `Select-Directory` um einen Ordner handelt oder nicht. Wenn es ein Ordner ist, dann werden alle `SELECT`-Funktionen in diesem Ordner nacheinander ausgeführt, wenn nicht, dann wird nur eine Datei mit der Endung `_select.lua` betrachtet. Die Methode `run_benchmark` führt den `Sysbench`-Befehl (siehe 2.1) aus und wenn es sich um die Methode `RUN` handelt, werden die Daten während der Ausführung und die Endstatistiken in je eine CSV-Datei gespeichert.

Codeblock 2.11: Verkürzter Ausschnitt aus Orchestrator Script

```

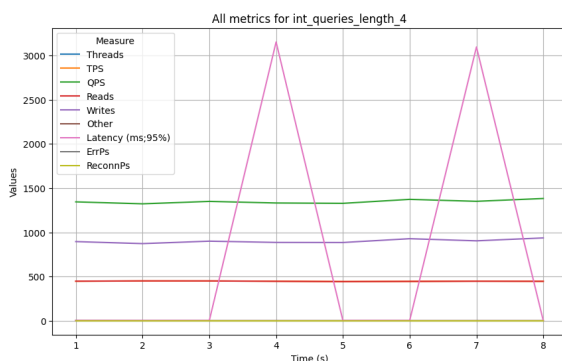
1 for SCRIPT_PATH in $SCRIPT_DIRS; do
2   DBMS=$(echo "$SCRIPTS" | jq -r --arg key "$SCRIPT_PATH" '.[key].db // ["mysql"]')
3   SELECT_QUERIES=$(echo "$SCRIPTS" | jq -r --arg key "$SCRIPT_PATH" '.[key].selects')
4   for DB in $(echo "$DBMS" | jq -r '.[0]'); do
5     prepare_variables "$SCRIPT_PATH" "$DB"
6     DB_INFO=$( [ "$DBMS_COUNT" -ne 1 ] && echo "${DB}" )
7     if [ -n "$EXPORTED_VARS" ]; then
8       IFS=' ' read -r -a KEYS <<< "$EXPORTED_VARS"
9
10      COMBINATIONS=$(generate_combinations "" "${KEYS[@]}")
11      while IFS=' ' read -r combination; do
12        # Export key-value pairs for the current combination
13        IFS=' ' read -ra key_value_pairs <<< "$combination"
14        for pair in "${key_value_pairs[@]}; do
15          export "${pair%*=}" | tr '[:lower:]' '[:upper:]'=${pair#*=}"
16        done
17        COMBINATION_NAME=$(echo "$combination" | sed -E 's/(^),num_rows=[^,]*//g;s/^,/,/;s/,,$// ' | tr ' ' '_' |
18        tr '=' '_')
19        LOG_DIR_COMBINATION="$LOG_DIR/$COMBINATION_NAME"
20        process_script_benchmark "$DB_INFO" "$SCRIPT_PATH" "$LOG_DIR_COMBINATION" "$INSERT_SCRIPT" "
21        $SELECT_SCRIPT" "$COMBINATION_NAME"
22      done <<< "$COMBINATIONS"
23    else
24      process_script_benchmark "$DB_INFO" "$SCRIPT_PATH" "$LOG_DIR" "$INSERT_SCRIPT" "$SELECT_SCRIPT"
25    fi
26    eval $(jq -r --arg env "$DB" '.[env] | to_entries | .[] | "unset " + .key' "$ABS_PATH/envs.json")
27  done
28 # Combine csv files during runtime and end statistics and generate plots
29 python3 "$PYTHON_PATH/generateCombinedCSV.py" "$STATISTICS_FILE_TEMP" "$STATISTICS_FILE" --select_columns "
30   $STATS_SELECT_COLUMNS" --insert_columns "$STATS_INSERT_COLUMNS" --prefixes "$PREFIXES"
31 python3 "$PYTHON_PATH/generateCombinedCSV.py" "$RUNTIME_FILE_TEMP" "$RUNTIME_FILE" --select_columns "
32   $RUNTIME_SELECT_COLUMNS" --insert_columns "$RUNTIME_INSERT_COLUMNS" --prefixes "$PREFIXES"
33 python3 "$PYTHON_PATH/generatePlot.py" "$RUNTIME_FILE" "$STATISTICS_FILE"

```

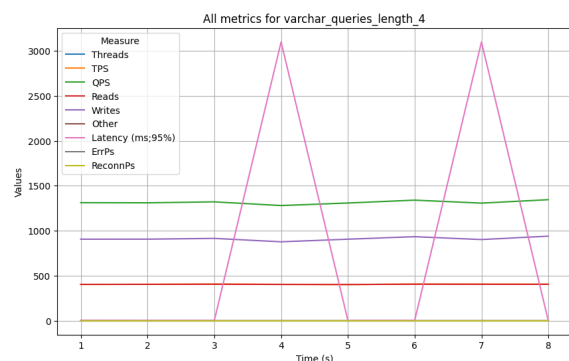
Nach dem Durchführen aller Schleifen haben wir alle Messwerte in CSV-Dateien gespeichert. Jetzt müssen wir mithilfe von Python-Skripten die Ergebnisse der Insert- und Select-Benchmarks aus den CSV-Dateien pro Skript wieder vereinen, indem die Attribute miteinander addiert werden. Der letzte fehlende Schritt ist die Erstellung der Graphen mithilfe von Python und Pandas.

Wenn wir den Befehl aus 2.10 ausführen, wird ein Output-Ordner an der gewünschten Stelle erstellt. Dieser besteht aus dem Unterordner pngs, logs und den CSV-Dateien. In dem Unterordner pngs befinden sich verschiedene Grafiken, die die Ergebnisse visualisieren. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Arten von Grafiken. Die erste Art von Grafik ist ein Zeitreihendiagramm, welches auf der x-Achse den zeitlichen Verlauf zeigt. Auf der y-Achse werden in einigen Diagrammen die unterschiedlichen Metriken für jedes einzelne Skript dargestellt, während andere Diagramme die Werte einer bestimmten Metrik auf der y-Achse zeigen und dabei die Ergebnisse verschiedener Skripte vergleichen. Dadurch können beispielsweise die Metriken Reads und Writes analysiert werden, um herauszufinden, welches Skript in diesen Bereichen besser abschneidet. Die zweite Art von Grafik, die erstellt wird, ist ein Hexagon-Diagramm. Dieses verzichtet auf eine Zeitachse und fasst die Performance über den gesamten Zeitraum hinweg zusammen. Im Vergleich zur Laufzeitanalyse liefert es zusätzliche Informationen, wie etwa die Latenz oder die Gesamtanzahl der Queries. Dadurch ist es auch möglich, dass mehrere Skripte und mehrere Kennzahlen in einer Grafik dargestellt werden können.

Damit kommen wir zum finalen Schritt, der Analyse der Ergebnisse für die verschiedenen Datentypen und Längen des Verbundoperators. Die ersten beiden Abbildungen aus 2.2 sind Zeitreihendiagramme, die für die Skripte `int_queries_length_4` und `varchar_queries_length_4` alle Metriken darstellen. Aus den Grafiken, die für ein Skript alle Metriken veranschaulichen, kann man möglicherweise Datenfehler erkennen. Bei beiden springt die Latenz bei einigen Messpunkten von 0 ms auf einen höheren Wert und wieder zurück. Ansonsten aber sind die anderen Metriken auf einem konstanten Level und es gibt wenige Schwankungen.



(a) `int_queries_length_4`



(b) `varchar_queries_length_4`

Abbildung 2.2: Die Grafik zeigt alle Metriken für die jeweiligen Skripte

Wenn wir alle vier Skripte miteinander vergleichen wollen, können wir die Abbildungen aus 2.3 heranziehen. Was die Lesegeschwindigkeit angeht, kann man erkennen, dass INT eine etwa 30% bessere Lese-Performance hat als VARCHAR. Aus dem Vergleich von den unterschiedlichen Längen mit INT kann man schließen, dass je länger die Zahl oder bei VARCHAR die Zeichenkette ist, desto langsamer wird die Abfrage. Es scheint auch so, dass die Länge bei VARCHAR sogar einen stärkeren Einfluss auf die Performance hat. Dennoch ist der Unterschied zwischen den Datentypen deutlich größer. Wir sehen auch, dass die Werte bis auf wenige Ausnahmen konstant bleiben und es keine großen Schwankungen gibt. Aus der Gesamtstatistik in 2.3b kann ein ähnliches Verhalten abgeleitet werden. Bei der Schreibgeschwindigkeit kann man kaum Unterschiede erkennen und bei der Latenz haben interessanterweise die Varianten mit kleineren Längen höhere, also schlechtere Wert.

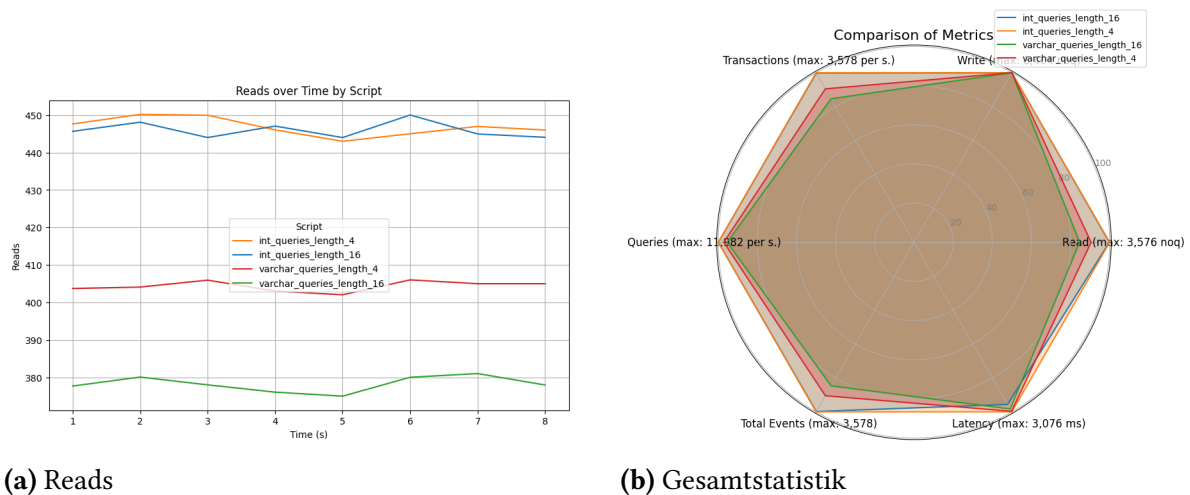


Abbildung 2.3: Die Grafik zeigt den Vergleich zwischen allen Skripten für die Metriken

2.3 GitHub Actions

Im Verlauf der Bachelorarbeit kommen immer mehr Projekte mit unterschiedlichen Lua-Dateien, die alle das Orchestrator-Skript verwenden, dazu. Manche dieser Projekte erfordern keine Anpassungen an dem Skript, während andere wiederum viele benötigen. Das Problem dabei ist, dass man durch die Komplexität des Skripts schnell den Überblick über die Auswirkungen der Änderungen auf andere Projekte verliert. Um sicherzugehen, müssen wir die Benchmarks für alle Projekte durchführen und anschließend die Output-Ergebnisse überprüfen. Dazu muss jedes Skript nacheinander ausgeführt werden, was zum einen zeitintensiv ist und zum anderen hohe Lasten für den lokalen Rechner bedeutet. Das Vorgehen könnte man zeitlich optimieren, indem man die Skripte parallel ausführt, aber auch das würde nicht das Problem der hohen Lasten und des manuellen Aufwands lösen. Eine deutlich bessere Variante ist das Automatisieren dieser Befehle unabhängig von dem lokalen Rechner auf virtuellen

Maschinen in der Cloud. Als Plattform für diese Continuous Integration und Continuous Delivery (CI/CD) habe ich mich für GitHub Actions entschieden (GitHub, 2025b). Mit GitHub Actions kann man Workflows erstellen, die bei einem bestimmten Event getriggert werden und anschließend eine Anzahl von Aufträgen nacheinander oder gleichzeitig ausführen können. Jeder Auftrag (engl. Job) wird innerhalb eines eigenen Runners der virtuellen Maschine in einem Container ausgeführt und kann über einen oder mehrere Schritte (engl. Step) verfügen. Die Schritte können wiederum beliebige Shell-Befehle, Skripte oder Aktionen ausführen.

Im Kapitel 2.2 haben wir gesehen, wie wir für unser Beispiel das Hauptskript auf dem lokalen Rechner ausführen können (2.10). Jetzt brauchen wir diese Informationen für alle Projekte, die wir testen wollen. Wir benötigen immer die Pfade zu den Lua-Skripten, die getestet werden sollen und in einigen Fällen die zusätzlich definierten Variablen. Diese Pfade und Variablen sammeln wir in einer JSON-Datei und vergeben jedem Projekt einen Namen.

Codeblock 2.12: JSON-Datei mit dem Join-Typ Beispiel

```
1 {
2   "join-ty": {
3     "scripts": {
4       "/YOUR_PATH_TO_PROJECT/Scripts/varchar_queries": {
5         "vars": "length"
6       },
7       "/YOUR_PATH_TO_PROJECT/Scripts/int_queries": {
8         "vars": "length"
9       }
10    },
11    "var": {"length": [4, 16]}
12  }
13 }
```

Damit wir das Hauptskript ausführen können, müssen wir im ersten Job die Daten dieser JSON-Datei verarbeiten und bestimmte Variablen, wie beispielsweise den Output-Ordner definieren. Zudem müssen wir alle Namen der verschiedenen Projekte in einer Liste zusammenfügen und als Output für den nächsten Job definieren. Der nächste Auftrag ist verantwortlich für das eigentliche Durchführen der Benchmarks und wird erst gestartet, wenn der Vorherige beendet ist. Da wir die Vorteile des gleichzeitigen Ausführens der Aufträge nutzen wollen, müssen wir die Matrixstrategie verwenden. Bei der Matrixstrategie kann man eine Liste von Variablen angeben, um mehrere Auftragsausführungen parallel zu erstellen. In unserem Fall verwenden wir dafür die Liste mit den unterschiedlichen Projektnamen.

Damit nun die einzelnen Benchmarks ausgeführt werden können, müssen wir innerhalb dieser Matrixausführung einige Vorbereitungen treffen. Zuerst müssen wir abhängig vom Projektnamen die entsprechenden Variablen aus der JSON-Datei, die wir im ersten Job erstellt haben, laden und exportieren. Anschließend müssen wir die Dependencies für Sysbench und die Python-Libraries installieren und die Datenbank-Container mit passenden Konfigurationen starten und vorbereiten. Nach diesen Schritten können wir das Hauptskript ausführen und die Outputdateien werden an dem angegebenen Pfad erstellt.

Um Zugriff auf diese Dateien zu erhalten, müssen wir sie als GitHub Artifact hochladen. Die GitHub Artifacts können wir anschließend entweder über die GitHub REST Api oder die Übersicht des Workflows auf der GitHub-Webseite als Zip-Datei herunterladen. Als letzten Auftrag, nach Beendigung beider vorangegangenen Jobs, können wir alle GitHub Artifacts zu dem aktuellen Workflow herunterladen und gemeinsam als Artifact wieder hochladen. Dadurch müssen wir beispielsweise bei 10 Projekten nicht 10 Zip-Dateien einzeln herunterladen und entpacken, um die Änderungen der Dateien zu überprüfen. Wenn fehlerhafte Änderungen den Workflow triggern, kann es dazu kommen, dass je nach Fehler unterschiedliche Jobs oder Steps nicht erfolgreich ausgeführt werden und damit der komplette Workflow scheitert.

Der Workflow wird in einer YAML-Datei im Ordner `.github/workflows/` definiert. Zunächst muss man den Namen des Workflows festlegen und anschließend, wann er getriggert werden soll. Dies kann beispielsweise manuell auf GitHub mit dem Tag `workflow_dispatch` oder bei jedem Push mit `push` geschehen. Zudem kann der Trigger auch auf bestimmte Dateien oder Ordner beschränkt werden. Als Nächstes kann man unter dem Tag `jobs` die verschiedenen Aufträge definieren. Der Schlüssel `outputs` beschreibt die Ausgaben eines Jobs, die von anderen Jobs verwendet werden können, während `steps` die Aufgaben festlegt, die innerhalb eines Jobs ausgeführt werden. Unter dem Tag `env` muss man die Umgebungsvariablen definieren, dazu gehören zum Beispiel beim zweiten Job die Länge der Durchführung des Benchmarks. Wenn es sich um vertrauliche Informationen handelt, sollte man GitHub Secrets verwenden. Ein Beispiel dafür wäre das Downloaden der Artefakte im letzten Job, um einen gemeinsamen Output-Ordner zu erstellen. Dafür wird die GitHub REST API benötigt, die ein vertrauliches Personal Access Token erfordert, welches Repository- sowie Lese- und Schreibrechte für GitHub Registries besitzt. Die Workflow-Datei für das Durchführen der Benchmarks sieht in verkürzter Form wie folgt aus:

Codeblock 2.13: Ausschnitt aus der Workflow-Datei

```
1 name: Run All Benchmarks
2 on:
3   push:
4     paths: ['Projects/**', ...]
5 jobs:
6   prepare-benchmark:
7     outputs:
8       matrix: ${ steps.set-matrix.outputs.matrix }
9       configurations: ${ steps.prepare-config.outputs.configurations }
10  steps:
11    - { name: Checkout repository, uses: actions/checkout@v3 }
12    - name: Read and generate list of matrix name # echo "matrix=$matrix" >> $GITHUB_OUTPUT
13    - name: Prepare configurations for all test types
14      run: # ... export variables like test_type, dirs, var, output_dir, artifact_name as "configurations"
15  run-tests:
16    needs: prepare-benchmark
17    strategy:
18      matrix:
19        test-type: ${ fromJson(needs.prepare-benchmark.outputs.matrix) }
20    env: { TIME: 32, THREADS: 1, EVENTS: 0, REPORT_INTERVAL: 2 }
```

```

21 steps:
22   - { name: Checkout repository, uses: actions/checkout@v3 }
23   - name: Extract and save values to GitHub environment
24   - name: Install dependencies (sysbench, pandas, matplotlib)
25   - name: Start MySQL container (and wait for it to be ready)
26     run: |
27       docker run --name mysql-`${{ env.test_type }}` -d -e MYSQL_ROOT_PASSWORD=${DB_PASS} -e MYSQL_DATABASE=
28       $DB_NAME -p $DB_PORT:3306 mysql:8.0
29   - name: Run sysbench script
30     run: |
31       chmod +x Tools/Shell-Scripts/sysbench_script.sh
32       Tools/Shell-Scripts/sysbench_script.sh -out "${{ env.output_dir }}" \
33       -var '${{ env.var }}' -scripts:'${{ env.dirs }}'
34   - name: Stop MySQL and PostgreSQL containers
35   - name: Upload outputs # with actions/upload-artifact@v4
36 upload-combined-output:
37   needs: [prepare-benchmark, run-tests]
38   steps:
39     - name: Loop through configurations, download artifacts with artifact_name and unzip it
40       run: # ... ALL_ARTIFACTS=$(curl -s -H "Authorization: Bearer `${{ secrets.GITHUB_TOKEN }}`" "https://api.
41         github.com/repos/${{ github.repository }}/actions/artifacts") ...
42     - name: Upload "Output"-folder with all downloaded benchmarks as one artifact named "combined-output"

```

Wenn wir jetzt Änderungen an den Skripten vornehmen, dann wird der Workflow automatisch getriggert und die Benchmarks für alle Projekte durchgeführt. Nach Abschluss des Workflows können die kombinierten Ergebnisse aus dem combined-output-Artifact als ZIP-Datei heruntergeladen und damit analysiert werden. Es bieten sich aber auch weitere Verbesserungen an, die zu einer Optimierung des Workflows führen.

2.4 Optimierung des Workflows

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Laufzeit und den Ressourcenverbrauch des Workflows zu optimieren. Zum einen kann man die zu installierenden Abhängigkeiten mithilfe des GitHub Caches (GitHub, 2025a) speichern. Dies bietet sich besonders an, da sich die Abhängigkeiten über die Workflows hinweg nur selten ändern. Falls sich doch etwas ändert, kann man beispielsweise die requirements.txt-Datei anpassen. Dadurch werden einmalig alle Abhängigkeiten neu installiert und anschließend im Cache abgelegt.

Codeblock 2.14: Speichern der Abhängigkeiten im Cache

```

1 - name: Cache pip dependencies
2   if: env.should_run == 'true'
3   uses: actions/cache@v3
4   with:
5     path: ~/.cache/pip
6     key: `${{ runner.os }}-pip-`${{ hashFiles('**/requirements.txt') }}

```

Falls sich bis zum nächsten Workflow keine Änderungen an den Abhängigkeiten ergeben, wird der Cache automatisch heruntergeladen. Der Zeitgewinn in unserem Beispiel ist jedoch nur gering und beträgt nur wenige Sekunden pro Workflow.

Deutlich mehr Zeit und Ressourcen kann man aber sparen, wenn man zwischen zwei unterschiedlichen Arten von Dateien unterscheidet. Denn zum einen gibt es Dateien, die die Ergebnisse von allen Skripten beeinflussen. Dazu gehören das Workflow-Skript und die JSON-Datei, aber auch das Orchestrator-Skript und die darin verwendeten Python-Skripte. Die Ordner an sich, die in der JSON angegeben werden, die beeinflussen nur sich selbst und nicht die anderen Skripte. Beispielweise, wenn ich in Projekt A die Anzahl an Zeilen ändere, die in eine Tabelle eingefügt werden, dann ändert dies nichts an dem Ergebnis von Projekt B oder C. Daher würde es sich anbieten, dass für Projekt A die Benchmarks neu durchgeführt werden, für Projekte B und C könnte hingegen jeweils der letzte erfolgreiche Output-Ordner benutzen. Als Endresultat könnten damit die neue Durchführung von Projekt A zusammen mit der alten Ausführung der Projekte B und C in einer Zip-Datei hochgeladen werden. Dadurch wird nur ein Drittel der eigentlichen Ressourcen verbraucht, wenn man davon ausgehen würde, dass alle 3 Projekte gleich viel Zeit benötigen würden.

Für die Implementierung dieser Optimierung muss zunächst die allgemeinen Skripte hashen und zusätzlich noch die Ordner mit den Lua-Skripten, die für das jeweilige Skript aus der JSON benötigt werden. Diese beiden Hashes kann zusammen mit den Testtypen kombinieren, damit bekommt die folgende Struktur für den Namen:

```
1 NAME="${{ matrix.test-type }}-${{ env.hash }}-${{ env.general_hash }}"
```

Nachdem wir unsere JSON geladen haben, machen wir nun nicht mehr direkt mit der Installation der Abhängigkeiten weiter, sondern davor hashen wir die unterschiedlichen Pfade und erstellen unseren Namen. Falls es keinen Ordner mit dem gleichen Namen gibt, machen wir wie bisher weiter. Existiert jedoch ein Ordner mit diesem Namen, überspringen wir alle weiteren Schritte nach dem Extrahieren der Werte aus der JSON im Job run-tests. Damit ersparen wir uns die Installation der Abhängigkeiten, das Starten der Datenbank-Container und das Ausführen des Orchestrator-Skripts.

Als letztes stellt sich die Frage, wo die Ordner mit den berechneten Namen gespeichert und beim nächsten Run wieder heruntergeladen werden sollen. Zum einen kann man Lösungen in GitHub selbst verwenden. Zum einen würde sich eine GitHub Cache-Lösung wieder anbieten, aber tatsächlich sind GitHub Artifacts für das Sichern von Dateien besser geeignet (GitHub, 2025a). Eine andere mögliche Lösung kann auch das Nutzen von expliziten Branches nur für die Sicherung der Dateien sein. Das Problem ist dabei, dass durch Timing-Probleme beim Pushen ein paralleler Workflow den Code zwischen Rebase, Commit und Push verändert haben könnte, wodurch nach einem verhinderten Push erneut ein Rebase nötig wird. Außerdem muss die GitHub Action über Schreibberechtigungen verfügen. Des Weiteren eignen sich auch

Cloud-Speicherlösungen sehr gut, um die Ordner zu speichern und wieder herunterzuladen. Dazu gehören von Google Cloud Storage (GCS), AWS S3 oder MS Azure Storage, die sich zusammen mit GitHub Artifacts am besten eignen. Wie man in der `workflow.yaml` erkennen kann, habe ich mich für die Lösung mit GitHub Artifacts entschieden. Wenn man eine andere Lösung umsetzen möchte, dann muss man aber nur wenige Zielen im Workflow anpassen.

3 Optimierungen von Datentypen

Das erste Thema, das wir in Bezug auf die Performance-Optimierung von Datenbanken betrachten, sind die unterschiedlichen Datentypen und deren Auswirkungen auf die Performance. Bei der Auswahl des korrekten Datentyps gibt es unterschiedliche Faktoren, die vom jeweiligen Typen abhängen. Besonders werden wir die unterschiedlichen Implementierungen von numerischen und zeichenkettenbasierten Datentypen betrachten. Es gibt aber auch allgemeinere Prinzipien, die auf fast alle angewendet werden können.

3.1 Allgemeine Faktoren

In diesem Abschnitt werden wir uns mit den geltenden Grundsätzen beschäftigen, die allgemein bei der Wahl der Datentypen angewendet werden können. Bei der Erstellung von Tabellen sollte man folgende Schritte für die Auswahl von Datentypen befolgen (Schwartz et al., 2012, pp. 115–145). Zunächst muss die übergeordnete Kategorie des Datentyps, wie beispielsweise numerisch, textbasiert oder zeitbezogen, festgelegt werden. Anschließend sollte der spezifische Typ ausgewählt werden. Für numerische Daten kommen beispielsweise Ganzzahlen wie INT oder Fließkommazahlen wie FLOAT und DOUBLE infrage. Die spezifischen Typen können dieselbe Art von Daten speichern, unterscheiden sich jedoch im Bereich der Werte, die sie speichern können. Auch sind sie unterschiedlich in der Genauigkeit (engl. Precision), die sie erlauben und dem physischen Speicherplatz, den sie entweder auf der Festplatte oder im Arbeitsspeicher benötigen. Einige Datentypen haben auch spezielle Verhaltensweisen und Eigenschaften.

Der erste Grundsatz für Datentypen besagt, dass kleiner besser ist, weshalb man den kleinstmöglichen Datentypen wählen sollte, den man speichern kann und der die vorhandenen Daten entsprechend repräsentieren kann. Dadurch wird weniger Speicherplatz im Arbeitsspeicher und CPU-Cache benötigt, was wiederum zu schnelleren Abfragen führt. Außerdem ist bei der Benutzung des kleinstmöglichen Typs eine einfache Typveränderung möglich. Wenn die vorhandenen Daten beispielsweise falsch eingeschätzt wurden, lässt sich der Typ nachträglich mit wenig Aufwand in einen größeren umwandeln.

Eine weitere allgemeine Richtlinie ist die Einfachheit von Datentypen. So sind Integer-Werte beispielsweise leichter zu verarbeiten als Character. Daher sollte man stets einen Integer

wählen, wenn er die Daten korrekt abbilden kann. Begründen kann es damit, dass für einfachere Datentypen weniger CPU-Zyklen benötigt werden, um Operationen auszuführen. Im Fall von Integer und Character liegt der Unterschied in den Character Sets und Sortierregeln, die den Vergleich von Character erschweren.

Die letzte allgemeine Regel, die zu Performancegewinnen führen kann, ist die Vermeidung von NULL. Viele Tabellen enthalten NULLABLE Spalten, obwohl die Anwendung keinen NULL-Wert, also das Fehlen eines Wertes, speichern muss. Dies liegt daran, dass NULL die Standardeinstellung ist. Daher ist es am besten solche Spalten bei der Tabellenerstellung mit dem Identifier NOT NULL zu definieren. Wenn jedoch NULL-Werte gespeichert werden sollen, darf der Identifier selbstverständlich nicht verwendet werden. Mit NULL ist es für MySQL schwieriger Abfragen zu optimieren, da die Indizes und Wertevergleiche mehr Speicherplatz benötigen und komplizierter werden. Dies liegt daran, dass indizierte nullable Spalten ein zusätzliches Byte pro Eintrag benötigen, wodurch ein Index mit fester Größe in einen variablen Index umgewandelt werden kann. Der Leistungsunterschied zwischen NULL und NOT NULL ist zwar nicht so stark wie bei den anderen Prinzipien, dennoch kann er einen Effekt haben, insbesondere in Verbindung mit Indizes.

Es muss erwähnt werden, dass MySQL viele Aliase für Datentypen unterstützt, wie zum Beispiel INTEGER, BOOL und NUMERIC. Diese Aliase können verwirrend sein, aber sie beeinflussen nicht die Performance. Im Wesentlichen funktioniert es so, dass wenn wir eine Tabelle mit einem aliasierten Datentyp erstellen, wandelt MySQL diesen intern in den Basistyp um. Mit dem Befehl SHOW CREATE TABLE können das bestätigen, da statt des aliasierten Datentyps der Basistyp angezeigt wird.

3.2 Verhaltensweise einzelner Datentypen

Der erste Datentyp, bei dem wir die Verhaltensweise genauer betrachten, ist der numerische Datentyp. Bei diesem kann zwischen Ganzzahlen und Fließkommazahlen gewählt werden. Die spezifischen Typen unterscheiden sich nur in der Anzahl der Bits, die sie speichern können. SMALLINT kann 16 Bits speichern, während INT 32 und BIGINT 64 Bits speichern kann (Oracle, 2025b). Dementsprechend verändert sich auch der mögliche Wertebereich der Zahlen, die durch den Speicherplatz abgedeckt sind. Mit den optionalen UNSIGNED-Attributen können keine negativen Werte gespeichert werden können. Dafür verdoppelt sich die obere Grenze der positiven Werte, während der Speicherplatz und die Leistung unverändert bleiben. Die Berechnung des Wertebereichs für SIGNED und UNSIGNED erfolgt nach den folgenden Formeln:

$$\text{Signed: } -2^{(N-1)} \text{ bis } 2^{(N-1)} - 1 \quad (3.1)$$

$$\text{Unsigned: } 0 \text{ bis } 2^N - 1 \quad (3.2)$$

Hinweis: N entspricht der Anzahl der Bits.

Wenn wir die Wertebereiche für den Datentyp TINYINT in MySQL berechnen möchten, müssen wir für N den Wert 8 einsetzen. Als Ergebnis bekommen wir für SIGNED die Werte -128 bis 127 und für UNSIGNED die Werte 0 bis 255. Bei einem Beispiel mit 150 Werten können wir anstelle von SMALLINT also einfach UNSIGNED verwenden, um Speicherplatz zu sparen.

Eine Breitenangabe wie INT(11) beeinflusst nur die Anzeige und nicht den Wertebereich oder die Speicheranforderungen. Um dies zu beweisen, erstellen wir die folgende Table:

```
1 CREATE TABLE test_int (  
2     int_5 INT(5),  
3     int_11 INT(11)  
4 );
```

Wir haben für beide Spalten den Typen INT gewählt und da wir überprüfen wollen, ob die Breitenangabe einen Einfluss auf die Speicheranforderungen hat, versuchen die Grenzen von INT einzufügen. Da INT 32 Bits benötigt, ergeben sich folgende Grenzen: $2^{(32-1)} - 1 = 2147483647$ und $-2^{(32-1)} = -2147483648$.

Codeblock 3.1: Inserts und Selects für Testtabelle

```
1 INSERT INTO test_int (int_5, int_11) VALUES (2147483647, 2147483647);  
2 INSERT INTO test_int (int_5, int_11) VALUES (-2147483648, -2147483648);  
3 SELECT * FROM test_int;
```

Tabelle 3.1: Ergebnis der SQL-Abfrage aus 3.1

	int_5	int_11
obere Grenze	2147483647	2147483647
untere Grenze	-2147483648	-2147483648

Bei der Ausführung der Insert-Befehle erhalten wir keine Fehlermeldung, weshalb INT(5) und INT(11) beide die Grenzwerte speichern können. Damit haben wir gezeigt, dass die Breitenangabe keinen Einfluss auf die Speicheranforderungen hat, sondern nur die Anzeige beeinflusst.

Neben dem Typ für Ganzzahlen gibt es auch den Typ für Festkommazahlen, der in MySQL als DECIMAL bezeichnet wird. Eine Festkommazahl ist eine Zahl mit einem festen Dezimalpunkt, bei der sowohl die Anzahl der Dezimalstellen als auch die maximale Anzahl der Ziffern vor und nach dem Dezimalpunkt definiert sind. Damit ist er auch für die Speicherung von Ganzzahlen geeignet. DECIMAL(18, 9) beispielsweise speichert neun Ziffern vor und nach dem Dezimalpunkt und benötigt dafür 9 Bytes Speicherplatz. DECIMAL speichert Zahlen in einer binären Zeichenkette mit neun Ziffern pro vier Bytes und unterstützt bis zu 65 Ziffern insgesamt.

Ein weiterer numerischer Datentyp sind die Fließkommazahlen, zu denen `FLOAT` und `DOUBLE` gehören. Fließkommazahlen verwenden die Gleitkomma-Arithmetik und sind für ungefähre Berechnungen optimiert. `FLOAT` benötigt 4 Bytes, während `DOUBLE` 8 Bytes Speicherplatz beansprucht und eine höhere Präzision sowie einen größeren Wertebereich bietet. Die Gleitkomma-Arithmetik ist aufgrund der nativen Verarbeitung durch die CPU deutlich schneller als die präzise Berechnung mit `DECIMAL`, bringt jedoch einen gewissen Präzisionsverlust mit sich. Alternativ kann man auch `BIGINT` nutzen, um sowohl die Ungenauigkeit von Gleitkomma-Speicherungen als auch die höheren Kosten der `DECIMAL`-Arithmetik zu vermeiden.

Als Nächstes betrachten wir die zeichenkettenbasierten Datentypen. Die beiden Haupttypen sind `VARCHAR` und `CHAR`. `VARCHAR` speichert die Zeichenfolgen mit variabler Länge und benötigt daher weniger Speicherplatz als Typen mit fester Länge, da nur so viel Platz verwendet wird, wie tatsächlich benötigt wird. Zusätzlich werden ein oder zwei Bytes für die Speicherung der Länge der Zeichenfolge verwendet (1 Byte für < 255 Bytes Zeichenfolge). Durch diese effiziente Speichernutzung ist `VARCHAR` der am häufigsten verwendete Datentyp für Zeichenketten. Es gibt jedoch auch Nachteile, da Aktualisierungen der Werte zu wachsenden Zeilen führen und damit auch zu zusätzlicher Verarbeitung der Speicher-Engine. Interessant ist auch, dass die Speicherung von `hello` in `VARCHAR(5)` oder `VARCHAR(200)` zwar gleich viel Speicherplatz benötigt, jedoch für Sortierungen oder Operationen auf temporären Tabellen ineffizienter sein kann. Deshalb sollte immer so viel Platz reserviert werden, wie tatsächlich benötigt wird.

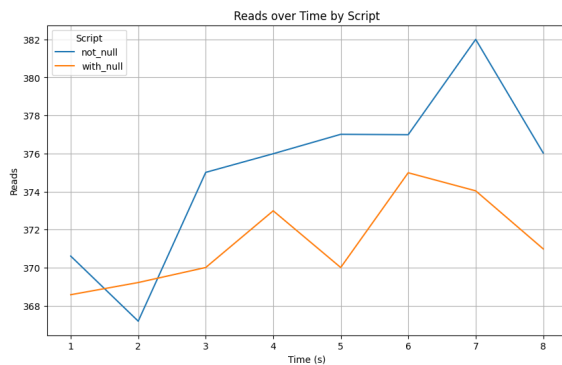
`CHAR` hingegen hat im Gegensatz zu `VARCHAR` eine feste Länge und MySQL reserviert auch den nicht gebrauchten Platz für die angegebene Anzahl an Zeichen. Daher ist `CHAR` ideal für sehr kurze Strings oder Werte, die alle nahezu gleich lang sind, da `VARCHAR(1)` aufgrund des Längen-Bytes 2 Bytes benötigt, `CHAR(1)` hingegen nur 1 Byte. Außerdem bleibt die Speicherstruktur bei Aktualisierungen von `CHAR` unverändert, weshalb er besser geeignet ist, wenn die Daten häufig geändert werden. Dafür ist `CHAR` nicht dafür geeignet, wenn die maximale Spaltenlänge deutlich größer ist als die durchschnittliche Wertelänge.

Als Letztes kommen wir noch zu den zeitbezogenen Datentypen `DATE`, `TIME`, `TIMESTAMP` und `DATETIME`. Der Datentyp `DATE` speichert nur das Datum ohne Uhrzeit und ist besonders speichereffizient, während `TIME` ausschließlich eine Uhrzeit oder Zeitspanne, auch über 24 Stunden hinaus, erfasst. Die anderen beiden speichern das Datum mit Uhrzeit und haben eine Genauigkeit von einer Sekunde. `TIMESTAMP` benötigt nur halb so viel Speicherplatz wie `DATETIME` und ist zeitzonenbewusst, hat aber dafür einen deutlich kleineren Wertebereich. Abhängig von der Information, die gespeichert werden soll, wählt man den passenden zeitbezogenen Datentyp.

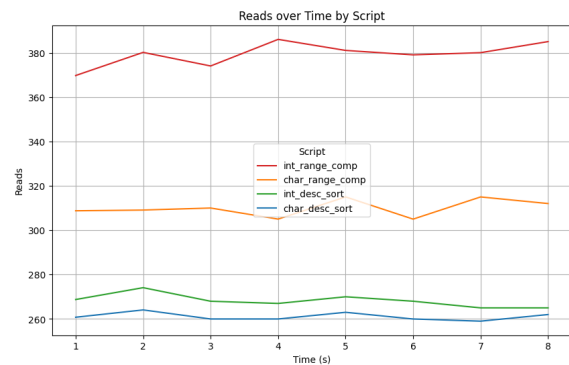
3.3 Analyse der Benchmarks

Der erste Leitsatz, den wir untersuchen, besagt, dass Spalten nach Möglichkeit als NOT NULL deklariert werden sollten. Für den Nachweis benutzen wir die Kundentabelle aus 2.4, bei der einmal alle Spalten als NOT NULL deklariert werden und einmal der Default genutzt wird. Wenn das Attribut nicht deklariert wird, können NULL-Werte in die Tabelle eingefügt werden. Um bei den Select-Abfragen mit WHERE-Klauseln sowie COUNT- und GROUP BY-Befehlen für beide Tabellen gleich viele Zeilen zurückzubekommen, verzichten wir auf NULL-Werte.

In der Grafik 3.1a sind die Ergebnisse der Select-Befehle zu sehen, wobei die Werte für NOT NULL im Durchschnitt höher sind als für WITH NULL. Höhere Werte bedeuten mehr Abfragen pro Sekunde und deuten auf bessere Performance hin, weshalb man sagen kann, dass NOT NULL besser performt als WITH NULL. Wenn man auf die y-Achse schaut, fällt aber auf, dass die Werte nicht so weit auseinanderliegen und damit sind die Unterschiede sehr gering. Daher sollte die Entscheidung, eine Spalte als NOT NULL zu deklarieren, vor allem aus Gründen der Datenintegrität und -konsistenz und nicht aus Performancegründen getroffen werden.



(a) Vergleich von NULL und NOT NULL



(b) Vergleich von INT und CHAR

Abbildung 3.1: Vergleich von NULL und NOT NULL, sowie INT und CHAR

Um zu zeigen, dass man bei der Wahl zwischen unterschiedlichen Datentypen, den simpleren wählen sollte, nutzen wir erneut die Kundentabelle. Für diesen Benchmark ändern wir jeweils den Datentyp des Schlüsselattributs der Tabelle. Zuerst erstellen wir eine Kundentabelle mit einem INT-Primärschlüssel, danach eine mit CHAR. Die Performance der Schreibbefehle ist in beiden Fällen etwa gleich. Bei den Lesebefehlen sieht das anders aus (siehe 3.1b). Wenn man einen Wertebereich abfragt, dann ist INT deutlich schneller (etwa 50%) als CHAR. Bei der Sortierung hat INT ebenfalls einen Vorteil, jedoch fallen die Abstände deutlich geringer aus.

Als letztes wollten wir unterschiedliche Datentypen vergleichen. Dazu verwenden wir die gleiche Tabelle wie beim Vergleich von INT und CHAR, setzen diesmal jedoch unterschiedliche numerische oder zeichenkettenbasierte Typen als Primärschlüssel ein. Beim Vergleich der numerischen Typen zeigt sich, dass DECIMAL mit deutlichem Abstand am langsamsten ist (Abbildung 3.2). Danach folgt, wie vermutet, der nächstgrößere Datentyp BIGINT. Das lässt

sich sowohl an der Grafik als auch an der Legende erkennen, die die Typen nach Performance absteigend sortiert. Die Legende hilft dabei, da auffällig ist, dass die unterschiedlichen Werte auch aufgrund der Skalierung der y-Achse sehr stark schwanken. Daraufhin kommen INT, MEDIUMINT und SMALLINT, wobei die Unterschiede kleiner sind als erwartet. Dies wird vermutlich aber daran liegen, dass wir die Abfragen nur auf eine Tabelle mit wenigen tausend Datensätzen ausgeführt haben. In der Praxis mit Hunderttausenden oder Millionen von Datensätzen ist anzunehmen, dass die Unterschiede zwischen den Typen größer wären als in unserem Vergleich.

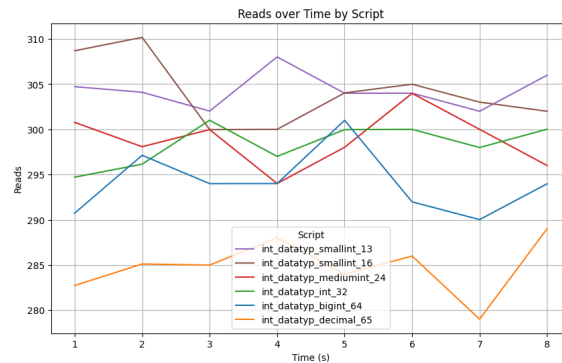
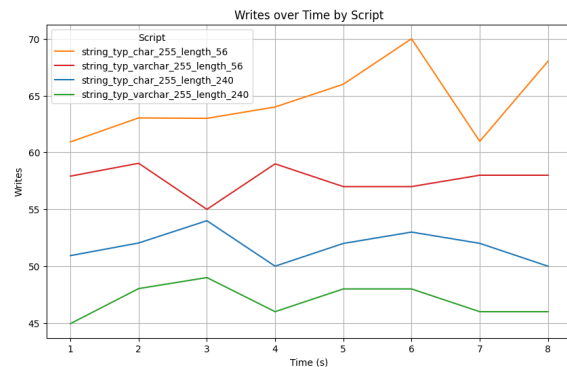
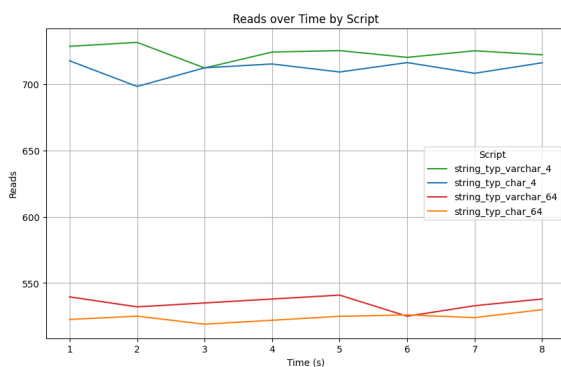


Abbildung 3.2: Vergleich von unterschiedlichen zeichenkettenbasierten Typen

Beim Vergleich zwischen den beiden Zeichenketten-Typen CHAR und VARCHAR ist unabhängig von der Länge zu erkennen, dass VARCHAR effizienter ist als CHAR (siehe 3.3a). Im ersten Vergleich wurde jeweils eine Länge von 4 Stellen verwendet und beim zweiten Vergleich eine Länge von 64 Stellen. Bei beiden untersuchten Längen ist VARCHAR schneller als CHAR.

Als letzten Vergleich haben beide Zeichenketten-Typen mit der Länge von 255 Stellen definiert, aber dafür mit unterschiedlich vielen Stellen befüllt. Anschließend haben wir bei beiden Tabellen die Werte aktualisiert und wenige Stellen bei der Namen-Spalte zufällig hinzugefügt. Bei den Ergebnissen fällt auf, dass CHAR schneller ist als VARCHAR (3.3b). Damit haben wir die Vermutungen aus Abschnitt 3.2 bestätigt, da die Vorteile von CHAR vor allem bei der Aktualisierung von Werten zum Tragen kommen, während VARCHAR bei der Selektion von Werten besser abschneidet.



(a) Unterschiedliche Zeichenketten-Typen

(b) Bei unterschiedlichem Befüllungsgrad

Abbildung 3.3: Vergleich von unterschiedlichen zeichenkettenbasierten Typen

4 Indizes

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Indexierung und den damit verbundenen Performance-Optimierungen, die näher erläutert werden. Zunächst betrachten wir einige Grundlagen der Indexierung. Anschließend lernen wir die verschiedenen Arten von Indizes näher kennen und führen unterschiedliche Benchmarks mit Ihnen durch. Im letzten Schritt analysieren wir die Ergebnisse und stellen fest, welche Verwendung der Indizes am besten funktioniert.

4.1 Grundlagen

Indizes sind Datenstrukturen, die von Speicher-Engines (engl. storage engines) verwendet werden, um unter anderem Zeilen schneller zu finden (Schwartz et al., [2012](#), pp. 147–189). Die Storage-Engine ist eine Kernkomponente eines Datenbankmanagementsystems, die für die Speicherung und Verwaltung der Daten verantwortlich ist. Verschiedene Storage-Engines unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Indexfunktionalität sowie der Unterstützung von Transaktionen und Sperrmechanismen. Im weiteren Verlauf werden wir verschiedene Indextypen kennenlernen, die nicht von allen Engines unterstützt werden.

Die Indizes haben einen großen Einfluss auf die Datenbank-Performance und werden mit zunehmender Größe der Datenbank immer wichtiger, da das Scannen aller Tupel zunehmend aufwendiger wird. Weniger ausgelastete Datenbanken können ohne ordnungsgemäße Indizes gut funktionieren, aber die Leistung kann rapide sinken, wenn die Datenmenge wächst. Wenn ein solches Problem auftritt, ist die Index-Optimierung oft der effektivste Weg, um die Abfrageleistung schnell zu verbessern. Um wirklich optimale Indizes zu erstellen, ist es häufig notwendig, Abfragen umzuschreiben. Besonders nützlich sind Indizes bei Abfragen, die Joins zwischen mehreren Tabellen enthalten, da sie ermöglichen, die Anzahl der zu prüfenden Tupel erheblich zu reduzieren, wenn eine einschränkende Bedingung vorliegt. Wie genau Indizes erstellt werden müssen, wird im Laufe dieses Kapitels geklärt.

Um die Funktionsweise eines Indexes anschaulicher zu erklären, betrachten wir als Beispiel ein wissenschaftliches Fachbuch. Am Ende dieser Bücher gibt es meist ein Stichwortverzeichnis oder Register. Dieses Register besteht aus einer alphabetisch geordneten Liste von Begriffen, Themen und Stichworten. Möchte man einen Begriff nachschlagen, sucht man

ihn im Stichwortverzeichnis und erhält die Seitenzahlen, auf denen er vorkommt. In DBMS verwendet die Storage-Engine Indizes auf eine ähnliche Weise. Sie durchsucht die Datenstruktur des Indexes nach einem Wert. Und wenn ein Treffer gefunden wird, kann die Engine die Zeilen ermitteln, die den Treffer enthalten. Betrachten wir dazu folgendes Beispiel:

```
1 SELECT NAME FROM KUNDEN WHERE KUNDEN_ID = 7;
```

Wenn wir annehmen, dass es einen Index auf der Spalte KUNDEN_ID gibt, dann nutzt MySQL diesen, um Zeilen zu finden, deren KUNDEN_ID gleich 7 ist. Mit anderen Worten wird eine Suche innerhalb der Indexwerte durchgeführt und alle entsprechenden Zeilen werden zurückgegeben.

Ein Index kann Werte aus einer oder mehreren Spalten einer Tabelle enthalten. Bei mehreren Spalten ist die Reihenfolge der Spalten im Index entscheidend, da MySQL nur effizient auf ein linkes Präfix des Indexes zugreifen kann. Gibt man nur das zweite Attribut an, ohne das erste zu referenzieren, kann der Index nicht direkt verwendet werden. Außerdem darf man nicht verwechseln, dass ein Index über zwei Spalten nicht gleichbedeutend ist mit zwei separaten einspaltigen Indizes. Es gibt verschiedene Typen von Indizes, die jeweils für unterschiedliche Zwecke optimiert sind und in den nächsten Abschnitten behandelt werden.

Um zu verstehen, wie man Indizes für eine Datenbank auswählt, ist es wichtig zu wissen, welcher Teil der Abfrage am meisten Zeit in Anspruch nimmt (Garcia-Molina, 2008, pp. 350–353). Das Datenbanksystem ist so aufgebaut, dass die Tupel einer Relation üblicherweise auf viele Seiten einer Festplatte verteilt sind, die jeweils mehrere Tausend Bytes umfassen und viele Tupel speichern. Um die Werte eines Tupels zu prüfen, muss die gesamte Seite, auch Block genannt, in den Hauptspeicher geladen werden. Dabei kostet es kaum mehr Zeit, alle Tupel einer Seite anstatt nur ein einzelnes zu prüfen.

In der Regel stellt der Schlüssel den sinnvollsten Index für eine Tabelle dar, weshalb MySQL standardmäßig den B-Tree-Index für Primary Keys verwendet (Oracle, 2025a). Die Entscheidung, ob für ein bestimmtes Attribut ein Index definiert werden soll, hängt von drei Faktoren ab: Erstens ist ein Index besonders nützlich, wenn Abfragen häufig auf ein bestimmtes Attribut zugreifen. Zweitens kann ein Index sinnvoll sein, wenn es nur wenige Tupel für einen bestimmten Wert des Attributs gibt, da dies den Festplattenzugriff bei einer Abfrage reduziert. Sobald nicht alle Blöcke geladen werden müssen, kann der Index Zeit sparen. Der letzte Fall betrifft Situation, in denen Tupel nach einem Attribut geclustert sind. Durch einen Index können müssen hier weniger Datenblöcke geladen werden, da die Werte des Attributs aufeinanderfolgender gespeichert sind. Mit diesen Faktoren können wir begründen, warum die Schlüssel einer Tabelle gut geeignet sind. Zum einen kommen sie oft in Abfragen vor (erster Punkt) und zum anderen enthalten sie keine doppelten Werte, da jedes Tupel einen eindeutigen Wert hat (zweiter Punkt).

Das Auswählen von Indizes erfordert von den Entwicklern eine Tradeoff abzuwägen. Es gibt dabei zwei Faktoren, die die Entscheidung beeinflussen. Zum einen kann ein Index auf einem Attribut Abfragen mit diesem Attribut erheblich beschleunigen. Zum anderen erschwert jeder Index Einfügungen, Löschungen und Aktualisierungen, da diese mehr Zeit und Aufwand erfordern. Aber selbst wenn Modifikationen die häufigste Form von Datenbankaktionen sind, kann ein Index auf ein häufig verwendetes Attribut die Leistung verbessern. Dies liegt daran, dass einige Modifikationsbefehle zuvor die Datenbank abfragen. Im Kapitel [Partitionen](#) wird uns dieses Thema wieder begegnen.

Um Zeitersparnis durch die Nutzung von Tupeln ohne vollständige Durchsuchung der Relation zu erreichen, müssen Indizes auf der Festplatte gespeichert werden. Dies führt jedoch zu zusätzlichen Festplattenzugriffen. Allgemein lässt sich sagen, dass Modifikationen in etwa doppelt so kostenintensiv sind wie der Zugriff auf den Index oder die Daten während einer Abfrage. Damit wir berechnen können, ob sich ein Index für eine Spalte lohnt, müssen wir wissen, in welcher Wahrscheinlichkeit Abfragen und Modifikationen durchgeführt werden.

Um die Vorgehensweise anhand einer beispielhaften Berechnung durchzuführen, benutzen wir die folgende Tabelle (abgeändertes Beispiel aus Garcia-Molina, 2008, pp. 355–357):

```
1 Fakten(Id, Bestelldatum, Artikel_Id, Kunden_Id, ...)
```

Der Schlüssel der Faktentabelle ist die Spalte Id und für die Attribute Artikel_Id und Kunden_Id erstellen wir jeweils einen Index. Damit haben wir inklusive des Primärschlüssels 3 unterschiedliche Indexe. Als Nächstes brauchen wir Befehle, bei denen die Indexe benutzt werden (siehe 4.1). In der ersten Zeile wird nur der Kundenindex verwendet, in der zweiten nur der Artikelindex und in der Letzten fügen wie eine Zeile ein.

Codeblock 4.1: Select-Queries für die Faktentabelle

```
1 SELECT Bestelldatum, Artikel_Id FROM Fakten WHERE Kunden_Id = k;  
2 SELECT Bestelldatum, Kunden_Id FROM Fakten WHERE Artikel_Id = a;  
3 INSERT INTO Fakten VALUES(i, b, a, k);
```

Damit wir berechnen können, ob es sinnvoll ist, die Indizes zu erstellen, müssen wir bestimmte Voraussetzungen festlegen. Zuerst gehen wir davon aus, dass die Faktentabelle 10 Datenblöcke belegt und im Durchschnitt kauft jeder Kunde 3 Artikel und ein Artikel wird von 3 Kunden gekauft. Die Tupel für einen bestimmten Kunden oder Artikel sind gleichmäßig über die 10 Seiten verteilt. Trotzdem sind mit einem Index nur 3 Festplattenzugriffe erforderlich, um die durchschnittlich 3 Tupel für einen Kunden oder Artikel zu finden. Dazu ist ein Festplattenzugriff erforderlich, um die Seite des Indexes zu lesen und ein weiterer, um die modifizierte Seite zurückzuschreiben, falls eine Indexseite geändert werden muss. Haben wir keinen Index, sind 10 Festplattenzugriffe zum Lesen und zwei Festplattenzugriffe für Schreiben erforderlich. Mit diesen Bedingungen kommen wir zu folgender Kostentabelle:

Aktion	Kein Index	Kunden Index	Artikel Index	Beide Indizes
Q_1	10	4	10	4
Q_2	10	10	4	4
I	2	4	4	6
Durchschnitt	$2 + 8p_1 + 8p_2$	$4 + 6p_2$	$4 + 6p_1$	$6 - 2p_1 - 2p_2$

Tabelle 4.1: Kosten der unterschiedlichen Queries in Abhängigkeit der Indizes

Die letzte Zeile aus Tabelle 4.1 gibt die durchschnittlichen Kosten einer Aktion an. Unter der Annahme, dass der Anteil der Zeit, in der wir die erste Abfrage ausführen, p_1 beträgt und der Anteil der Zeit für die zweite Query p_2 ist. Da die gesamte Zeit in einem System 100% ausmacht, beträgt der Anteil der Zeit, in der wir I ausführen: $1 - p_1 - p_2$. Den Durchschnitt für den Kundenindex berechnen wir wie folgt:

$$4p_1 + 10p_2 + 4 \cdot (1 - p_1 - p_2) = 4p_1 + 10p_2 + 4 - 4p_1 - 4p_2 = 4 + 6p_2$$

Abhängig von den Werten für p_1 und p_2 kann jede der vier Optionen die geringsten Kosten für die drei Operationen verursachen. Zum Beispiel, wenn $p_1 = p_2 = 0,1$, dann ist der Ausdruck $2 + 8p_1 + 8p_2$ am kleinsten, sodass wir keine Indizes bevorzugen würden. Wenn jedoch $p_1 = 0,5$ und $p_2 = 0,1$ gelten, ergibt ein Index für die Kunden den besten Durchschnittswert.

Damit haben wir gezeigt, dass es sinnvoll ist, keinen Index zu verwenden, wenn überwiegend Einfügungen durchgeführt werden und nur sehr wenige Abfragen anfallen. Intuitiv, wenn wir viele Abfragen durchführen und die Anzahl der Abfragen, die Artikel und Kunden angeben, ungefähr gleich häufig sind, dann sind beide Indizes erwünscht. Wenn wir nur ein Typ von Query häufig verwenden, dann sollten wir nur den Index definieren, der uns bei dieser hilft.

Es gibt zahlreiche Tools, die entwickelt wurden, um die Verantwortung der Wahl der Indizes vom Datenbankdesigner zu übernehmen. Dabei optimiert das System sich selbst oder dem Designer werden zumindest Empfehlungen für sinnvolle Entscheidungen gegeben. Ein bewährter Ansatz zur Auswahl von Indizes ist das sogenannte Greedy-Verfahren (Matzer, 2019), bei dem zunächst ohne ausgewählte Indizes der Nutzen jedes Kandidaten-Index bewertet wird. Wenn es einen Index mit positivem Nutzen gibt, wird dieser ausgewählt und anschließend wird eine Neubewertung ausgeführt, wobei davon ausgegangen wird, dass der zuvor ausgewählte Index bereits verfügbar ist. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis es keinen Kandidaten-Index mit positivem Nutzen mehr gibt.

4.2 B-Baum-Index

Der erste zu betrachtende Indextyp ist der B-Baum-Index (engl. B-Tree Index), der auf einer speziellen Baum-Datenstruktur basiert. Diese Struktur wird von den meisten MySQL-Storage-Engines unterstützt. Die Implementierung und Nutzung des B-Baum-Indexes kann jedoch je nach verwendeter Storage-Engine variieren.

Das Grundprinzip eines B-Baums ist, dass alle Werte in einer bestimmten Reihenfolge gespeichert werden und jede Blattseite den gleichen Abstand zum Wurzelknoten hat. Ein B-Baum-Index beschleunigt den Datenzugriff, da die Storage-Engine nicht die gesamte Tabelle durchsuchen muss, um die gewünschten Daten zu finden. Stattdessen beginnt die Suche beim Wurzelknoten.

Die Slots im Wurzelknoten enthalten Zeiger auf Kindknoten und die Storage-Engine folgt diesen Zeigern. Der richtige Zeiger wird durch Vergleich der Werte in den Knoten-Seiten (engl. node pages) ermittelt, die die oberen und unteren Grenzen der Werte in den Kindknoten definieren. Letztlich stellt die Storage-Engine fest, ob der gewünschte Wert existiert oder ob sie erfolgreich eine Blatt (engl. leaf page) erreicht.

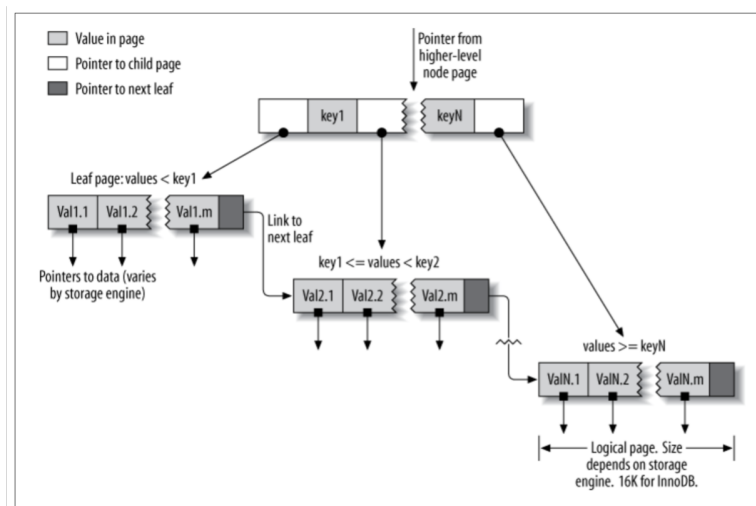


Abbildung 4.1: Binär-Baums-Darstellung (Abbildung 5–1 aus Schwartz et al., 2012, S. 149)

Die Blätter sind besonders, da sie Zeiger auf die indexierten Daten enthalten, anstatt auf andere Seiten zu verweisen. Zwischen dem Wurzelknoten und den Blattseiten können viele Ebenen von Knoten-Seiten existieren. Die Tiefe des Baumes hängt von der Größe der Tabelle ab. Außerdem speichern B-Bäume die indexierten Spalten in einer festgelegten Reihenfolge, was sie besonders nützlich für die Suche nach Datenbereichen macht. Beispielsweise kann ein Index auf einem Textfeld (z.B. vom Typ VARCHAR) effizient alle Namen finden, die mit „K“ beginnen, da die Werte in alphabetischer Reihenfolge gespeichert sind.

Der Index sortiert die Werte entsprechend der Reihenfolge der in der `CREATE INDEX`-Anweisung angegebenen Spalten, beispielsweise kann man wie folgt ein Index erstellen:

Codeblock 4.2: B-Baum-Index bestehend aus mehreren Attributen

```
1 CREATE INDEX combined_index ON KUNDEN(NAME, VORNAME, GEBURTSTAG);
```

Als Nächstes betrachten wir die möglichen Abfragen, bei denen B-Baum-Indizes besonders hilfreich sind, um ein besseres Verständnis für ihre optimale Nutzung zu erlangen. Eine Übereinstimmung mit dem vollständigen Schlüsselwert liefert Werte für alle Spalten im Index. Eine beispielhafte Abfrage zur Suche nach allen Einträgen mit dem Index aus 4.2 ist die Suche nach allen Kunden, die Max Mustermann heißen und am 01.01.2000 geboren wurden. Auch Abfragen, die nur mit dem linken Präfix übereinstimmen, können von diesem Index profitieren. So lässt sich etwa gezielt nach dem Nachnamen „Mustermann“ suchen. Ebenso ist es möglich, nur ein Spaltenpräfix zu verwenden, etwa um alle Nachnamen zu finden, die mit „M“ beginnen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei Bereichsabfragen, denn der Index kann effizient genutzt werden, um Nachnamen zwischen „Mustermann“ und „Müller“ zu ermitteln. Darüber hinaus unterstützt ein B-Baum-Index auch Kombinationen aus exakten und Bereichsabfragen, beispielsweise wenn nach dem Nachnamen „Mustermann“ gesucht wird, während der Vorname innerhalb eines Bereichs liegt, etwa ab „Ma“. Ein weiterer Vorteil von B-Baum-Indizes ist, dass sie aufgrund der sortierten Baumstruktur nicht nur Abfragen, sondern auch `ORDER BY`-Bedingungen effizient unterstützen können.

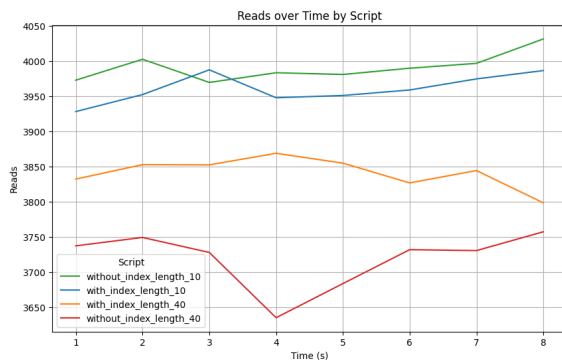
Es gibt jedoch Einschränkungen von B-Baum-Indizes, die dazu führen, dass andere Indextypen für bestimmte Szenarien besser geeignet sind. Eine Einschränkung ist, dass die Suche nicht am rechten Ende des Indexes beginnen kann. Beispielsweise ist der Beispiels-Index nicht dazu geeignet, alle Personen zu finden, die vor dem Jahr 2000 geboren wurden, ohne dass der Nachname und Vorname ebenfalls spezifiziert werden. Für optimale Leistung kann es auch erforderlich sein, dass Indizes mit den gleichen Spalten, jedoch in unterschiedlicher Reihenfolge erstellt werden. Auf diese Weise könnten mehr Kombinationen abgedeckt und zusätzlich einige Abfragen optimiert werden.

Im nächsten Abschnitt führen wir die Benchmarks durch, um das Verständnis für die Funktionsweise des B-Baum-Indexes zu bestätigen. Dafür erstellen wir zunächst wieder die Kundentabelle (2.4) und definieren für den ersten Vergleich folgende Indizes:

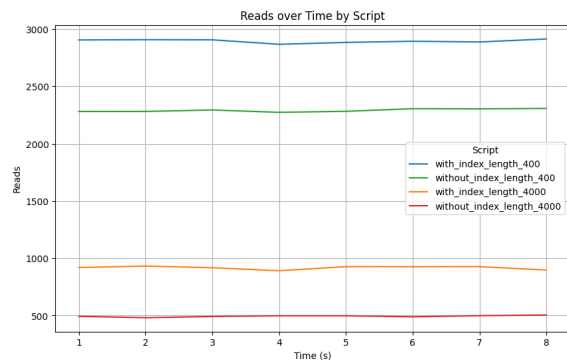
Codeblock 4.3: Definition mehrere Indizes

```
1 CREATE INDEX idx_stadt ON KUNDEN(STADT);  
2 CREATE INDEX idx_postleitzahl ON KUNDEN(POSTLEITZAHL);  
3 CREATE INDEX idx_geburtstag ON KUNDEN(GEBURTSTAG);
```

Um die Effizienz dieser Indizes einordnen zu können, vergleichen wir diese Konfiguration mit einer, bei der nur die Kundentabelle ohne Indizes erstellt wird. In beiden Fällen werden eine bestimmte Anzahl an Datensätzen eingefügt. Um die Performance der Select-Abfragen zu messen, führen wir verschiedene Queries an die Datenbank aus, bei denen die Attribute GEBURTSTAG, STADT und POSTLEITZAHL berücksichtigt werden. Dazu gehören GROUP BY- und COUNT-Abfragen, bei denen die Index-Attribute verwendet werden oder sie spielen in der WHERE-Bedingung eine Rolle. Damit es übersichtlich bleibt, vergleichen wir einmal 10 Datensätze mit 40 und einmal 400 mit 4000 Zeilen.



(a) Mit 10 und 40 Datensätze



(b) Mit 400 und 4000 Zeilen

Abbildung 4.2: Grafik zeigt Performance mit und ohne Index für Readsabfragen

In der Abbildung 4.2a können wir erkennen, dass bei 10 Datensätzen die Kundentabelle ohne Indizes schneller ist als diejenige mit. Bei 40, 400 oder 4000 (siehe 4.2b) Zeilen sehen wir schon die Wirkung, die die Indizes haben können, denn dort ist jeweils die Version mit Indizes effizienter. Der Unterschied bei 40 Datensätzen ist zwar etwas geringer, aber in den anderen Fällen sehen noch eindeutige Unterschiede. Interessant ist, dass es nicht linear oder quadratisch mit der Anzahl an Datensätzen in der Tabelle steigt, sondern bei 400 und 4000 Zeilen beträgt der Unterschied zur Tabelle ohne Index jeweils etwa 500–700 Abfragen. Bei der Schreibgeschwindigkeit liegen beide auf einem sehr ähnlichen Niveau, wobei die Version ohne Index tendenziell einen leichten Vorteil hat.

Mit dem vorherigen Benchmark können wir die Vorteile eines Indexes schon deutlich erkennen. Jetzt wollen wir aber auch die Funktionalität des B-Tree-Indexes in Bezug auf unterschiedliche Selects untersuchen. Dazu erstellen wir erneut die Kundentabelle, aber dieses Mal definieren wir nur einen Index (siehe 4.2). Anschließend befüllen wir die Tabelle mit einer festgelegten Anzahl an Datensätzen und führen unterschiedliche Select-Befehle aus. Im Codeblock 4.4 sehen wir aus Platzgründen nur die Where-Bedingung und am Ende jeder Zeile steht der Name der Query, damit wir später in der Analyse wissen, welcher Query welche Performance bringt.

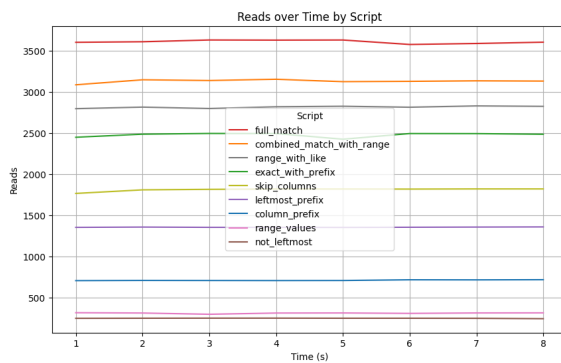
Codeblock 4.4: Unterschiedliche Where-Bedingungen für B-Tree-Index

```

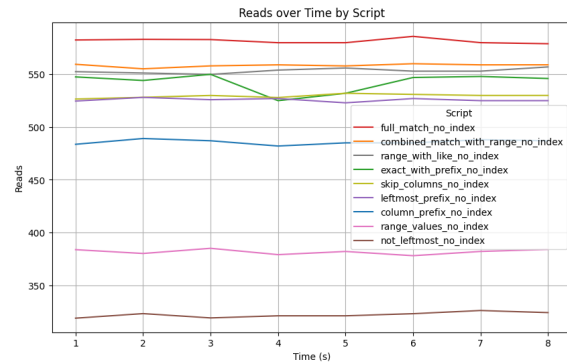
1 WHERE NAME LIKE 'M%'; -- column_prefix
2 WHERE NAME = 'Müller' AND VORNAME = 'Max' AND GEBURTSTAG < '1980-01-01'; -- combined_match_with_range
3 WHERE NAME = 'Müller' AND VORNAME LIKE 'M%' ORDER BY GEBURTSTAG; -- exact_with_prefix
4 WHERE NAME = 'Müller' AND VORNAME = 'Max' AND GEBURTSTAG = '1960-01-01'; -- full_match
5 WHERE NAME = 'Müller'; -- leftmost_prefix
6 WHERE GEBURTSTAG < '1980-01-01'; -- not_leftmost
7 WHERE NAME BETWEEN 'Müller' AND 'Schulz'; -- range_values
8 WHERE NAME = 'Müller' AND VORNAME LIKE 'M%' AND GEBURTSTAG < '1980-01-01'; -- range_with_like
9 WHERE NAME = 'Müller' AND GEBURTSTAG < '1980-01-01'; -- skip_columns

```

Anhand der Grafik in Abbildung 4.3 lässt sich erkennen, bei welchen Abfragen der Index am effizientesten ist. Auf der linken Seite können wir die Ergebnisse für die Read-Befehle mit Index betrachten und auf der rechten Seite die Werte ohne Index.



(a) Mit Index



(b) Ohne Index

Abbildung 4.3: Visualisierung von unterschiedlichen Select-Queries mit und ohne Index

Zunächst fällt auf, dass die Reihenfolge für die Werte mit und ohne Index komplett identisch ist. Dies ist direkt erkennbar, da die Legenden beider Grafiken nach dem durchschnittlichen Wert über die gesamte Zeit sortiert sind. Damit wir aber die richtigen Schlüsse aus der Grafik ziehen können, müssen wir herausfinden, wie viele Zeilen die unterschiedlichen Queries zurückgeben. Dazu führen wir die Abfragen zusätzlich mit dem COUNT(*)-Operator durch und schreiben die Ergebnisse auch in die log-Datei. Anschließend entnehmen wir die Werte und fügen sie in einer Tabelle zusammen.

Select-Query	Anzahl an Zeilen	Faktor	Index benutzt?
full_match	0	6.42	ja
combined_match_with_range	13	5.78	ja
range_with_like	31	5.22	ja
exact_with_prefix	51	5.14	ja
skip_columns	147	3.47	ja
leftmost_prefix	263	2.73	ja
column_prefix	551	1.69	ja
range_values	1343	0.96	nein
not_leftmost	2371	0.98	nein

Tabelle 4.2: Ergebnisse der COUNT(*)-Abfragen für B-Tree-Index

Anhand der Spalte `Anzahl an Zeilen` können wir erkennen, dass die Queries, die am wenigsten Zeilen zurückgeben, auch diejenigen sind, bei denen es die höchste Performance gibt. Deshalb ist auch die Reihenfolge mit und ohne Index gleich, weshalb man meinen könnte, dass der Index keinen Einfluss auf die Performance hat. Dies betrifft aber nur die Reihenfolge, nicht jedoch die Werte der Abfragen, da wir hier deutliche Unterschiede sehen. Anschaulich wird das mit der Betrachtung der Spalte `Faktor`. Um den Wert zu berechnen, entnehmen wir die Werte aus der Gesamtstatistik und teilen die mit Index durch die ohne Index. Damit können wir sehen, dass `full_match` zwar bei beiden Versionen am schnellsten im Vergleich ist, aber mit Index etwa 6-mal schneller als ohne ist. Es lässt sich auch erkennen, dass je weniger Zeilen zurückgegeben werden, desto größer ist der Faktor. Bei den Queries `range_values` und `not_leftmost` liegt der Faktor sehr nah 1, was bedeutet, dass der Index keinen Einfluss auf die Performance hat. Deshalb stellt sich auch die Frage, ob der Index überhaupt verwendet wird. Um das zu überprüfen, verwenden wir den `EXPLAIN`-Operator, loggen wieder das Ergebnis und fügen es der Tabelle hinzu (siehe Spalte `Index benutzt?`). Und tatsächlich sehen wir, dass die vermuteten Queries die einzigen sind, bei denen der Index nicht verwendet wird.

4.3 Hash-Index

Ein weiterer Indextyp, den wir betrachten, ist der Hash-Index. Dieser basiert auf einer Hash-Tabelle und ist daher nur für exakte Suchanfragen geeignet, die alle Spalten des Indexes verwenden. In MySQL unterstützt nur die Memory-Storage-Engine explizite Hash-Indizes. Einige Storage-Engines, wie zum Beispiel InnoDB, können erkennen, wenn bestimmte Index-Werte besonders häufig abgefragt werden. Sie erstellen dann automatisch einen Hash-Index für diese Werte im Speicher, der zusätzlich zu den bestehenden B-Baum-Indizes genutzt wird. Die Funktionsweise der Storage-Engine lässt sich wie folgt beschreiben.

Für jede Zeile wird mithilfe einer Hash-Funktion ein Hash-Wert der indexierten Spalte berechnet. Der Hash-Wert (engl. hash code) ist eine kleine Zahl, die sich in der Regel von den Hash-Werten anderer Zeilen mit unterschiedlichen Schlüsselwerten unterscheidet. Anschließend wird die Position im Index gesucht und man findet einen Zeiger auf die entsprechende Zeile. In letzten Schritt überprüft man die Werte der Zeile, um sicherzustellen, dass es sich um die richtige Zeile handelt.

Wenn mehrere Werte denselben Hash-Wert besitzen, speichert der Index die Zeiger auf die Zeilen (engl. row pointers) in demselben Hash-Tabelleneintrag, typischerweise mithilfe einer verketteten Liste (z.B. einer *Linked List*). Hash-Kollisionen können die Leistung eines Hash-Index beeinträchtigen, da jeder Zeiger in der verketteten Liste durchlaufen und die entsprechenden Werte mit dem Suchwert verglichen werden müssen, um die richtigen Zeilen zu finden. Das ist auch Index-Wartungsoperationen mit viel Aufwand verbunden. Hingegen

eindeutige Hash-Indizes stellen sicher, dass für jeden Hash-Wert nur ein einziger Eintrag existiert. Bei Konflikten wird ein Mechanismus wie die Open Addressing-Strategie (z.B. Linear Probing oder Quadratic Probing) eingesetzt, um Konflikte zu lösen und den Speicherplatz effizient zu verwalten. Hierbei wird versucht, Konflikte direkt innerhalb der Hash-Tabelle zu bewältigen, anstatt auf zusätzliche Datenstrukturen wie verkettete Listen zurückzugreifen. Die eindeutigen Hash-Indizes werden nicht von der Memory-Engine in MySQL unterstützt.

Um die Verwendung des Hash-Indexes zu veranschaulichen, benutzen folgendes Beispiel:

```
1 SELECT * FROM KUNDEN WHERE NAME = 'Peter';
```

Zunächst berechnet MySQL den Hash-Wert für 'Peter' und verwendet diesen, um den entsprechenden Zeiger im Index zu finden. Angenommen, die Hash-Funktion liefert für 'Peter' den Wert **7654**. MySQL sucht nun im Index an der Position 7654 und findet einen Zeiger auf Zeile 3. Im letzten Schritt wird der Wert in Zeile 3 mit 'Peter' verglichen. Da die Indizes nur kompakte Hash-Werte speichern, sind Hash-Indizes äußerst platzsparend und Suchvorgänge erfolgen in hoher Geschwindigkeit.

Ähnlich wie der B-Baum-Index hat auch der Hash-Index einige Einschränkungen. Zum einen enthält der Index nur Hash-Werte und Zeiger auf Zeilen (engl. row pointers), jedoch nicht die Werte selbst. Deshalb kann MySQL den Index nicht verwenden, um das Einlesen der Zeilen zu vermeiden. Allerdings erfolgt der Zugriff auf die in den Speicher geladenen Zeilen sehr schnell, wodurch die Leistung nicht wesentlich beeinträchtigt ist. Zum anderen können Hash-Indizes nicht für Sortierungen verwendet werden, da die Werte nicht in einer geordneten Reihenfolge gespeichert sind. Im Gegensatz dazu sind B-Baum-Indizes in der Lage. Darüber hinaus ermöglichen Hash-Indizes keine partiellen Schlüsselübereinstimmungen (engl. partial key matching). Da der Hash-Wert aus dem gesamten indexierten Wert berechnet wird, hilft ein Hash-Index beispielsweise nicht, wenn ein Index aus den Spalten (A, B) besteht und die WHERE-Klausel nur auf A verweist. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Hash-Indizes keine Bereichsabfragen unterstützen. Sie eignen sich lediglich für Gleichheitsvergleiche, wie die Operatoren = (gleich), <=> (null-sicher gleich) und IN().

Als Nächstes kommen wir zu den Benchmarks mit Hash-Indizes. Dazu verwenden wir erneut die Kundentabelle und erstellen nur einen Index für die Spalte NAME. Am Ende des CREATE INDEX-Befehl müssen wir USING HASH hinzufügen, damit anstelle des standartmäßigen B-Tree-Index der Hash-Index verwendet wird. Danach befüllen wieder die Tabelle mit Testdaten.

Diesmal untersuchen wir beim ersten Benchmark den Einfluss von Hash-Kollisionen für die Performance. Um den Grad der Kollisionen zu verändern haben wir eine Variable, die die obere Grenze für die zufällige Generierung einer Zahl, darstellt. Anschließend fragen wir alle Zeilen mit dem Wert Kunde_1 für die Spalte NAME ab und führen die Tests mit den Kollisionswahrscheinlichkeiten von 25%, 10%, 5% und 1% durch.

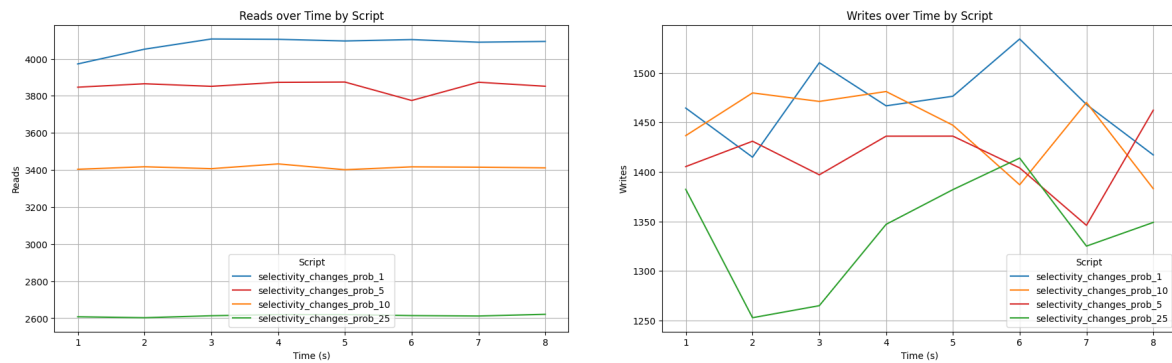


Abbildung 4.4: Vergleich der Auswirkungen von Hashkollisionen

An den Ergebnissen in Abbildung 4.4 können wir sehen, dass je geringer die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision ist, desto schneller ist die Select-Abfrage. Es fällt auch auf, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kollisionswahrscheinlichkeiten sehr groß sind. Hingegen die Einfüge-Performance ist bei allen 4 Varianten auf einem ähnlichen Niveau.

Als zweiten Test wollen wir überprüfen, ob der Index bei bestimmten Select-Queries benutzt wird oder nicht. Wir verwenden erneut die Kundentabelle, erstellen den gleichen Index wie in Beispiel 4.2, fügen die Testdaten ein und nutzen die Select-Befehle aus 4.4. Dieses Mal benutzen wir aber nicht alle Select-Befehle, sondern nur die aus folgender Tabelle:

Select-Query	Anzahl an Zeilen	Faktor	Index benutzt?
full_match	0	2.67	ja
combined_match_with_range	6	0.97	nein
exact_with_prefix	45	1.01	nein
leftmost_prefix	206	1.00	nein

Tabelle 4.3: Ergebnisse der COUNT(*)-Abfragen für Hash-Index

Anhand der Spalten Faktor und Index benutzt? können wir erkennen, dass der Index nur bei der full_match-Abfrage benutzt wird. Das stimmt auch mit den Ergebnissen aus der Abbildung 4.5 überein, da ohne Index alle Abfragen auch einem ähnlichen Niveau liegen, aber mit Index sticht eine deutlich hervor. Interessant ist, dass die Query mit 206 zurückgegebenen Zeilen nur unwesentlich langsamer ist als die anderen. Die Reihenfolge ist wieder bei beiden identisch und hängt von der Anzahl der zurückgegebenen Zeilen ab.

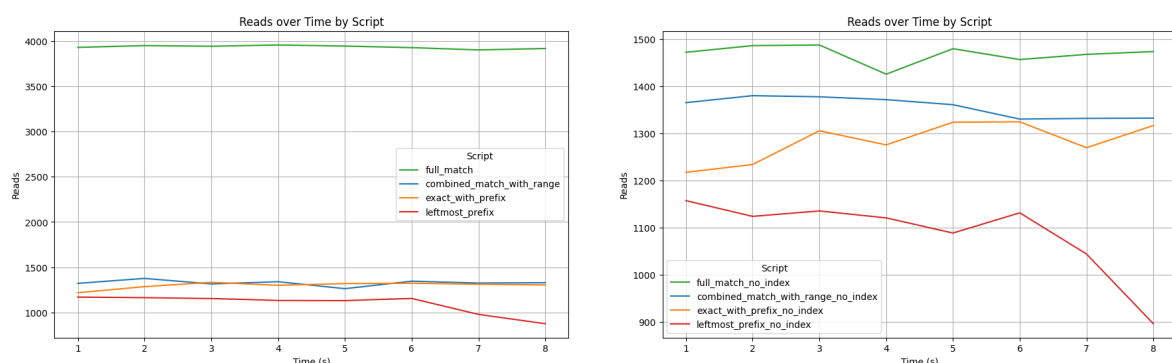
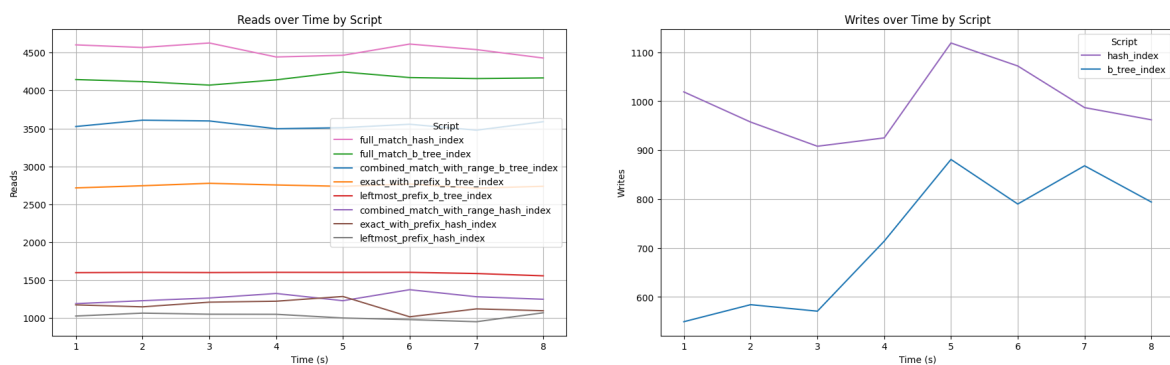


Abbildung 4.5: Grafik visualisiert Select-Queries mit (links) und ohne (rechts) Index

4.4 Vergleich von B-Tree- und Hash-Index

In den vorherigen Kapiteln haben wir den B-Tree-Index und den Hash-Index jeweils getrennt voneinander betrachtet. Dabei haben wir auch analysiert, bei welchen Select-Queries die Indizes Vorteile bringen und bei welchen nicht. Damit fehlt uns noch der Vergleich zwischen dem B-Tree-Index und dem Hash-Index.

Um die Unterschiede zwischen beiden Indexstrukturen genauer zu analysieren, führen wir einen neuen Benchmark durch, der die Skripte aus Kapitel 4.2 und 4.3 wiederverwendet. Da der Hash-Tree aber nur 4 unterschiedliche Select-Queries aufruft, wollen wir auch nur diese mit dem B-Tree-Index aufrufen. Dazu fügen wir einfach den Parameter `selects` beim Aufruf des Orchestrator-Skripts hinzu und führen es anschließend aus.



(a) Anzahl der Lesezugriffe

(b) Anzahl der Schreibzugriffe

Abbildung 4.6: Vergleich der Select-Query-Performance von B-Tree- und Hash-Index

In der Abbildung 4.6a sehen die Performance für die unterschiedlichen Select-Befehle. Die höchste Transaktionsrate erzielt der Hash-Index, sofern der vollständige Schlüssel angegeben wird (`full_match`). Dicht darauf folgt der B-Tree-Index mit derselben Abfrage, allerdings mit etwa 10% weniger Zugriffen. Bei den übrigen Abfragen schneidet hingegen der B-Tree-Index deutlich besser ab, in einigen Fällen sogar bis zu dreimal schneller als der Hash-Index. Den Grund dafür kennen wir schon aus den anderen Kapiteln. Da der Hash-Index nur bei exaktem Schlüsselabgleich zum Einsatz kommt, wird er bei den anderen Abfragen nicht verwendet. Mithilfe des EXPLAIN-Operators haben wir festgestellt, dass stattdessen der B-Tree-Index genutzt wird, was die starken Unterschiede erklärt.

Betrachtet man die Schreibperformance (Abbildung 4.6b), zeigt sich, dass der Hash-Index etwa 30–40% schneller ist als der B-Tree-Index. Wenn eine Anwendung also eine hohe Schreiblast hat, könnte der Hash-Index eine bessere Wahl sein, da er weniger Mehraufwand verursacht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Hash-Index einen leichten Vorteil hat, wenn beide Indexe greifen. Andernfalls überwiegen die Stärken des B-Tree-Indexes.

5 Views

Im folgenden Kapitel betrachten wir die Performancevorteile von Sichten (engl. Views) in SQL. Zunächst befassen wir uns mit virtuellen Sichten, ihren Vor- und Nachteilen, dem Verhalten bei Inserts sowie möglichen Szenarien, in denen sie besonders vorteilhaft sein können. Anschließend beschäftigen wir uns mit materialisierten Sichten, die physisch in der Datenbank gespeichert werden. Zunächst implementieren wir eine Version mit Triggern, da MySQL keine native Unterstützung für materialisierte Sichten bietet, bevor wir die native Implementierung in PostgreSQL nutzen. In den letzten beiden Kapiteln betrachten wir die Durchführung der Benchmarks näher und interpretieren die entstandenen Ergebnisse.

5.1 Virtuelle Views

Grundlegend existieren Relationen, bzw. Tabellen, die durch das CREATE TABLE-Statement definiert werden, physisch in der Datenbank. Damit sind sie persistent, was bedeutet, dass sie dauerhaft existieren und sich nicht ändern, es sei denn, sie werden explizit durch eine SQL-Änderungsanweisung dazu aufgefordert. Dies entspricht der Dauerhaftigkeit des ACID-Prinzips (Luber, 2018), die sicherstellt, dass bestätigte Transaktionen dauerhaft gespeichert bleiben und auch bei Systemausfällen nicht verloren gehen. Es gibt jedoch eine weitere Klasse von SQL-Relationen, die nicht wie Tabellen physisch gespeichert werden (Garcia-Molina, 2008, S. 341–349, 353–366, Schwartz et al., 2012, pp. 276–281). Sie werden als virtuelle Sichten bezeichnet. Virtuelle Sichten werden durch einen Ausdruck definiert, der einer Abfrage ähnelt. Sie können auch so abgefragt werden, als ob sie tatsächlich physisch existierten. In einigen Fällen kann man sogar die Datensätze über die Sicht geändert werden.

Codeblock 5.1: Allgemeine View-Deklaration

```
1 CREATE VIEW <name> AS <view-definition>;
```

In dem Codeblock 5.1 sehen wir die Struktur der Definition einer View. Als Nächstes müssen wir die view-definition mit einer SQL-Abfrage ersetzen, die den Inhalt der virtuellen Sicht abbilden soll. Um dieses Vorgehen mit einem Beispiel näher zu veranschaulichen, nutzen wir die Tabellen Kunden (2.4) und Bestellung (2.5). Nun wollen wir, dass die beiden Tabellen über

die KUNDEN_ID in der Sicht zusammengefügt werden, da sie sowohl der Primärschlüssel in der Kundentabelle als auch der Fremdschlüssel in der Bestellung ist. Um in die SQL-Abfrage noch etwas mehr Komplexität zu bekommen, wollen wir neben der Join-Operation zusätzlich den Umsatz pro Jahr und pro Stadt aggregieren. Die View KUNDEN_OVERVIEW hat folgende Struktur:

Codeblock 5.2: View Deklaration

```
1 CREATE VIEW KUNDEN_OVERVIEW AS
2 SELECT
3     EXTRACT(YEAR FROM B.BESTELLDATUM) AS Jahr,
4     K.LAND AS Land,
5     SUM(B.UMSATZ) AS Gesamtumsatz
6 FROM KUNDEN K
7     JOIN BESTELLUNG B ON K.KUNDEN_ID = B.FK_KUNDEN
8 GROUP BY EXTRACT(YEAR FROM B.BESTELLDATUM), K.LAND;
```

Diese Aggregation könnte beispielsweise von einem Marketingteam genutzt werden, um schwache Regionen pro Jahr zu identifizieren und gezielt in diesen nachzusteuern. Wenn wir die Daten dieser virtuellen Sicht abfragen wollen, dann adressieren wir den Namen in der FROM-Klausel und verlassen uns darauf, dass das Datenbankmanagementsystem die benötigten Tupel erzielt (siehe 5.3). Dabei operiert das DBMS direkt auf den Relationen, die die virtuelle Sicht definieren. In unserem Fall sind das die Kunden- und Bestelltabelle.

Codeblock 5.3: SQL-Befehl mit verwendeter View

```
1 SELECT * FROM KUNDEN_OVERVIEW
2 ORDER BY Jahr ASC, Gesamtumsatz DESC;
```

Eine weitere Möglichkeit, die Funktionsweise einer Sicht besser zu verstehen, besteht darin, sie in einer FROM-Klausel durch eine Unterabfrage zu ersetzen, die identisch mit der Sichtdefinition ist. Damit wir Bezug auf die Tupel nehmen können, muss die Unterabfrage noch mit einer Tupelvariablen ergänzt werden. Die Unterabfrage müssen wir noch mit einer Tupelvariablen ergänzen, damit wir auch Bezug auf die Tupel nehmen können. Die SQL-Abfrage aus 5.4 liefert das gleiche Ergebnis wie die aus 5.3, wenn wir unsere View wie im Beispiel 5.2 definieren. Zu dem Einfluss auf die Performance kommen wir im Unterkapitel 5.3.

Codeblock 5.4: Select-Befehl ohne Sicht

```
1 SELECT YEAR(B.BESTELLDATUM) AS Jahr, K.LAND AS Land, SUM(B.UMSATZ) AS Gesamtumsatz
2 FROM KUNDEN K
3     JOIN BESTELLUNG B ON K.KUNDEN_ID = B.FK_KUNDEN
4 GROUP BY YEAR(B.BESTELLDATUM), K.LAND
5 ORDER BY Jahr ASC, Gesamtumsatz DESC;
```

Man kann den Attributen einer Sicht auch eigene Namen vergeben, indem man sie in Klammern hinter dem Namen der Sicht aus der CREATE VIEW-Anweisung auflistet. Die Definition einer Sicht kann mit DROP VIEW <view-name> gelöscht werden, wodurch keine Abfragen mehr auf dieser Sicht ausgeführt werden können. Das Löschen der Sicht hat jedoch keine Auswirkungen auf die Tupel der zugrundeliegenden Tabellen. Im Gegensatz dazu würde DROP TABLE <table-name> die Tabelle löschen und damit auch die darauf basierenden Sichten unbrauchbar machen, da ihre Definitionen auf der gelöschten Tabelle beruhen.

Abgesehen vom Löschen der Tabellen kann man auch Einfügungen an der View durchführen. Dies ist aber nicht uneingeschränkt möglich und nur unter bestimmten Bedingungen erlaubt. Zum einen muss die Sicht durch eine einfache Abfrage aus nur einer einzigen Relation definiert sein. Zum anderen muss die SELECT-Klausel ausreichend Attribute umfassen, sodass fehlende Werte bei Einfügungen mit NULL oder anderen definierten Standardwerten ergänzt werden können. Die Änderungen werden dann direkt auf die Basistabelle angewendet, wobei nur die in der Sicht definierten Attribute berücksichtigt werden. Wenn die eben beschriebenen Bedingungen erfüllt sind, werden auch bei Löschungen und Aktualisierungen die Änderungen auf die zugrundeliegende Relation R übertragen. Dabei wird die WHERE-Bedingung der View zu den Bedingungen der Änderung im WHERE-Block hinzugefügt. Wenn die Bedingungen nicht erfüllt sind, wie in unserem Beispiel (5.2), weil mehrere Relationen in der View verwendet werden, müssen Änderungen direkt an den zugrunde liegenden Tabellen vorgenommen werden. In diesem Fall kann die View nur für Select-Abfragen genutzt werden.

Das Einfügen über die Sicht ist jedoch nicht die intuitivste Möglichkeit, um Änderungen an den unterliegenden Tabellen durchzuführen. Das liegt vor allem an dem Umgang mit den nicht definierten Werten, weshalb sich das Konzept von Triggern anbietet. Trigger in SQL sind Datenbankobjekte, die mit einer Tabelle verknüpft sind und sobald bestimmte Ereignisse eintreten, führen sie eine Reihe von Anweisungen aus (DataScientest, 2023). Die Auslösung eines Triggers kann entweder vor (BEFORE) oder nach (AFTER) einem bestimmten Ereignis erfolgen, wie INSERT, UPDATE oder DELETE. Bei Triggern auf Sichten können auch INSTEAD-OF-Trigger verwendet werden, die Änderungsversuche an der Sicht abfangen und stattdessen eine frei definierbare Aktion ausführen.

Codeblock 5.5: Allgemeine Trigger Deklaration

```
1 CREATE TRIGGER trigger_name
2 {BEFORE | AFTER | INSTEAD OF} {INSERT | UPDATE | DELETE}
3 ON {table_name | view_name}
4 FOR EACH ROW
5 trigger_body;
```

Das Problem in MySQL mit Triggern ist aber, dass sie nur auf Tabellen angewendet werden können. Später werden wir dazu im Kapitel 5.3 noch ein genaueres Beispiel betrachten. Um

Werte in eine virtuelle Sicht einzufügen, bietet sich jedoch das Konzept der Stored Procedures an. Stored Procedures sind Funktionen, die direkt im DB-Server hinterlegt werden und wie andere integrierte Funktionen, wie z.B. round(), aufgerufen werden können.

Codeblock 5.6: Allgemeine Prozedur Deklaration

```
1 CREATE PROCEDURE stored_procedure_name(IN param1 INT, IN param2 VARCHAR(255))
2 BEGIN
3     -- smth
4 END
```

Damit wir für die Sicht aus unserem Beispiel 5.2 Daten einfügen können, muss die Prozedur die gleichen Parameter, wie die Spalten der View, bekommen. Die Parameter werden in der Funktion verarbeitet und die ermittelten Daten in die zugrunde liegenden Tabellen eingefügt. Wenn die Prozedur korrekt ist, dann werden die Änderungen bei der nächsten SELECT-Abfrage der View sichtbar.

Codeblock 5.7: Deklaration der Prozedur

```
1 CREATE PROCEDURE insert_view(IN Jahr INT, IN Land VARCHAR(255), IN Umsatz INT)
2 BEGIN
3     INSERT INTO BESTELLUNG (BESTELLDATUM, FK_KUNDEN, UMSATZ)
4     VALUES (STR_TO_DATE(CONCAT(Jahr, '-01-01'), '%Y-%m-%d'),
5             (SELECT K.KUNDEN_ID FROM KUNDEN K WHERE K.LAND = Land LIMIT 1), Umsatz);
6 END;
```

Jetzt können wir die Methode insert_view einfach mit dem CALL-Befehl aufrufen und die Werte für die drei Parameter in Klammern übergeben. Dadurch werden die Werte in die Bestelltabelle eingefügt. Als Bestelldatum wird stets der erste Tag des Jahres verwendet und als Kunde wird einer gewählt, der in dem jeweiligen Land lebt.

Im Vergleich zum direkten Einfügen in die Bestelltabelle verlieren wir jedoch an Datenpräzision. Einerseits haben wir nicht das genaue Datum und andererseits fehlen die Informationen zur KUNDEN_ID und ARTIKEL_ID. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass je nach Definition der Sicht Daten entweder direkt eingefügt oder mithilfe von Stored Procedures befüllt werden können. Es ist dabei jedoch nicht ausgeschlossen, dass es in den zugrunde liegenden Tabellen zu einer geringeren Datenqualität kommen kann, da beispielsweise NULL-Werte oder andere Standardwerte verwendet werden. Deshalb sollten virtuelle Sichten grundsätzlich nur zur Abfrage von Daten benutzt werden und nicht für Änderungen. Stattdessen sollten die zugrunde liegenden Tabellen direkt angepasst werden.

5.2 Materialisierte Views

Allgemein werden Sichten so definiert, dass sie eine neue Relation aus den Basistabellen erzeugen, indem sie eine Abfrage auf diese Tabellen ausführen. Bisher haben wir Sichten ausschließlich als logische Beschreibungen von Relationen betrachtet. In bestimmten Fällen kann es jedoch aus Performancegründen sinnvoll sein, sie zu materialisieren, also die Ergebnisse physisch zu speichern. Durch die physische Speicherung verringert sich der Rechenaufwand für Abfragen, da in unserem Beispiel (siehe 5.2) der Join nicht erneut ausgeführt werden muss. Die bereits gespeicherten Ergebnisse sind damit direkt abrufbar, was zu einer schnelleren Antwortzeit der Query führt. Passend zu unserer virtuellen Sicht (5.2) sieht die Materialisierte wie folgt aus:

Codeblock 5.8: Materialized View

```
1 CREATE MATERIALIZED VIEW UmsatzProJahrLand AS
2 SELECT
3     EXTRACT(YEAR FROM B.BESTELLDATUM) AS Jahr,
4     K.LAND AS Land,
5     SUM(B.UMSATZ) AS Gesamtumsatz
6 FROM KUNDEN K
7     JOIN BESTELLUNG B ON K.KUNDEN_ID = B.FK_KUNDEN
8 GROUP BY EXTRACT(YEAR FROM B.BESTELLDATUM), K.LAND;
```

Wie zu sehen ist, unterscheidet sich die materialisierte Sicht nur in der ersten Zeile von der Virtuellen. Einen Nachteil der materialisierten Sicht gegenüber der Virtuellen ist der zusätzliche Aufwand, ähnlich wie bei Indizes. Das liegt daran, weil Teile der Sicht bei jeder Änderung der zugrunde liegenden Basistabelle neu berechnet werden müssen. Die materialisierte Sicht kann explizit mit diesem Befehl aktualisiert werden:

Codeblock 5.9: Aktualisierung der materialisierten Sicht

```
1 REFRESH MATERIALIZED VIEW KUNDEN_MAT_OVERVIEW;
```

Die Anzahl an Neuberechnungen hat einen großen Einfluss auf die Performance, weshalb man sich ein Konzept überlegen, mit dem die Anzahl auf ein Minimum begrenzt wird. Ansonsten kann es durch Sperren auf die zugrunde liegenden Tabellen zu Einschränkungen in der Produktivumgebung kommen. In PostgreSQL erlaubt die Option `CONCURRENTLY` beim Aktualisieren einer materialisierten Sicht den gleichzeitigen Zugriff durch andere Prozesse, da die Sicht erst ersetzt wird, wenn die neue Version fertig ist (siehe 5.9).

Eine materialisierte Sicht kann wie eine virtuelle Sicht in der FROM-Klausel einer Abfrage verwendet werden. In Oracle gibt es zusätzlich noch eine Funktionalität, die es ermöglicht,

Abfragen automatisch umzuschreiben. Damit kann die materialisierte Sicht auch verwendet werden, wenn sie nicht explizit in der Abfrage referenziert wird. Für diese Funktionalität muss die materialisierte Sicht mit der Funktion `ENABLE QUERY REWRITE` aktiviert werden. Die Abfrage wird aber nur dann umformuliert, wenn alle Relationen in der Sicht enthalten sind und die Bedingungen entsprechend angepasst werden.

Codeblock 5.10: Select mit View

```
1 SELECT Land, Jahr, Gesamtumsatz
2 FROM KUNDEN K JOIN BESTELLUNG B ON K.KUNDEN_ID = B.FK_KUNDEN
3 WHERE LAND = 'Deutschland' AND JAHR = 2024;
```

In Oracle könnte die Abfrage 5.10 intern so umgeschrieben werden, dass die Abfrage nicht auf diesen Tabellen erfolgt, sondern direkt auf die materialisierte Sicht `UmsatzProJahrLand`. Die materialisierte Sicht enthält bereits die aggregierten Umsätze und muss daher weniger Berechnungen durchführen. Bei der zweiten Abfrage 5.11 wird die materialisierte View nicht verwendet, da sie nicht die Spalten `STADT` und `MONAT` enthält. Wie in PostgreSQL bei beiden Befehlen erfolgt in diesem Fall auch bei Oracle keine automatische Abfrageumschreibung, weshalb die Abfrage explizit auf die Tabellen zugreifen muss.

Codeblock 5.11: Select nicht für View

```
1 SELECT Stadt, Monat, Gesamtumsatz
2 FROM KUNDEN K JOIN BESTELLUNG B ON K.KUNDEN_ID = B.FK_KUNDEN
3 WHERE STADT = 'Hamburg' AND EXTRACT(MONTH FROM K.GEBURTSTAG) = 8;
```

Neben der Verwendung der Option `CONCURRENTLY` gibt es noch weitere Optimierungen, um nicht jedes Mal die gesamte Sicht vollständig neu erstellen zu müssen. Dafür muss man sich vor Augen führen, dass alle Änderungen an der zugrunde liegenden Tabelle inkrementell sind. Auf diese Weise können Einfügungen, Löschungen und Aktualisierungen in einer Basistabelle mit minimalem Abfrageaufwand durchgeführt und anschließend in der materialisierten Sicht aktualisiert werden. Diese inkrementelle Aktualisierung der materialisierten Sicht ist damit deutlich effizienter als die ständige Neuberechnung der Sicht. Aber nicht jedes Datenbankmanagementsystem unterstützt die inkrementelle Auffrischung. Oracle bietet diese Funktion nativ mithilfe von `Materialized View Logs` an, während in PostgreSQL eine manuelle Planung erforderlich ist, da keine automatische Auffrischung unterstützt wird (Ouko, 2025). MySQL bietet gar nicht erst eine Möglichkeit an, um materialisierte Sichten nativ zu erstellen. Allerdings kann man die Funktionsweise mithilfe einer physischen Tabelle und Triggern auf den zugrundeliegenden Tabellen nachstellen.

Zunächst erstellen wir eine physische Tabelle, z.B. mit dem Namen `KUNDEN_MAT_OVERVIEW`. Diese Tabelle besteht, ähnlich wie die materialisierte Sicht 5.8, aus den Spalten `JAHR`, `LAND` und `GESAMTUMSATZ`, wobei die Kombination aus Jahr und Land der Schlüssel der Tabelle ist. Wenn

wir nun Daten in die zugrundeliegenden Tabellen KUNDEN und BESTELLUNG einfügen, bleibt die KUNDEN_MAT_OVERVIEW Tabelle unverändert. Das liegt daran, weil bisher keine Verbindung zur neuen Tabelle hergestellt wurde. Wir können dieses Problem lösen, indem wir Trigger definieren, die bei Änderungen in der Bestell- oder Kundentabelle ausgelöst werden. Da die beiden Tabellen über die KUNDEN_ID verknüpft sind, kann der Fremdschlüssel mit der Option ON DELETE CASCADE versehen sein. Dadurch werden die Einträge, die in der Kundentabelle gelöscht werden, automatisch auch aus der Bestelltabelle entfernt und man muss nur die Änderungen in der Bestelltabelle als Auslöser für die Trigger beachten.

In MySQL kann ein Trigger nur für einen Datenbankmanipulationsoperator gleichzeitig verwendet werden (Oracle, 2025d), weshalb wir für INSERT und DELETE jeweils einen Trigger definieren müssen. Da wir keine Datensätze aktualisieren, vernachlässigen wir aus Einfachheitsgründen den Trigger für UPDATE. Für unser Beispiel sieht der INSERT-Trigger wie folgt aus:

Codeblock 5.12: Insert Trigger für die Tabelle Bestellung

```
1 CREATE TRIGGER UPDATE_BESTELLUNG_MAT_OVERVIEW_AFTER_INSERT
2 AFTER INSERT ON BESTELLUNG
3 FOR EACH ROW
4 BEGIN
5     DECLARE v_land VARCHAR(255);
6     DECLARE v_jahr INT;
7     SELECT LAND INTO v_land FROM KUNDEN WHERE KUNDEN_ID = NEW.FK_KUNDEN;
8     SELECT EXTRACT(YEAR FROM NEW.BESTELLDATUM) INTO v_jahr;
9
10    IF EXISTS (
11        SELECT 1
12        FROM KUNDEN_MAT_OVERVIEW
13        WHERE LAND = v_land AND JAHR = v_jahr
14    ) THEN
15        UPDATE KUNDEN_MAT_OVERVIEW
16        SET GESAMTUMSATZ = GESAMTUMSATZ + NEW.UMSATZ
17        WHERE LAND = v_land AND JAHR = v_jahr;
18    ELSE
19        INSERT INTO KUNDEN_MAT_OVERVIEW (JAHR, LAND, GESAMTUMSATZ)
20        VALUES (v_jahr, v_land, NEW.UMSATZ);
21    END IF;
22 END;
```

Nach dem Einfügen eines Datensatzes in die Bestelltabelle wird der Trigger aktiviert und überprüft, ob für das Land und Jahr bereits ein Eintrag in KUNDEN_MAT_OVERVIEW vorhanden ist.

Ist dies der Fall, wird der Gesamtumsatz angepasst, andernfalls wird ein neuer Datensatz mit den entsprechenden Werten eingefügt. Ein Nachteil des Ansatzes mit einer normalen Tabelle in Kombination mit Triggern ist der erhöhte Aufwand für jede materialisierte Sicht. Zudem variiert dieser Aufwand stark, da er individuell vom jeweiligen Anwendungsfall abhängt.

Ein Anwendungsfall für die Nutzung von aggregierten Daten in einer materialisierten Sicht ist die Analyse von Daten, um Vorhersagen zu treffen. Wenn Analysten eines Motorradunternehmens beispielsweise den Einkauf für die Zukunft planen möchten, müssen sie oft auf aggregierte Daten aus der Vergangenheit zurückgreifen. Diese Entscheidungen werden jedoch nicht täglich abgefragt, sondern nur in regelmäßigen Abständen. Damit wird die materialisierte Sicht eher selten abgefragt, während Änderungen an den zugrundeliegenden Tabellen, wie z.B. der Bestand an Motorrädern oder die Anzahl der Motorradteile im Lager, sehr häufig vorkommen. Wenn man die Sicht bei jeder Änderung im Lager aktualisieren würde, würde dies zu einem enormen Aufwand führen. Daher kann es sinnvoll sein, die Daten nur einmal täglich zu aktualisieren, zum Beispiel durch einen Cron-Job in der Nacht. Zu dieser Zeit ist zusätzlich die Systemlast in der Regel gering. In diesem Fall haben die Analysten zwar nur den Stand des Vortages, aber da sie in der Regel mit vergangenen Daten arbeiten, ist dieses Risiko vertretbar. Anders ist es bei einer schnellen Lieferung an den Kunden, da es für den Verkauf entscheidend ist, über aktuelle Bestandsdaten zu verfügen.

Zusammengefasst lässt es sich sagen, dass die Auswahl von materialisierten Sichten deutlich komplexer ist als die von Indizes, da potenziell jede Abfrage eine Sicht definieren könnte. Damit gibt es potenziell deutlich mehr mögliche Sichten als Indexes. Es sollten aber nur Sichten erstellt werden, die mindestens eine Abfrage der erwarteten Workload verbessern, wobei Kriterien wie Relationen, Bedingungen und Attribute berücksichtigt werden. Zudem muss der Nutzen einer Sicht nicht nur anhand der Laufzeitverbesserung, sondern auch im Verhältnis zu ihrem Speicherbedarf bewertet werden, da materialisierte Sichten oft nicht nur erheblich mehr Speicherplatz beanspruchen können, sondern sich untereinander deutlich von der Größe unterscheiden.

5.3 Durchführung der Benchmarks

Das Ziel für die Durchführung ist es den Performanceunterschied zwischen einer virtuellen und einer materialisierten Sicht darzustellen. Dafür beginnen wir zuallererst mit der Umsetzung der virtuellen Sicht, für die wir, wie bei den anderen Sichten auch, zunächst die Basistabellen erstellen müssen. Als Basis verwenden wir die Tabellen Kunden (2.4) und Bestellung (2.5) und erstellen die View (5.2), die wir schon in Kapitel 5.1 beschrieben haben. Anschließend werden die Testdaten direkt die beiden physischen Tabellen eingefügt und

nicht über die virtuelle Sicht. Bei Select-Befehlen sprechen wir die Sicht explizit an und untersuchen mehrere Select-Befehle (siehe 5.13) auf verschiedenen Spalten, um die Unterschiede in der Lesegeschwindigkeit repräsentativ zu erfassen.

Codeblock 5.13: Select-Abfragen auf alle Spalten der View

```
1 SELECT Jahr, SUM(Gesamtumsatz) AS UmsatzProJahr FROM KUNDEN_OVERVIEW GROUP BY Jahr;
2 SELECT * FROM KUNDEN_OVERVIEW WHERE Jahr = 2020;
3 SELECT * FROM KUNDEN_OVERVIEW WHERE Land = 'Germany';
4 SELECT * FROM KUNDEN_OVERVIEW WHERE Gesamtumsatz > 2500;
```

Wie schon im Kapitel (5.1) erklärt, lassen sich die Abfragen auf die virtuelle Sicht in direkte Abfragen auf die Kundentabelle umwandeln. Um den Einfluss der virtuellen Sicht auf die Performance zu sehen, führen wir deshalb einen Benchmark mithilfe der Sicht durch und bei dem anderen deklarieren wir keine Sicht und wandeln alle Befehle auf die Sicht direkt in SQL-Befehle auf die unterliegenden Tabellen um.

Zusätzlich müssen wir die Ergebnisse mit und ohne virtualisierte Sicht auch mit dem im Kapitel 5.2 beschriebenen Ansatz unter Verwendung von Triggern in MySQL vergleichen. Dafür müssen wir neben der Kunden- und Bestelltabelle auch die Tabelle KUNDEN_MAT_OVERVIEW sowie die Trigger für die INSERT- und DELETE-Operationen erstellen. Im nächsten Schritt befüllen wir die ersten beiden Tabellen mit Testdaten und passen bei den Select-Befehlen aus 5.13 den Tabellenbezeichner an. Damit sind alle Voraussetzungen für den Vergleich zwischen keiner View, der virtuellen View und dem Ansatz mit Triggern in MySQL erfüllt.

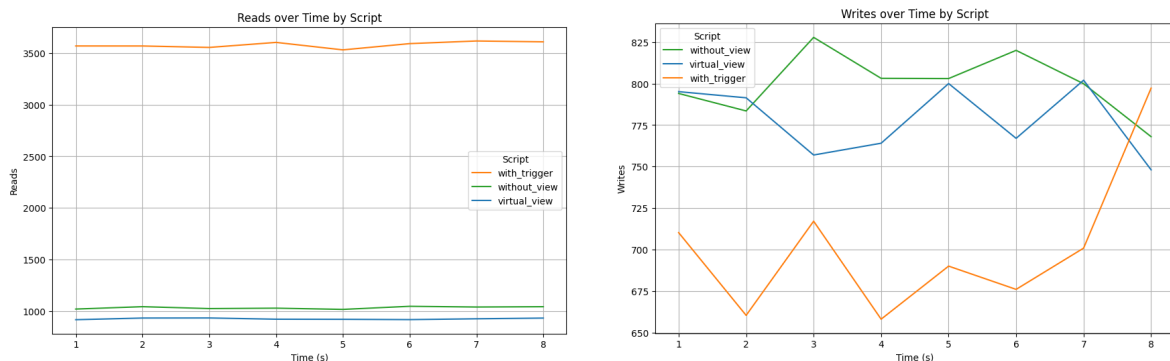


Abbildung 5.1: Vergleich zwischen keiner View, der virtuellen und Triggeransatz in MySQL

Bei den Ergebnissen fällt auf, dass die Unterschiede zwischen der virtuellen Sicht und den direkten SQL-Befehlen (without_view) nur minimal sind. Dennoch weist with_view eine leicht schlechtere Performance auf, sowohl bei Lese- als auch bei Schreiboperationen (5.1). Einen klaren Performancevorteil kann man beim Trigger-Ansatz erkennen, da die Lesewerte etwa um den Faktor 3 höher sind. Das liegt daran, dass direkt die Tabelle mit den aggregierten Werten abgefragt wird, wodurch weniger Rechenaufwand erforderlich ist. Anders hingegen

sieht es bei der Schreibperformance aus, da die Trigger ausgelöst werden und zusätzliche Aktualisierungen an der Tabelle KUNDEN_MAT_OVERVIEW durchführt werden müssen. Dadurch sehen wir einen deutlichen Unterschied zu den anderen beiden Ansätzen, da die Werte bei den Schreibvorgängen etwa 15–20% langsamer sind.

Im letzten Benchmark wollen wir unterschiedliche Implementierungen von materialisierten Sichten testen. Dazu vergleichen wir den Ansatz mit Triggern in MySQL mit der nativen Implementierung in PostgreSQL. Die materialisierte Sicht in Postgres kann mithilfe des Befehls aus 5.8 direkt erstellt werden. Da Postgres die inkrementeller Auffrischung nicht unterstützt, muss die materialisierte Sicht nach den INSERT und DELETE-Befehlen auf der Kundentabelle immer vollständig aktualisiert werden. Da wir den Einfluss auf die Performance des Befehls 5.9 untersuchen möchten, führen wir ihn einmal nach der Einfügung jeder Zeile in die Kundentabelle aus und einmal, nachdem alle Datensätze eingefügt wurden.

Um die Performanceunterschiede zwischen PostgreSQL und MySQL zu ermitteln, implementieren wir den Trigger-Ansatz auch in PostgreSQL. Die Implementierungen für die Insert- und Select-Befehle sind bei beiden DBMS identisch, bei der Erstellung der Tabellen und Trigger gibt es aber Unterschiede. Zum einen unterscheiden sich die Mechanismen zur automatischen Generierung von Primärschlüsseln, da PostgreSQL SERIAL und MySQL AUTO_INCREMENT verwendet. Zum anderen kann in MySQL die Logik eines Triggers direkt in der CREATE TRIGGER-Anweisung definiert werden, während in PostgreSQL ein Trigger eine separate Funktion aufrufen muss, die die Logik enthält und mit RETURNS TRIGGER definiert ist. Auch die Deklaration der Variablen unterscheidet sich, da in PostgreSQL mehrere Variablen in einem DECLARE-Block und in MySQL jede Variable einzeln im BEGIN...END-Block deklariert werden muss.

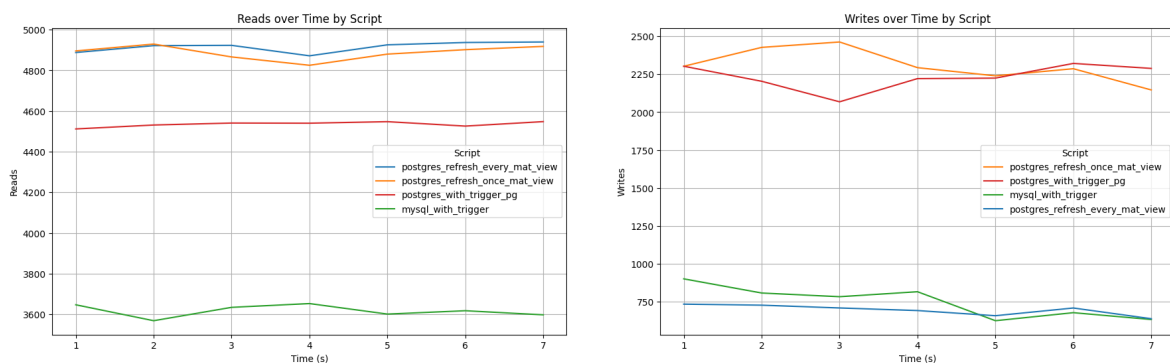


Abbildung 5.2: Vergleich zwischen Triggeransatz in MySQL und Postgres, sowie zwei nativen Implementierungen in Postgres

Bei den Grafiken 5.2 sehen wir zuallererst einen sehr deutlichen Performanceunterschied beim Ansatz mit den Triggern zwischen Postgres und MySQL. Begründet werden kann dieser Unterschied mit den verschiedenen Vorteilen des jeweiligen DBMS und dessen Umgebung.

Wir haben beide Systeme mit dem gleichen Ansatz gebenchmarkt, damit wir die Implementierung der nativen materialisierten Sicht, die nur in Postgres möglich ist, besser vergleichen zu können. Denn die Ergebnisse der nativen Implementierung sind in Bezug auf die Abfragegeschwindigkeit tatsächlich am performantesten und die Anzahl an Aktualisierungen (5.9) hat dabei keinen Einfluss. Anders hingegen sieht es bei der Einfüge-Geschwindigkeit aus, da dort die Implementierung, die nach jedem Insert-Befehl aktualisiert nicht am schnellsten, sondern am langsamsten ist. Der Vergleich zwischen den Datenbankmanagementsystemen fällt wieder schwer, da die Unterschiede zwischen `with_trigger` und `with_trigger_postgres` sehr groß sind (etwa um Faktor 2–3). Damit wird noch einmal deutlich wie stark die Einfügedauer bei den materialisierten Sichten von der Anzahl an Refreshs abhängig ist, da `mat_view_refresh_every` unterhalb der Performance von `with_trigger` liegt. In unserem Beispiel ist die einmalige Aktualisierung der Sicht besser als das Verwenden der Trigger in Postgres.

Es lässt sich also zusammenfassen, dass virtuelle Sichten wenig Auswirkungen auf die Performance haben. Dies ist im eigentlichen Sinne aber auch nicht der Absicht der virtuellen Sicht, denn sie ist besser geeignet, um beispielsweise die Organisation der Rechte für unterschiedliche Nutzer der Datenbank zu gewährleisten. Wenn man hingegen beispielsweise in OLTP-Systemen die Notwendigkeit hat, dass man aggregierte Daten häufig zu der Analyse von bestimmten Daten benötigt, dann sind materialisierte Sichten nützlich. Man sollte allerdings vor allem die Performanceauswirkungen von diesen Sichten nicht unterschätzen und sich gut überlegen, wie häufig und zu welcher Zeit die Daten aktualisiert werden müssen.

6 Partitionen

In diesem Kapitel analysieren wir die Funktionsweise von Partitionen und das Verhalten des Abfrageoptimierers. Zudem betrachten wir deren Verwendungszweck sowie die verschiedenen Typen, darunter RANGE-, LIST-, HASH- und KEY-Partitionierung. Abschließend führen wir Benchmark-Tests durch, um die jeweiligen Vor- und Nachteile zu bewerten.

6.1 Grundlagen

Bevor wir uns mit den verschiedenen Partitionierungstypen und deren Einsatzmöglichkeiten befassen, müssen wir klären, was eine Partition ist. Eine partitionierte Tabelle ist eine logische Einheit, die aus mehreren physischen Subtabellen besteht (Schwartz et al., 2012, pp. 265–273). Das System verwaltet die Partitionen intern, sodass der Benutzer nicht bemerkt, wie genau die Daten organisiert sind. Dadurch wirken sie für ihn wie eine Blackbox. Damit eine Tabelle die Partitionierung nutzt, muss bei ihrer Erstellung die `PARTITION BY`-Klausel angegeben werden, die festlegt, in welcher Partition jede Datenzeile gespeichert wird. Dies führt zu einer erhöhten Komplexität der `CREATE TABLE`- und `ALTER TABLE`-Befehle. In der Partitionsklausel selbst können nicht nur Ausdrücke und Berechnungen zur Bestimmung der Partitionierung eingesetzt werden, sondern auch Funktionen. Die Funktionen müssen dazu jedoch eine nicht-konstante und deterministische Ganzzahl zurückgeben, wie z.B. `YEAR()`. Wir werden gleich sehen, wie man erkennen kann, welche Komponenten-Tabellen intern verwendet werden. Bevor wir zu den Vorteilen der Partitionierung und deren Funktionsweise kommen, klären wir noch die Einschränkungen. Zum einen müssen alle Spalten, nach denen die Partitionierung erfolgt, im Primärschlüssel oder Unique-Index enthalten sein. Andernfalls ist es nicht möglich, die Partitionen korrekt zu erstellen oder zu verwalten. Als logische Schlussfolgerung ergibt sich ein zusätzlicher Aufwand für die Pflege der neuen Indizes. Außerdem können keine Fremdschlüssel-Bedingungen (engl. foreign key constraints) verwendet werden. Darüber hinaus gibt es ein Limit für die Anzahl der Partitionen pro Tabelle. Bei älteren MySQL-Versionen liegt dieses Limit bei 1024 und seit MySQL-Version 8.0 bei 8192 Partitionen (Oracle, 2025c). Wie wir später noch feststellen werden, sollte aus verschiedenen Gründen die Anzahl der Partitionen so gering wie möglich gehalten werden. Aus diesem Grund ist diese Einschränkung nicht sehr relevant, sollte aber im Hinterkopf behalten werden.

Da wir die Bedingungen nun geklärt haben, kommen wir als Nächstes zu der Funktionsweise. Wie bereits erwähnt, bestehen partitionierte Tabellen aus mehreren zugrunde liegenden Tabellen, die durch Handler-Objekte verwaltet werden. Ein Handler-Objekt dient als Schnittstelle für den Zugriff auf die Daten einer Partition und ermöglicht MySQL, die zugrunde liegenden Tabellen so zu nutzen, als wären sie eigenständige Tabellen. Aus Sicht der Storage Engine sind Partitionen einfach Tabellen, unabhängig davon, ob sie eigenständig oder Teil einer partitionierten Tabelle sind. Jede Partition wird von der Storage Engine auf übliche Weise verwaltet, jedoch können die einzelnen Partitionen nicht immer direkt angesprochen werden. Das hängt jedoch auch vom jeweiligen Datenbankmanagementsystem ab. In Oracle ist dies wie folgt möglich:

```
1 SELECT * FROM your_table PARTITION (your_partition_name);
```

Bei der Partitionierung in MySQL werden Indizes für jede Partition separat definiert, anstatt sie über die gesamte Tabelle hinweg zu erstellen. Alle Indexe der Tabelle werden dabei als identische Indexe auf jede Partition angewendet. Die genaue Implementierung hängt jedoch vom jeweiligen DBMS ab und kann variieren. Beispielsweise in Oracle können Indexe und Tabellen auf flexiblere und komplexere Weise partitioniert werden.

Als Nächstes gilt es zu verstehen, wann und wie die Partitionierung zu Performancegewinnen führen kann. Der Abfrageoptimierer (engl. Query Optimizer) versucht, beim Ausführen von Abfragen Partitionen auszuschließen und nur die relevanten Partitionen zu durchsuchen, die die gesuchten Daten enthalten. Dies geschieht immer dann, wenn eine WHERE-Klausel mit dem Partitionsausdruck übereinstimmt. Der Fachbegriff dafür heißt Pruning. Bei SELECT-Abfragen entscheidet der Query-Optimizer, ob bestimmte Partitionen ignoriert werden können und leitet die Anfragen an die Storage Engine weiter. Bei INSERT-Abfragen wird bestimmt, welche Partition die neue Zeile erhält und der Befehl wird dementsprechend übergeben. Ähnlich funktioniert es bei DELETE-Abfragen, bei denen die Löschanfrage an die passende Partition weitergegeben wird. Man sollte sich auch in Erinnerung rufen, dass beim Löschen einer Zeile diese zuerst lokalisiert werden muss. Bei UPDATE-Abfragen innerhalb einer Partition wird die Anfrage ebenfalls an die jeweilige Partition übermittelt. Wenn aber Teile der Partitionslogik verändert werden, dann stellt UPDATE eine Kombination von INSERT und DELETE dar, da eine Einfüganfrage an die Zielpartition und eine Löschanfrage an die Quellpartition weitergeleitet wird. Die meisten dieser Operationen unterstützen Pruning, einige, wie z.B. INSERT-Abfragen, sind von Natur aus ausschließend (engl. self-pruned).

In der Funktionsweise des Pruning kann man auch den Hauptzweck der Partitionierung erkennen, denn wie bei der Indexierung und der Datenclustering einer Tabelle, trägt es dazu bei, große Teile der Tabelle vom Zugriff auszuschließen und zusammengehörige Zeilen nahe beieinander zu speichern. Statt Indexe zu verwenden, bietet es sich an Tabellen ohne Indexe zu erstellen und ausschließlich die Partitionierung zu nutzen, um gezielt auf die gewünschten Zeilen zuzugreifen. Wenn man sich in der Nähe der gewünschten Daten befindet, kann man

von dort aus entweder das relevante Datengebiet sequentiell scannen oder es in den Speicher laden und indexieren. Zudem hat die Partitionierung einen geringen Mehraufwand, weil es keine Datenstruktur gibt, die auf einzelne Zeilen zeigt und ständig aktualisiert werden muss. Sie lassen sich auch physisch verteilen, sodass der Server mehrere Festplatten effizienter nutzen kann. Darüber hinaus erfolgt die Identifikation der Daten nicht auf Zeilenebene und es wird keine separate Datenstruktur verwendet. Stattdessen gibt es eine mathematische Formel, die bestimmt, welche Partitionen welche Kategorien von Zeilen enthalten können. Wenn wir Partitionen anstelle von Indizes verwenden, steigt die Effizienz, je mehr Partitionen durch die WHERE-Klausel in der Abfrage ausgeschlossen werden. Besonders vorteilhaft können Partitionen sein, wenn die Tabellen sehr groß sind und nicht mehr vollständig in den Speicher passen. Außerdem sind partitionierte Daten einfacher zu verwalten, da gesamte Partitionen gelöscht oder auch wiederhergestellt werden können.

Die Effizienz von Partitionierung basiert auf zwei wichtigen Annahmen. Zum einen muss man die Suche durch das Pruning von Partitionen beim Abfragen eingrenzen können und zum anderen muss die Partitionierung selbst nicht sehr kostspielig sein. Diese Annahmen sind aber nicht immer gültig. Im Folgenden betrachten wir 3 unterschiedliche Anwendungsfälle, bei denen mögliche Fehler im Umgang mit Partitionen beschrieben werden.

Zuallererst kann das Ergebnis der Partitionsfunktion NULL sein. Selbst wenn man die zeitbasierte Spalten als NOT NULL deklariert, können Werte gespeichert werden, die kein gültiges Datum sind. Alle Zeilen, deren Datum entweder NULL oder nicht gültig ist, werden in MySQL in der ersten definierten Partition gespeichert. Deshalb muss man bei einer Abfrage, die alle Jahre außer 2020 herausfiltert, anstelle einer Partition zwei Partitionen durchsuchen. Die damit verbundenen Leistungsprobleme nehmen mit der Größe der ersten Partition zu. Daher sollte man entweder eine dedizierte Partition für diese Sonderfälle einführen oder Funktionen wie RANGE COLUMNS verwenden.

Wenn man einen Index definiert, der nicht mit der Partitionsklausel übereinstimmt, können unerwartet mehr Partitionen durchsucht werden. Man sollte daher versuchen, auf nicht partitionierten Spalten keine Indexe zu erstellen, es sei denn, die Abfragen enthalten einen Ausdruck, der beim Pruning der Partitionen hilft. Manchmal lässt sich dieses Problem nicht auf den ersten Blick erkennen. Angenommen eine partitionierte Tabelle ist die zweite Tabelle in einem Join und der Index, der für den Join verwendet wird, ist nicht Teil der Partitionsklausel, dann wird jede Zeile im Join jede Partition in der zweiten Tabelle durchsuchen. Bei der Range-Partitionierung kann die Bestimmung der korrekten Partition teuer sein, weil der Server die Liste der Partitionsdefinitionen durchsucht, um die Richtige zu finden. Diese lineare Suche ist nicht sehr effizient und es steigen die Kosten, je mehr Partitionen es gibt. Das Öffnen und Sperren von Partitionen, wenn eine Abfrage auf eine partitionierte Tabelle zugreift, ist eine andere Art von Overhead pro Partition. Sie erfolgt vor dem Pruning, sodass dieser Overhead nicht pruned werden kann. Außerdem ist diese Art von Overhead unabhängig

vom Partitionierungstyp und betrifft alle Arten von Anweisungen. Deshalb besagt der dritte Leitsatz, dass die Anzahl der definierten Partitionen begrenzt werden sollte.

Alle Partitionen sollten dieselbe Storage Engine nutzen, was Einschränkungen bei den verwendbaren Funktionen und Ausdrücken mit sich bringt. Zudem unterstützen einige Storage Engines keine Partitionierung.

6.2 Arten der Partitionierung

In diesem Unterkapitel werden wir die verschiedenen Partitionierungsarten, die von MySQL unterstützt werden, jeweils mit einem Beispiel näher erläutern. Die Analyse der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.3. Als Grundlage verwenden wir die Kundentabelle (2.4) und die Bestelltabelle (2.5), die bereits in früheren Kapiteln zum Einsatz kamen. Die Tabelle, die wir auf unterschiedliche Partitionen verteilen wollen, ist die Kundentabelle. Allerdings müssen wir beide Tabellen noch etwas anpassen, da es einige Einschränkungen für die partitionierte Tabellen gibt. Zum einen muss bei der Bestelltabelle bei allen Typen die Fremdschlüssel-Bedingung entfernt werden und zum anderen muss der Primärschlüssel der Kundentabelle angepasst werden. Wie genau das passieren muss, werden wir an den Beispielen erkennen. Die Insert-Befehle sind bei allen Typen der Partitionierung gleich, bei den Select-Queries gibt es jedoch Unterschiede.

Den ersten Typ, den wir betrachten, ist die RANGE-Partitionierung. Bei dieser erfolgt die Zuordnung von Zeilen zu Partitionen basierend auf Spaltenwerten, die in einen definierten Wertebereich fallen. Für unser Beispiel wollen wir unterschiedliche Partitionen je nach Alter des Kunden. Alle fünf Jahre soll es eine neue Partition geben.

Codeblock 6.1: Kundentabelle mit Range-Partitionierung

```
1 CREATE TABLE IF NOT EXISTS KUNDEN (  
2     KUNDEN_ID      INT NOT NULL ,  
3     GEBURTSTAG     DATE NOT NULL ,  
4     -- other attributes  
5     PRIMARY KEY (KUNDEN_ID, GEBURTSTAG)  
6 ) PARTITION BY RANGE (YEAR(GEBURTSTAG)) (  
7     PARTITION p1 VALUES LESS THAN (1955),  
8     PARTITION p2 VALUES LESS THAN (1960),  
9     -- other partitions  
10    PARTITION p15 VALUES LESS THAN (2025),  
11    PARTITION pmax VALUES LESS THAN MAXVALUE  
12 );
```

Damit es zu keinen Fehlern kommt, muss hier der Geburtstag auch Teil des Primärschlüssels der Kundentabelle sein. Außerdem muss die Spalte GEBURTSTAG bei der Bestelltabelle hinzugefügt werden, damit das Joinen der Tabellen über den Primärschlüssel effizienter ist. Seit MySQL 5.5 kann für Datumsspalten auch der Partitionierungstyp RANGE COLUMNS verwendet werden, wodurch bei der Partitionsklausel die Funktion YEAR() nicht erforderlich ist.

Um die Performance der beiden Ansätze zu vergleichen, verwenden wir beide Varianten bei der Tabellenerstellung. Bei der Range-Partitionierung testen wir mehrere Select-Befehle, da je nach Art der Abfrage des Datums das Pruning besser oder schlechter funktioniert (siehe Abschnitt 6.1). Dazu joinen wir zunächst die Kundentabelle an die Bestelltabelle über die Attribute KUNDEN_ID und GEBURTSTAG. Die Testkunden werden so generiert, dass sie immer zufällig zwischen den Jahren 1950 und 2020 geboren sind. Die darauffolgenden WHERE-Bedingungen unterscheiden sich aber zwischen den unterschiedlichen Select-Befehlen.

Codeblock 6.2: Unterschiedliche WHERE-Bedingungen

```
1 WHERE YEAR(k.GEBURTSTAG) = 1985;           -- failing_pruning.sql
2 WHERE k.GEBURTSTAG BETWEEN '1985-01-01' AND '1985-12-31'; -- with_pruning.sql
3 WHERE k.GEBURTSTAG = '1985-01-01';         -- with_primary_key.sql
```

Bevor wir die Performance dieser Abfragen analysieren, wollen wir überprüfen, ob der Optimierer die Partitionen pruned oder nicht. Dazu kann man SQL-Befehl EXPLAIN vor dem SELECT-Befehl in 6.2 nutzen. Als Rückgabe erhält man eine Übersicht, wie MySQL die Abfrage ausführt und welche Partitionen verwendet wurden. Zunächst führen wir Query aus, bei der wir keine WHERE-Klausel angeben. Im Ergebnis von EXPLAIN sehen wir, dass der Abfragemechanismus alle Partitionen durchsuchen muss, was bei großen Tabellen die Performance stark beeinträchtigen kann. Bei der WHERE-Klausel der Abfrage in Zeile 1 würden wir erwarten, dass nur eine Partition abgefragt wird, aber wir erhalten das gleiche Resultat wie bei der Abfrage davor. Die Query aus der zweiten Zeile verweist direkt auf die Partitionsspalte und nicht auf einen Ausdruck. Und tatsächlich wird, wie erwartet, nur die Partition zwischen den Jahren 1985 und 1990 untersucht. Diese Partition wird auch als einzige bei der Abfrage aus der letzten Zeile benutzt. Daraus lässt sich schließen, dass MySQL nur dann Partitionen effizient prunen kann, wenn die Abfrage direkt auf die Partitionsspalte zugreift und keine Ausdrücke verwendet. Man kann dieses Verhalten mit dem von indexierten Spalten vergleichen, die auch im Abfrageausdruck isoliert sein müssen, damit der Index verwendet werden kann.

Als Nächstes betrachten wir die LIST-Partitionierung, bei der die Partitionen anhand von Spaltenwerten ausgewählt werden, die einem der vordefinierten diskreten Werte entsprechen. Zur Veranschaulichung möchten wir pro Land eine eigene Partition erstellen. Dafür muss die Spalte LAND Teil des Primärschlüssels sein. Beim Einfügen der Testdaten wählen wir pro Kunde ein zufälliges Land aus der Liste der 20 einwohnerreichsten Länder der Welt aus.

Damit müssen wir bei der Erstellung der Tabelle auch 20 Partitionen sowie eine Zusätzliche für sonstige Werte erstellen (6.3).

Codeblock 6.3: Kundentabelle mit List-Partitionierung

```
1 CREATE TABLE IF NOT EXISTS KUNDEN (  
2     KUNDEN_ID      INT NOT NULL,  
3     LAND           VARCHAR(100) NOT NULL,  
4     -- other attributes  
5     PRIMARY KEY (KUNDEN_ID, LAND)  
6 )  
7 PARTITION BY LIST COLUMNS(LAND) (  
8     PARTITION p_china VALUES IN ('China'),  
9     PARTITION p_india VALUES IN ('India'),  
10    PARTITION p_united_states VALUES IN ('United States'),  
11    -- other partitions  
12    PARTITION p_thailand VALUES IN ('Thailand'),  
13    PARTITION p_other VALUES IN ('Other')  
14 );
```

Auch bei der List-Partitionierung wird die Performance von unterschiedlichen Select-Befehlen überprüft. Zunächst joinen wir, wie zuvor, die Kundentabelle mit der Bestelltabelle und in der WHERE-Bedingung filtern wir so, dass alle Kunden aus Deutschland kommen. Genau die gleiche Query verwenden wir beim Vergleich mit der Referenz ohne Partition. Zusätzlich wollen wir die Performance untersuchen, wenn aus der Liste an Ländern zufällig fünf ausgewählt werden und alle Kunden nur aus einem dieser fünf Ländern kommen. Dazu testen wir 3 verschiedene Ansätze. Zum einen über den OR-Operator, den anderen mithilfe des IN-Operators und als letztes fragen wir die 5 Länder, wie im ersten Beispiel, einzeln ab und verbinden die Ergebnisse der 5 Antworten mithilfe des UNION-Operators. Mithilfe von EXPLAIN wird sichtbar, dass bei allen Varianten nur die Partitionen der 5 Länder genutzt werden. Damit kann der Optimierer Bereiche in Listen diskreter Werte umwandeln, Elemente prunen und während der Abfrageverarbeitung Partitionen gezielt entfernen. Im Zusammenhang mit Joins ist der Effekt besonders stark, da MySQL bei einem partitionierten Schlüssel in der Join-Bedingung nur in den relevanten Partitionen nach übereinstimmenden Zeilen sucht. Welche der Varianten aber am effizientesten ist, werden wir erst bei der Analyse sehen.

Zum Schluss betrachten wir die HASH-Partitionierung, bei der die Partition anhand eines Hash-Werts zugewiesen wird, der aus den Spaltenwerten der Zeilen berechnet wird. Dazu müssen wir nur wenig verändern und ausschließlich die Zeilen aus dem Codeblock 6.4 am Ende des Create Kunden-Befehls hinzufügen. In diesem Fall testen wir auch nur eine einzige Select-Query, die wieder beide Tabellen joined und in der WHERE-Bedingung überprüft, ob die KUNDEN_ID zwischen den Werten 1000 und 2000 liegt. Damit wir mehr Werte miteinander

vergleichen können, testen wir verschiedene Varianten der Hash-Partitionierung, indem wir die Anzahl der Partitionen variieren. Die Anzahl der Partitionen beträgt in unseren Benchmarks 5, 50 und 500. Einschließlich des Referenzfalls ergeben sich somit vier unterschiedliche Testfälle, die wir miteinander vergleichen.

Codeblock 6.4: Hash-Partitionierung

```
1 PARTITION BY HASH(KUNDEN_ID)
2 PARTITIONS 5;
```

Die KEY-Partitionierung ähnelt der Hash-Partitionierung, verwendet jedoch die interne Hash-Funktion von MySQL und benötigt nur die Angabe einer oder mehrerer Spalten. Um die Performance zu überprüfen, machen wir genau das Gleiche wie bei der Hash-Partitionierung. Dafür müssen wir nur im Codeblock 6.4 das Signalwort HASH mit KEY ersetzen und stellen das Ergebnis mit dem von HASH gegenüber. Die Erkenntnisse aus diesem Benchmark schließen wir im nächsten Kapitel.

6.3 Analyse

Im vorherigen Abschnitt wurden die verschiedenen Arten von Partitionen erläutert. Nun möchten wir für jedes dieser Beispiele Benchmarks durchführen und die Ergebnisse untersuchen. Um den Einfluss der Partitionierung auf die Abfragen zu verdeutlichen, vergleichen wir jeweils partitionierte mit nicht partitionierten Tabellen. Beide Varianten stellen die gleichen Insert-Befehle, während sich die Select-Queries je nach Partitionierungstyp leicht unterscheiden können. Abhängig vom Typen stellen wir zusätzlich leicht unterschiedliche Abfragen. Die Ergebnisse des Referenzbenchmarks sollten weitgehend mit denen der partitionierten Varianten übereinstimmen. Es kann aber kleinere Unterschiede geben, da wir jeweils zufällige generierte Daten einfügen. Bei signifikanten Abweichungen sind die Performancemessungen jedoch schwerer miteinander vergleichbar.

Im ersten Benchmark mit der Range-Partitionierung fällt auf, dass die Benutzung von RANGE oder RANGE COLUMNS keinerlei Einfluss auf die Performance hat. Daher stellt sich bei der Verwendung nicht die Frage nach der Performance, sondern nur welche Art der Definition der Nutzer bevorzugt. Wenn wir die Abbildung 6.1 analysieren, dann wird klar, dass die with_pruning-Query mit deutlichem Abstand schneller ist als die anderen. Damit funktioniert das Pruning besonders gut, wenn die Geburtstage zwischen dem ersten und letzten Tage des Jahres abfragen. Als Nächstes kommen die Skripte ohne Partitionierung, die aber etwa 50% ineffizienter sind, als das Skript zuvor. Da beide auf einem sehr ähnlichen Niveau liegen, kann davon ausgehen, dass die Verarbeitung durch YEAR() hier keine Rolle spielt. Etwas langsamer bei der Range-Partitionierung ist with_primary_key, bei der wir nur die Kunden erhalten,

die am 1. Januar 1985 geboren wurden. Wenn wir die Ergebnisse von EXPLAIN betrachten, dann sehen wir, dass bei der Abfrage nur eine Partition benutzt wurde. Als Letztes kommen die beiden Select-Queries, die alle Partitionen durchsuchen. Bei der einen haben wir keine WHERE-Bedingung angegeben und bei der anderen haben wir die Funktion YEAR() benutzt. Es lässt sich also feststellen, dass Pruning mithilfe von YEAR() offensichtlich nicht funktioniert. Dies bestätigt auch der Ausführungsplan für die Query. Bei den Insert-Befehlen ist der Fall ohne Partitionierung nur geringfügig schneller als mit Partitionierung.

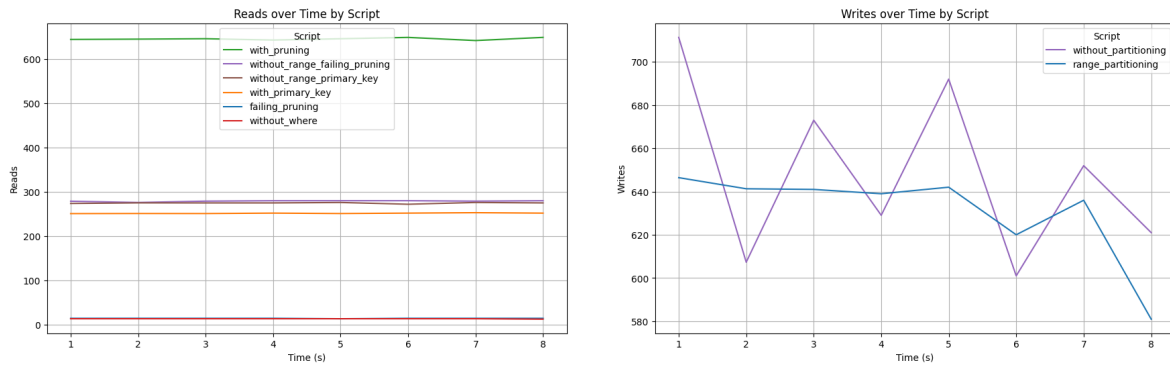


Abbildung 6.1: Vergleich zwischen der Range-Partitionierung und ohne Partition

Bei der List-Partitionierung 6.2 können wir auch einige interessante Beobachtungen machen. Beim ersten Fall ist nur ein Land in der WHERE-Bedingung vorhanden. Wenn dies so ist, dann hat die Partitionierung einen erheblichen Vorteil gegenüber der Version ohne Partitionierung (siehe rote Linie von with_pruning_simple und braune von without_list_pruning_simple). Wenn wir statt nur eines Landes mehrere abfragen, sehen wir für die verschiedenen Operatoren unterschiedliche Ergebnisse. Die beste Performance erzielt der IN-Operator. Dicht darauf folgt der OR-Operator. Mit etwas größerem Abstand liegt der Fall ohne Partitionierung. Deutlich abgeschlagen ist die Verbindung der Ergebnisse per UNION-Operator. Die Performance beim Einfügen der Daten ist bei der Partitionierung und dem Referenzfall sehr ähnlich, wobei letzterer einen ganz leichten Vorteil hat.

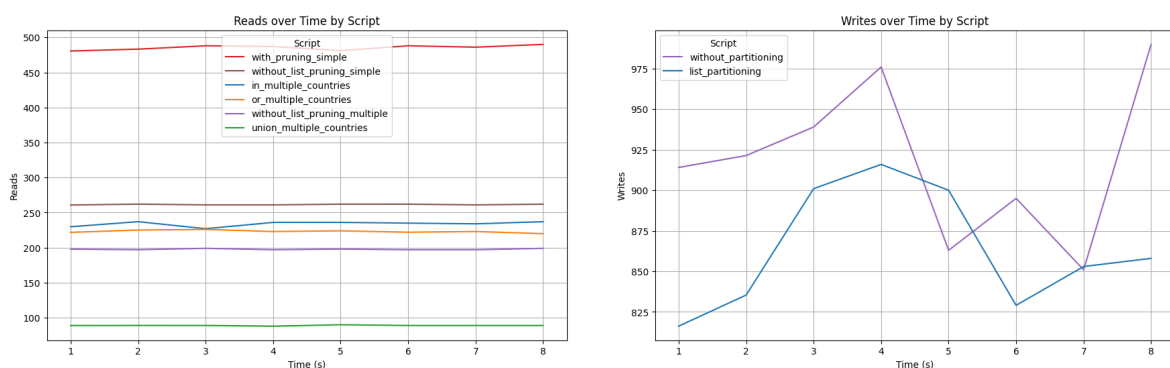


Abbildung 6.2: Vergleich zwischen der List-Partitionierung und ohne Partition

Bei der Key-Partitionierung fällt auf, dass es keinen signifikanten Performance-Unterschied zur Hash-Partitionierung gibt, wenn derselbe Datensatz und dieselbe Anzahl von Partitionen

verwendet wird. Generell ist die Key-Partitionierung häufig stabiler und optimierter ist, insbesondere wenn es um Primärschlüssel geht. Bei der Hash-Partitionierung 6.3 nehmen sich beide Select-Fälle kaum etwas. Auch hier fällt auf, dass die Werte der Abfragen sehr konstant sind. Nur bei der Variante mit 500 Partitionen gibt es deutlich sichtbare Schwankungen. Diese liegen aber nicht an dem Pruning, denn mit dem SQL-Befehl EXPLAIN sehen wir, dass alle 500 Partitionen benötigt werden und nicht keine Partitionen durch Zufall geprunt werden. Die Hash-Partitionierung berechnet aus dem Wert einer bestimmten Spalte mithilfe einer Hash-Funktion einen Hash-Wert und anhand dessen wird die Zeile einer der Partitionen zugewiesen. Da der Hash-Wert bei 500 Partitionen mit modulo 500 gebildet wird, landet jeder 500-ste Wert in der gleichen Partition. Damit ist klargestellt, dass immer alle Partitionen benutzt werden, was die folgenden Ergebnisse zeigen. Zunächst zeigt sich, dass die Abfrage ohne Partitionierung am schnellsten ist. Danach lässt sich die Regel ableiten, dass eine höhere Anzahl an Partitionen zu einer langsameren Abfrage führt. Dies liegt daran, dass mehr Partitionen die Suche innerhalb der Struktur komplexer machen und dadurch die Performance beeinträchtigen. Der Unterschied zwischen ohne Partitionen und 5 Partitionen ist noch überschaubar, aber bei 500 Partitionen sieht man einen sehr deutlichen Unterschied.

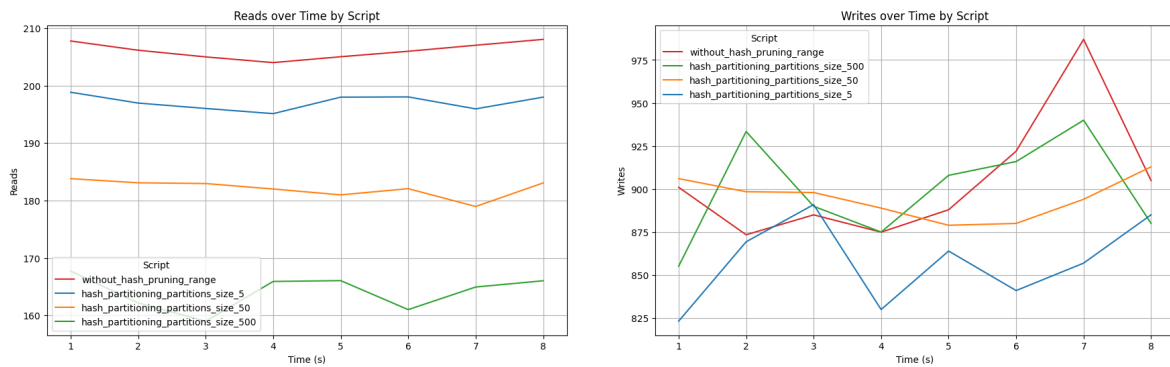


Abbildung 6.3: Vergleich zwischen der Hash-Partitionierung und ohne Partition

7 Replikation

In diesem Segment wird das Thema Replikation behandelt. Replikation kann die Grundlage für den Aufbau großer, leistungsstarker Anwendungen auf der Basis von MySQL sein. Es verfolgt dabei die sogenannte „Scale-Out“-Architektur, bei der mehrere Storage-Knoten parallelisiert arbeiten (Luber, 2023). Nach außen hin wirkt es trotzdem wie ein einziges Gesamtsystem. Bei dieser Architektur ist die Skalierbarkeit nahezu unbegrenzt, da man durch einfaches Hinzufügen weiterer Speicherknoten die Performance verbessern kann. Im Gegensatz dazu ist Scale-Up durch die Systemgrenzen eines einzelnen Geräts limitiert. Mit Scale-Out sind allerdings auch Nachteile verbunden, die später in diesem Abschnitt behandelt werden. Wie schon in den vorherigen Kapiteln werden zunächst die Grundlagen behandelt, gefolgt von der Betrachtung der Konfiguration, die die Basis für die Benchmarks bildet und abschließend erfolgt eine Analyse der Ergebnisse.

7.1 Grundlagen

Replikation ermöglicht die Konfiguration eines oder mehrere Server als Replikate eines anderen Servers, auch Master genannt (Schwartz et al., 2012, pp. 447–477). Sowohl die Begrifflichkeit Master-Replikat als auch die Varianten Primary-Secondary und Primary-Replica sind gebräuchlich. Das grundlegende Problem, das die Replikation löst, besteht darin, die Daten eines Servers mit denen eines anderen synchron zu halten. Es können sich mehrere Replikate mit einem einzigen Master verbinden und dessen aktuellen Zustand widerspiegeln. Sie sind aber nicht dazu geeignet, richtige Backups zu ersetzen. Master und Replikate lassen sich auch in anderen Konfigurationen anordnen. Neben der klassischen Master-Replikat-Variante können Replikate selbst als Master für weitere Replikate dienen. Zudem ist eine Master-Master-Kombination denkbar. Die Vorteile der Replikation liegen nicht nur in einer höheren Effizienz, sondern auch in einer erhöhten Verfügbarkeit und besseren Skalierbarkeit. Die Effizienzvorteile gibt es insbesondere durch die Lastverteilung, bei der Leseanfragen auf mehrere Server verteilt werden. Daher ist Replikation besonders für leselastige Anwendungen vorteilhaft ist.

Im folgenden Abschnitt wird die Funktionsweise der Replikation erklärt, wobei der Fall mit einem Master und einem oder mehreren Replikaten betrachtet wird. Unmittelbar bevor eine

Transaktion, die Daten aktualisiert, auf dem Master abgeschlossen wird, zeichnet der Master die Änderungen in seinem Binärlog (engl. binary log) auf. MySQL schreibt die Transaktionen seriell ins Binary-Log und informiert die Storage Engines nach dem Schreiben der Ereignisse darüber, die Transaktionen zu committen. Zu diesen Änderungen können beispielsweise neu deklarierte Tabellen oder Trigger sowie Einfügeoperationen in bestehende Tabellen gehören. Im nächsten Schritt muss das Replikat die Veränderungen auf dem Master mitbekommen. Dazu wird ein Worker-Thread gestartet, der als I/O-Replikations-Thread (engl. I/O-Slave-Thread) bezeichnet wird und eine Client-Verbindung zum Master öffnet (siehe Abbildung 7.1). Daraufhin wird ein spezieller Prozess gestartet, der die Ereignisse aus dem Binary-Log des Masters liest (engl. binlog dump process). Nach dem Verarbeiten schreibt der Thread die Werte auf seine eigene Festplatte in das sogenannte Relay-Log. Wenn er alle Ereignisse auf diesem Log verarbeitet hat, geht er in einen passiven Zustand und wartet auf Aktualisierungen. Den letzten Teil des Prozesses übernimmt der SQL-Slave-Thread. Dieser liest und spielt Ereignisse aus dem Relay-Log ab und aktualisiert die Daten der Replikate, sodass sie mit denen des Masters übereinstimmen. Wenn beide Threads eine etwa gleich schnelle Verarbeitung haben, dann bleibt das Relay-Log normalerweise im Cache des Betriebssystems und es gibt nur sehr geringe Mehrkosten (engl. Overhead). Die Ereignisse, die der SQL-Thread ausführt, können optional zusätzlich in das eigene Binary-Log der Replikate geschrieben werden.

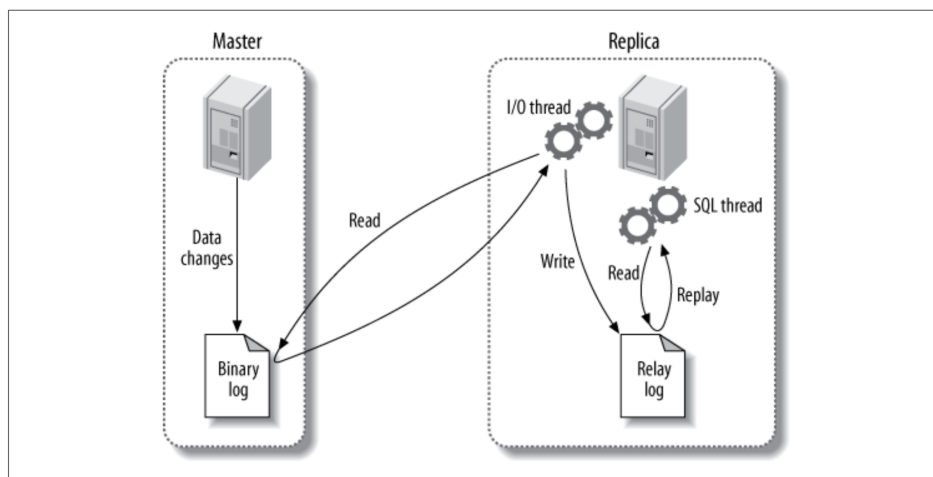


Abbildung 7.1: Darstellung der unterschiedlichen Threads

Die Abbildung 7.1 zeigt die beiden Replikation-Threads, die auf dem Replikat laufen. Zusätzlich gibt es jedoch einen weiteren Thread auf dem Master, der die vom Replikat zum Master geöffnete Verbindung auf dem Master startet.

Die Replikationsarchitektur entkoppelt die Prozesse des Abrufens und Schreiben von Ereignissen auf dem Replikat. Dadurch können die beiden Threads asynchron arbeiten, sodass der I/O-Thread unabhängig vom SQL-Thread agieren kann. Dies hat jedoch zur Folge, dass Änderungen, die auf dem Master parallel in verschiedenen Threads ausgeführt werden, auf

dem Replikat nicht parallelisiert werden können. Das liegt daran, dass die Veränderungen auf dem Replikat in einem einzigen Thread abgearbeitet werden. Generell gibt es auch keine Garantie für die Latenz des Replikats und große Abfragen können dazu führen, dass das Replikat Sekunden, Minuten oder sogar Stunden hinter dem Master zurückbleibt. Der Flaschenhals (engl. bottleneck) des gesamten Systems stellt die Anzahl der Schreibvorgänge dar, die der langsamste Thread ausführen kann.

Wie aus der Funktionsweise der Replikation hervorgeht, verursacht der Master nur einen geringen Mehraufwand. Wenn das binäre Logging für Backups und Point-in-Time-Recovery genutzt wird, kann es jedoch deutlich mehr Ressourcen beanspruchen. Jedes angeschlossene Replikat verursacht nur eine geringe zusätzliche Last (hauptsächlich Netzwerk-I/O) auf dem Master. Trotzdem sollten die Auswirkungen vieler Replikate nicht unterschätzt werden, da sie im Wesentlichen zu unnötiger Daten-Duplikation führen.

Als Nächstes werden die zwei verschiedenen Arten der Replikation betrachtet, die von MySQL unterstützt werden: die anweisungsbasierte (engl. statement-based) und die zeilenbasierte (engl. row-based) Replikation. Die anweisungsbasierte Replikation wird seit MySQL 5.0 und älter unterstützt und funktioniert, indem die Abfrage, die die Daten auf dem Master geändert hat, protokolliert wird. Wenn ein Replikat das Ereignis aus dem Relay-Log liest und ausführt, wird die tatsächliche SQL-Abfrage erneut ausgeführt, die der Master ausgeführt hat. Der offensichtlichste Vorteil davon ist, dass sie relativ einfach zu implementieren ist und das Protokollieren sowie Wiederholen der Anweisungen das Replikat logischerweise mit dem Master synchron halten sollte. Außerdem sind die Binary-Log-Ereignisse in der Regel recht kompakt und verbrauchen nicht viel Bandbreite. In der Praxis gibt es jedoch Änderungen auf dem Master, die von Faktoren abhängen, die über den reinen Abfragetext hinausgehen. Beispielsweise werden Anweisungen zu leicht oder sogar deutlich unterschiedlichen Zeiten auf dem Master und dem Replikat ausgeführt. Deshalb muss das Binary Log nicht nur den Abfragetext, sondern auch Metadaten wie den aktuellen Zeitstempel enthalten. Einige Anweisungen kann MySQL nicht korrekt replizieren, wie zum Beispiel Abfragen, die die Funktion `CURRENT_USER()` verwenden. Auch gespeicherte Routinen und Trigger stellen bei dieser Art der Replikation ein Problem dar.

Die zeilenbasierte Replikation speichert die tatsächlichen Datenänderungen im Binary-Log. Ein großer Vorteil, der daraus folgt, ist, dass MySQL jede Anweisung korrekt replizieren kann. Zudem können einige Änderungen mithilfe der zeilenbasierten Replikation effizienter sein, da das Replikat die Abfragen, die die Zeilen auf dem Master geändert haben, nicht erneut ausführen muss. Zum Beispiel, wenn eine Abfrage viele Zeilen in der Quelltable scannt, aber nur drei Zeilen in der Zieltabelle bearbeitet. Bei der anweisungsbasierten Replikation müsste ein Replikat die Anweisung erneut ausführen, nur um ein paar Zeilen zu erstellen, während dies bei der zeilenbasierten Replikation effizient und trivial ist. Andererseits ist das folgende Ereignis deutlich günstiger mit statement-basierter Replikation zu replizieren:

```
1 UPDATE master_table SET col1 = 0;
```

Die Verwendung der zeilenbasierten Replikation für diese Abfrage wäre sehr teuer, da jede Zeile geändert und somit ins Binary-Log geschrieben wird. Dadurch würde das Binary-Log-Ereignis extrem groß werden, was sowohl beim Protokollieren als auch bei der Replikation zu einer höheren Last auf dem Master führen würde. Damit kommen wir zu weiteren Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Arten.

Die anweisungsbasierte Replikation eignet sich besser, wenn das Schema auf Master und Replikat unterschiedlich ist und unterstützt Szenarien mit unterschiedlichen, aber kompatiblen Datentypen oder Spaltenreihenfolgen. Zudem erleichtert sie Schemaänderungen auf Replikaten, die später als Master dienen sollen, wodurch Ausfallzeiten reduziert werden können. Im Gegensatz dazu kann die zeilenbasierte Replikation bei Schemaänderungen auf einem Replikat bestimmte Operationen nicht ausführen, bietet jedoch eine zuverlässige Funktionalität mit allen SQL-Konstrukten. Sie stoppt auch bei Fehlern, z.B. wenn eine erwartete Zeile auf dem Replikat fehlt und weist damit auf Inkonsistenzen hin, während der andere Typ keine Hinweise auf fehlende Einträge gibt. Die Fehlersuche und das Verständnis von Problemen sind bei der anweisungsbasierten Replikation einfacher, da die Änderungen über verständliche SQL-Anweisungen erfolgen. Bei der zeilenbasierten Replikation ist die Nachvollziehbarkeit der Änderungen dagegen schwieriger, jedoch gibt es dafür weniger Locking-Probleme. Die zeilenbasierte Replikation erleichtert die Datenwiederherstellung durch das Speichern alter Daten, wobei eine Wiederherstellung zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem Binary-Log im zeilenbasierten Format zwar schwieriger, aber möglich ist. Außerdem benötigt sie häufig weniger CPU-Ressourcen, da keine komplexe SQL-Ausführungslogik erforderlich ist.

Da kein Format in jeder Situation perfekt ist, kann MySQL dynamisch zwischen statement-basierter und row-basierter Replikation wechseln. Standardmäßig wird die statement-basierte Replikation verwendet, aber wenn MySQL ein Ereignis erkennt, das nicht korrekt als Statement repliziert werden kann, wechselt es automatisch zur row-basierten Replikation. Alternativ kann das Format auch durch Setzen der Variable `binlog_format` manuell gesteuert werden.

7.2 Konfiguration des Master-Replikat-Ansatzes

Um Benchmarks ausführen zu können, muss der Master-Replika-Ansatz in MySQL konfiguriert werden. Zunächst gilt es, das Szenario der Replikation festzulegen, das umgesetzt werden soll. In diesem Kapitel wird das Modell mit einem Master und einer beliebigen Anzahl an Replikaten betrachtet. Die erforderlichen Schritte umfassen das Erstellen der Master- und

Replikationsknoten und der anschließenden Anweisung an das Replikat, sich mit dem Master zu verbinden. Abschließend muss die Replikation gestartet werden.

Nach dem Starten der Knoten müssen einige spezielle MySQL-Privilegien berücksichtigt werden, die erforderlich sind, damit die Replikationsprozesse ordnungsgemäß ausgeführt werden können. Dazu muss ein Benutzer auf dem Master erstellt werden und diesem die richtigen Privilegien zugewiesen werden, damit der I/O-Thread sich als dieser Benutzer verbinden und das Binary-Log des Masters lesen kann. Außerdem darf nicht vergessen werden, die Datenbank zu erstellen, auf der die Benchmarks ausgeführt werden (wie in 2.1).

Codeblock 7.1: Datenbank- und Nutzererstellung sowie Rechtevergabe

```
1 CREATE DATABASE sbtest;
2 CREATE USER 'repl'@'%' IDENTIFIED WITH sha256_password BY 'repl_password';
3 GRANT REPLICATION SLAVE ON *.* TO 'repl'@'%';
```

Diesen Nutzer muss nur auf dem Master erstellt werden, ist jedoch auch für die Verbindung der Replikate mit dem Master erforderlich. Im nächsten Schritt müssen einige Einstellungen auf dem Master und den Replikaten vorgenommen werden. Zum einen muss die Binärprotokollierung aktiviert und zum anderen eine einzigartige ID mit dem Parameter `server_id` angegeben werden. Wenn die Binärprotokollierung in der Konfigurations-Datei nicht bereits angegeben wurde, muss MySQL neu gestartet werden. Alternativ können die Einstellungen auch direkt beim Starten des Containers angegeben werden. Um zu überprüfen, ob die Binary-Logdatei auf dem Master erstellt wurde, kann man abhängig von der MySQL-Version folgende Befehle ausführen:

Codeblock 7.2: Anzeige der Konfiguration

```
1 SHOW BINARY LOG STATUS; --MySQL ≥8.0.23
2 SHOW MASTER STATUS; --MySQL <8.0.23
```

Die wichtigste Einstellung für das Binär-Logging auf dem Master ist `sync_binlog`, wobei der Wert auf 1 gesetzt werden muss. Diese Option sorgt dafür, dass MySQL den Inhalt des Binary-Logs, bei jedem Transaktions-Commit auf die Festplatte synchronisiert. Ist die Option deaktiviert, verringert sich der Arbeitsaufwand des Servers, jedoch könnten Binary-Log-Einträge bei einem Absturz verloren gehen. Auf einem Replikat, das nicht als Master dient, erzeugt diese Option unnötigen Mehraufwand. Es wird außerdem empfohlen, einen Basisnamen für das Binary-Log explizit anzugeben, um einheitliche Namen auf allen Servern zu gewährleisten und Änderungen bei einem Hostnamenwechsel zu vermeiden. Dazu muss ein Argument für die `log_bin`-Option angegeben werden.

Es gibt noch weitere optionale Konfigurationsparameter, die hinzugefügt werden können. Einer davon ist der Parameter `relay_log`, der den Speicherort und den Namen des Relay-

Logs festlegt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist `log_slave_updates`, der es dem Replikat ermöglicht, replizierte Ereignisse in sein eigenes Binary-Log zu schreiben. Die Option `skip_slave_start` sorgt dafür, dass das Replikat nach einem Absturz automatisch startet, was die Möglichkeit offenlässt, den Server im Falle eines Problems zu reparieren. Zudem sorgt die Option `read_only` dafür, dass die meisten Benutzer keine nicht-temporären Tabellen ändern können. Die einzigen Ausnahmen bilden der Replikation-SQL-Thread und Threads mit dem SUPER-Privileg, weshalb dieses Privileg normalen Benutzern nicht zugewiesen werden sollte. In unserem Anwendungsfall haben die Replikate die Option `read_only` aktiviert. Wenn das Replikat stark im Rückstand ist, kann der I/O-Thread den Festplattenspeicher füllen. Mit der Option `relay_log_purge` kann verhindert werden, dass der Replikation-SQL-Thread diese entfernt diese, sobald er mit deren Verarbeitung fertig ist.

Der nächste Schritt besteht darin, dem Replikat mitzuteilen, wie es sich mit dem Master verbinden und dessen Binary-Logs abspielen kann. Umgesetzt kann das mit der Ausführung des folgenden Befehls auf allen Replikaten:

Codeblock 7.3: Verbindung des Replikats zum Master

```
1 CHANGE MASTER TO
2   MASTER_HOST='YOUR_HOST_NAME',
3   MASTER_USER='YOUR_USER',
4   MASTER_PASSWORD='YOUR_PASSWORD',
5   MASTER_LOG_FILE='mysql-bin.000001',
6   MASTER_LOG_POS=0;
```

Die Spalten `MASTER_LOG_FILE` und `MASTER_LOG_POS` müssen mit dem Ergebnis von dem Befehl aus 7.2 übereinstimmen. Um sicherzustellen, dass die Datenbank `sbtest` und der Benutzer mit den entsprechenden Privilegien tatsächlich existieren, muss der Befehl aus 7.2 bereits vor der Ausführung des Befehls in 7.1 ausgeführt werden. Um die eigentliche Replikation zu starten, muss man den folgenden Befehl auf den Replikaten ausführen:

Codeblock 7.4: Starten der Replikation

```
1 START SLAVE;
```

Mit dem folgenden Befehl lässt sich überprüfen, ob die Durchführung erfolgreich war:

Codeblock 7.5: Status des Replikats

```
1 SHOW PROCESSLIST\G;
```

Die Spalten `Slave_IO_State`, `Slave_IO_Running` und `Slave_SQL_Running` zeigen an, ob die Replikationsprozesse laufen oder nicht. Wenn `Seconds_Behind_Master` nicht mehr NULL ist, bedeutet das, dass der I/O-Thread bereits alle Binary-Logs abgerufen hat und nun auf ein

Ereignis vom Master wartet. Man sollte auch beobachten können, dass die verschiedenen Datei- und Positionswerte auf dem Replikat inkrementiert werden, wenn man Änderungen an dem Master vornimmt. Außerdem sollten zwei Threads auf dem Replikat aktiv sein, die unter dem Benutzer „system user“ laufen.

Bei den bisherigen Setup-Anweisungen wurde von einer frischen Installation ausgegangen. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, um ein Replikat von einem anderen Server zu initialisieren. Zum einen kann man bereits existierende Daten von einem Master kopieren, ein Replikat von einem anderen Replikat klonen oder ein Replikat aus einem aktuellen Backup starten. Um ein Replikat mit einem Master zu synchronisieren, sind drei Elemente erforderlich: eine Momentaufnahme der Master-Daten zu einem bestimmten Zeitpunkt, die Log-Datei des Masters mit dem entsprechenden Byte-Offset (ermittelbar durch den Befehl [7.2](#)) sowie die Binary-Logs des Masters ab diesem Zeitpunkt. Eine kalte Kopie erfordert das Herunterfahren des Masters, um dessen Dateien zu kopieren, bevor er mit einem neuen Binary-Log neu gestartet wird, was jedoch zu Ausfallzeiten führt. Bei einer warmen Kopie können die Dateien übertragen werden, während der Server weiterhin läuft.

7.3 Analyse

Im vorherigen Abschnitt wurde erklärt, wie man den Master und vor allem die Replikate korrekt konfiguriert und den Prozess der Replikation startet. Für die Durchführung der Benchmarks werden erneut die Kundentabelle und die Bestelltabelle aus Kapitel [2.2](#) benötigt. Die einzigen erforderlichen Anpassungen betreffen das Festlegen des Binlog-Formats, das über die Variable `binlog_format` definiert wird und die Werte `STATEMENT`, `ROW` oder `MIXED` annehmen kann. Diese Einstellung kann entweder global für den gesamten Server oder lokal für die aktuelle Sitzung mithilfe des Befehls `SET SESSION` geändert werden. Damit lassen sich die Performanceunterschiede zwischen den einzelnen Arten, insbesondere bei den Einfügeoperationen, vergleichen. Der eigentliche Aufwand bei diesen Benchmarks besteht in der Einrichtung der Replikation auf dem lokalen Rechner und im Workflow, während die Veränderungen an den Lua-Skripten minimal sind.

Im ersten Vergleich sollen die Performanceunterschiede zwischen dem Master-Replikat-Ansatz und dem Ansatz mit einem einzelnen MySQL-Server festgestellt werden. Beim Master-Replikat-Ansatz wird mit `ROW` immer der Standardwert des Binlog-Formats verwendet. Damit keine Fehler auftreten, müssen die beiden Ansätze miteinander kompatibel gemacht werden. Das Problem dabei ist, dass der Standardport von MySQL (3306) nicht gleichzeitig verwendet werden darf. Daher wird der Master auf Port 3307 gestartet und jedes Replikat erhält einen um 1 erhöhten Wert. Somit nutzt das dritte Replikat den Port 3310. Die Anzahl der Replikate lässt sich in der `envs.json`-Datei über die Variable `REPLICAS_COUNT` festlegen. Die Voraussetzung

dafür ist, dass es lokal mindestens diese Anzahl an gestarteten und konfigurierten Replikate gibt. Innerhalb des Workflowjobs muss nichts angepasst werden, da dort `REPLICAS_COUNT` dazu genutzt wird, die exakte Anzahl an Replikate zu starten. Wichtig ist noch zu erwähnen, dass die Insert-Befehle nur auf dem Master, also Port 3307, ausgeführt werden. Die Select-Befehle werden sowohl auf dem Master als auch auf die Replikate ausgeführt.

Beim Betrachten der Ergebnisse aus Abbildung 7.2 fällt auf, dass die Version ohne Replikation am schnellsten ist. Danach folgen die Readabfragen auf dem Master auf Port 3307. Der Unterschied der beiden liegt bei etwa 15%. Nah an dem Ergebnis vom Master ist das erste Replikat (3308). Überraschenderweise folgen mit etwas mehr Abstand erst die anderen beiden Replikate auf den Ports 3309 und 3310. Bei der Schreibgeschwindigkeit gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Varianten, da durch den Prozess der Replikation die Schreibgeschwindigkeit ungefähr 60% langsamer ist.

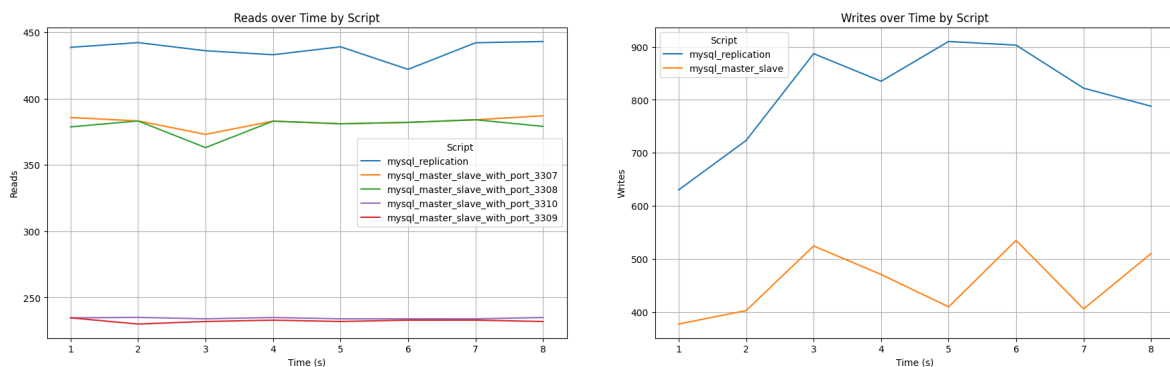
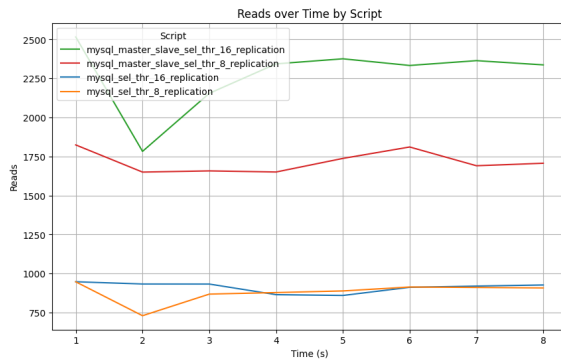
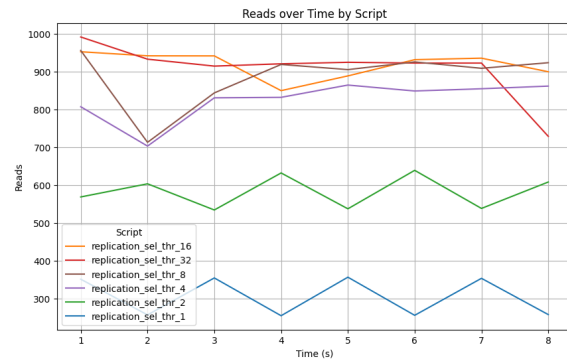


Abbildung 7.2: Vergleich zwischen Master mit 3 Replikaten und Single-Server-Ansatz

Bei dem ersten Vergleich betrug der Threads-Wert bei Einfügungen und Abfragen 1, sodass die Leistung eines einzelnen Threads ersichtlich wurde. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass der Single-Server am effizientesten ist, solange er nicht stark ausgelastet wird. In diesem Fall bringt der Master-Replikat-Ansatz demnach keine Vorteile. Anders verhält es sich, wenn die Last auf den Server erhöht wird, indem die Anzahl der Threads gesteigert wird. Die Threadanzahl kann beim Ausführen des Sysbench-Befehls mit dem Parameter `--threads` festgelegt werden. Die Prozesse sollen die Last durch Nutzer in der Datenbank simulieren. Um den Vergleich zwischen dem Single-Server und dem Master-Replikat-Ansatz zu verdeutlichen, wird der Benchmark mit 8 und 16 Threads durchgeführt. Beim Single-Server werden alle Threads auf einem Server ausgeführt, während sie beim Master-Replikat-Ansatz auf den Master und die drei Replikate gleichmäßig aufgeteilt werden. Bei 8 Threads wird die Last so aufgeteilt, dass der Master und alle Replikate je 2 Threads verarbeiten ($8/4 = 2$). Nach diesem Prinzip wird der Benchmark auch mit 16 Threads durchgeführt (siehe Abbildung 7.3a).



(a) Mit Replikation



(b) Ohne Replikation

Abbildung 7.3: Vergleich von 8 Threads an Single-Server und jeweils 2 an die unters. Ports

Zunächst ist in der linken Grafik zu erkennen, dass beide Kurven des Single-Server-Ansatzes sehr ähnlich verlaufen. Auf den ersten Blick könnte das überraschen, da man erwarten würde, dass eine Verdopplung der Threadanzahl auch zu einer Verdopplung der Leseabfragen führt. Deshalb wurde noch ein weiterer Vergleich durchgeführt, bei dem die Threadanzahlen der 2er-Potenzreihe bis einschließlich 2^5 nur für den Single-Server-Ansatz getestet wurden. Zusätzlich wurde bei diesem Vergleich die CPU-Auslastung mit dem folgenden Befehl gemessen:

Codeblock 7.6: Messen der CPU-Auslastung

```
1 top -l 1 | grep 'CPU usage' | awk '{print $3 + $5}' %Für Mac
2 top -bn1 | grep 'Cpu(s)' | sed 's/., *\\([0-9.]*\\)% id.*/\\1/' | awk '{print 100 - $1}' %Für Linux
```

Die Ergebnisse der CPU-Auslastung und der Anzahl der Leseabfragen sind in Tabelle 7.1 dargestellt, sortiert nach aufsteigender Threadanzahl. Die Abbildung 7.3b zeigt, dass sich die Leseperformance beim Anstieg von 1 auf 2 Threads nahezu verdoppelt. Zwischen 2 und 4 Threads fällt der Unterschied schon geringer aus, liegt aber dennoch bei etwa 40%. Die restlichen Threadanzahlen weichen nur geringfügig voneinander ab. Begründen lässt sich das durch die CPU-Auslastung. Bei einer geringeren Anzahl an Threads ist die CPU-Auslastung sehr niedrig, was die starken Anstiege erklärt. Irgendwann ist die CPU jedoch voll ausgelastet, sodass die Performance nicht mehr weiter steigt. Dies ist bei 8 Threads der Fall, da dort die CPU-Auslastung bei 89.34% liegt.

Anzahl an Threads	Durchschnittliche CPU-Auslastung	Anzahl an Leseabfragen
1	1.36%	2437
2	26.44%	4662
4	67.12%	6609
8	89.34%	7106
16	85.74%	7362
32	99.14%	7295

Tabelle 7.1: Auslastung mit unterschiedlichen Threadanzahlen

Wenn nun wieder das Ergebnis aus 7.3a betrachtet wird, werden die Vorteile der Replikation deutlich sichtbar. In beiden Fällen liegen die Werte mit Replikation stets deutlich über denen

des Single-Server-Ansatzes. Die Performance des Single-Servers bleibt unabhängig von der Threadanzahl nahezu konstant. Bei der Replikation zeigt sich, dass ein Anstieg an Threads auch zu einer Steigerung der Leseabfragen führt. So ist die Kombination von 16 Threads, verteilt auf den Master und 3 Replikate, am effizientesten. Danach folgt mit etwas Abstand die Version mit 8 Prozessen, die etwa 25% langsamer ist. Aber selbst diese ist deutlich schneller als alle Varianten des Single-Server-Ansatzes, sodass festgestellt werden kann, dass die Replikation bei höherer Last klare Vorteile bietet.

Im letzten Vergleich wird ausschließlich der Master-Replikat-Ansatz verwendet, um die unterschiedlichen Binlog-Formate zu vergleichen. Zur Begrenzung der Variationen wird nur ein Replikat pro Master betrachtet. Daraus ergeben sich sechs unterschiedliche Leseergebnisse, da für jedes der drei Formate sowohl der Master- als auch der Replikat-Port abgefragt wird. In der Grafik 7.4 ist zu erkennen, dass es bei den verschiedenen Binlog-Formaten und Ports kaum Unterschiede gibt. Und auch die Schreibgeschwindigkeiten verhalten sich bei beiden Varianten sehr ähnlich. Das lässt sich auch mit dem Hexagon-Chart bestätigen, da dort alle Werte sehr nahe beieinander liegen.

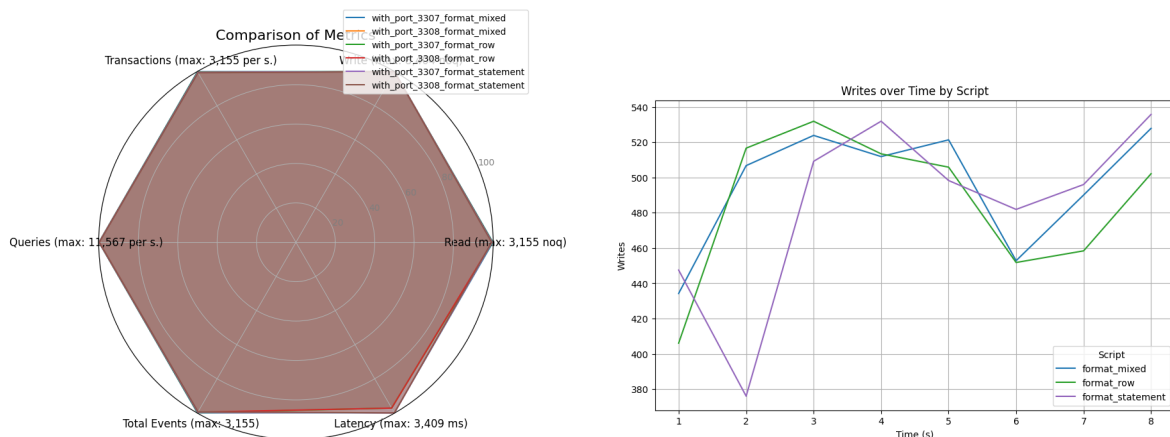


Abbildung 7.4: Vergleich zwischen den unterschiedlichen Binlog-Typen

Die Schlussfolgerungen aus den Messungen sehen dabei wie folgt aus. Es zeigt sich, dass durch Replikation, anders als beispielsweise mit Indexen oder Partitionen, mit einem einzelnen Thread keine deutlichen Performancevorteile gewonnen werden können. Wenn aber mehrere Nutzer auf der Datenbank interagieren und ausschließlich Lesezugriffe benötigen, dann können die Abfragen auf die unterschiedlichen Ports aufgeteilt werden. In diesen Szenarien mit höherer Parallelität und intensiveren Leseoperationen kann Replikation signifikante Vorteile bieten. Die Auswahl des Binlog-Formats hat bei unserem Benchmark zu keinen Performanzgewinnen geführt. Möglicherweise könnte sich jedoch ein anderer Einfluss zeigen, wenn Schreiboperationen ins Spiel kommen oder die Konsistenzanforderungen geändert werden.

8 Fazit

Die vorliegende Bachelorarbeit ging der Frage nach, wie die Performance einer relationalen Datenbank verbessert werden kann. Ihr Aufbau orientiert sich am Prozess des Datenentwurfs. Beim Datenbankentwurf muss man die ermittelten Anforderungen aus den Interviews mit Stakeholdern verwenden, um einen konzeptionellen Entwurf, beispielsweise in Form eines ER-Modells, zu erstellen (Shortcut, 2023). Danach wird aus dem konzeptionellen Entwurf ein Logischer in Form eines Relationenschemas. Dieses Kapitel dient dazu, eine allgemeine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse zu bieten.

Zuallererst betrachten wir den logischen Entwurf, zu dem neben der Normalisierung der Tabellen auch die Wahl der korrekten Datentypen gehört. Das erste Kapitel 3 behandelte dieses Thema im Detail. Mithilfe der Benchmarks haben wir zum einen festgestellt, dass der kleinstmögliche Datentyp für eine Spalte deklariert werden sollte. Dazu muss zunächst festgelegt werden, welcher Bereich an Werten abgebildet werden soll, um darauf basierend den geeigneten Typ auszuwählen. Dabei ist durchaus von Vorteil, dass der Typ bei einer falschen Einschätzung des Wertebereichs ohne viel Aufwand verändert werden kann. Beim Betrachten der numerischen Datentypen fiel auf, dass je größer der Wertebereich und damit der Speicherbedarf ist, desto schlechter wird die Leistung. Deshalb zählen DECIMAL und BIGINT zu den ineffizientesten. Bei den zeichenkettenbasierten Typen ist die Wahl einfach zu treffen, da in den meisten Fällen der Typ VARCHAR am schnellsten ist. Nur wenn eine Spalte häufiger aktualisiert als abgefragt wird, kann es sinnvoll sein, den Typ CHAR in Erwägung zu ziehen. Einer der anderen Leitsätze bei der Wahl der Datenformate ist, dass man die simplere Datenstruktur wählen sollte. So war in unserem Vergleich INT in etwa 50% schneller als CHAR. Zu guter Letzt sollte berücksichtigt werden, dass die Spalten nicht nur aus Performancegründen, sondern auch zur Wahrung der Datenintegrität und -konsistenz an möglichst vielen Stellen als NOT NULL definiert werden sollten.

Nach dem logischen Entwurf einer Datenbank kommt als nächster Schritt die physische Implementierung. Bei diesem Schritt spielen auch die anderen Aspekte, die wir betrachtet haben, wie Indexierung, Sichten, Partitionen oder Replikation, eine Rolle.

Bei der Indexierung haben wir gezeigt, wie effektiv sie sein kann, indem wir den Aufbau und die Funktionsweise der B-Tree- und Hash-Indexe erläutert und getrennt voneinander untersucht haben. Der Vergleich beider Varianten hat ergeben, dass der Hash-Index in bestimmten

Fällen effektiver ist als der B-Baum-Index. Auf der anderen Seite kann der B-Baum-Index bei deutlichen mehr Abfragen eingesetzt werden, insbesondere auch bei Bereichsabfragen oder Filtern von Teilen des Indexes. Im Gegensatz dazu funktioniert der Hash-Index nur bei einem exakten Schlüsselabgleich. Außerdem ist beim Hash-Index auch die Anzahl an Hashkollisionen relevant für die Performance. Der größte Nachteil der Verwendung von Indizes ist der höhere Pflegeaufwand, da bei jeder Datenänderung der Index ebenfalls angepasst werden muss. Wenn Performanceprobleme bei einer Datenbankumgebung auffallen, dann sollte man in den Logs nach Abfragen suchen, die zum einen besonders häufig vorkommen und zum anderen viel Zeit benötigen. Bei der Analyse kann man möglicherweise eine sinnvolle Nutzung von Indizes identifizieren und diese erstellen. Nach einigen Tagen oder Wochen bietet es sich an, eine Kontrolle durchzuführen und abhängig vom Ergebnis können einige Indizes entfernt und andere neue hinzugefügt werden. Ein ähnliches Vorgehen ist auch beim Einsatz von Views nützlich.

Wie die Benchmarks im Kapitel 5 gezeigt haben, wirken sich virtuelle Views nicht auf die Performance aus. Dafür eignen sich virtuelle Sichten hervorragend für Gewährleistung von Rechtemanagement in einer Organisation, denn sie haben den Vorteil, dass die Daten nicht physisch gespeichert werden und somit keine Redundanzen entstehen. Materialisierte Sichten hingegen werden auf der Festplatte gesichert und bieten dafür ein erhebliches Performancepotenzial. Besonders geeignet sind sie in Szenarien, in denen häufig auf aggregierte oder komplexe Abfragen zugegriffen wird, wie zum Beispiel in OLTP-Systemen. Es ist durchaus sinnvoll, sich bereits beim Datenbankentwurf Gedanken über Sichten zu machen, doch es ist auch möglich, diese, wie bei Indizes, erst im Laufe der Zeit zu ergänzen. Wie genau die Implementierung von materialisierten Sichten umgesetzt werden kann, hängt vom jeweiligen Datenbankmanagementsystem ab. Einige DBMS unterstützen materialisierte Sichten, während andere sogar eine inkrementelle Auffrischung ermöglichen. In MySQL hingegen müssen materialisierte Sichten durch dedizierte Tabellen in Kombination mit Triggern nachgebildet werden. Bei den Tests ist jedoch deutlich geworden, dass die native Implementierung, z.B. in Postgres, einen klaren Performancevorteil gegenüber der Implementierung mit Triggern bietet. Daher ist es ratsam, diesen Aspekt bei der Auswahl des DBMS zu berücksichtigen. In Bezug auf die Schreibperformance muss ebenfalls erwähnt werden, dass die Pflege von materialisierten Sichten die Effizienz negativ beeinflusst.

Bei Partitionen fällt der Mehraufwand geringer aus als bei Indizes oder Sichten, da keine zusätzlichen Datenbankobjekte verwaltet werden müssen. Stattdessen werden die Datensätze auf mehrere Partitionen verteilt und nicht in einer einzelnen Tabelle gespeichert. Wenn eine Datenbankoperation ausgeführt wird, muss zunächst die Partition oder die entsprechenden Partitionen ermittelt werden, die die angeforderten Daten enthalten. Es ist auch möglich, dass eine Datenbankumgebung nicht für die Partitionierung geeignet ist. Normalerweise ist ein Merkmal, das für die Partitionierung spricht, ein natürliches Trennkriterium wie beispielsweise ein Zeitstempel oder geografische Regionen, da dadurch eine logische Auftei-

lung der Daten ermöglicht wird. Abhängig vom Trennkriterium muss man sich für einen der Partitionstypen entscheiden: Range, List, Hash oder Key. Der Performancevorteil der Partitionierung liegt darin, dass nur die relevanten Partitionen durchsucht werden müssen, anstatt die gesamte Tabelle zu scannen. Dieser Vorgang wird als Pruning bezeichnet und führt zu einer erheblichen Steigerung der Abfragegeschwindigkeit. Allerdings gibt es einige Einschränkungen beim Pruning, da es nicht mit allen Operatoren kompatibel ist. Bei der Range-Partitionierung mit einem Zeitstempel als Partitionsschlüssel können bei einigen Operatoren unerwartete Probleme auftreten. Obwohl eine Abfrage, die beispielsweise den `YEAR()`-Operator verwendet, dasselbe Ergebnis wie eine Bereichsabfrage nach dem ersten und letzten Tag eines Jahres liefert, kann die Query mit `YEAR()` nicht für das Partition-Pruning genutzt werden. In einem solchen Fall müssen alle Partitionen durchsucht werden, was die Abfrage sogar langsamer macht als ohne Partitionierung. Für die List-Partitionierung hat sich gezeigt, dass der Operator `IN` am effizientesten ist, gefolgt von `OR`, während `UNION` deutlich weniger effizient ist, weshalb von seiner Verwendung abgeraten werden sollte. Bei der Hash-Partitionierung wurde festgestellt, dass mit zunehmender Anzahl der Partitionen die Suche innerhalb der Partitionierungsstruktur aufwendiger wird und die Performance entsprechend schlechter ausfällt. Diese Erkenntnis gilt auch für die anderen Partitionierungstypen.

Zum Schluss haben wir den Einfluss der Replikation im Rahmen des Master-Replikat-Ansatzes analysiert. Anders als bei der Partitionierung werden bei der Replikation vollständige Kopien der gesamten Datenbank auf mehreren Servern erstellt. Wenn Änderungen am Master vorgenommen werden, werden diese durch verschiedene Threads an die Replikate übertragen. Dadurch wird die Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit erhöht, weshalb Replikation häufig in Verbindung mit Backups eingesetzt wird. Um die Performance zu testen, haben wir die Leistung eines Single-Servers mit der eines Systems aus Master- und Replikaten verglichen. Dabei haben wir festgestellt, dass der Single-Server bei Verwendung eines einzelnen Threads einen Leistungsvorteil hat. Sobald jedoch mehrere Threads die CPU-Auslastung auf dem Single-Server erhöhen und gleichzeitig die Last auf die Master- und Replikatknoten verteilt wird, zeigt sich der Vorteil der Replikationsverteilung. Allerdings treten auch Nachteile beim Einfügen von Daten mit Replikation auf, da das erneute Kopieren der Daten auf die Replikate die Performance negativ beeinflusst. Die Auswahl des Binlog-Formats hat bei keinem Benchmark zu Vor- oder Nachteilen geführt. Aus der Betrachtung der Ergebnisse ergibt sich, dass Replikation kein geeigneter Lösungsansatz ist, wenn nur ein Nutzer auf die Datenbank zugreift. Sie wird jedoch besonders vorteilhaft, wenn die Last auf mehrere Server verteilt werden muss. In Bezug auf die Verteilung ähnelt die Replikation den zentralen Konzepten von NoSQL-Datenbanken, die horizontal skalieren, um Daten auf mehrere Knoten zu verteilen.

Literatur

- DataScientest. (2023). *SQL TRIGGER zur Automatisierung deines DBMS*. Verfügbar 31. Januar 2025 unter <https://datascientest.com/de/sql-trigger-zur-automatisierung-deines-dbms>
- Difallah, D. E., Pavlo, A., Curino, C., & Cudré-Mauroux, P. (2013). OLTP-Bench: An Extensible Testbed for Benchmarking Relational Databases. *PVLDB*, 7(4), 277–288. <http://www.vldb.org/pvldb/vol7/p277-difallah.pdf>
- Garcia-Molina, H. (2008). *Database systems: the complete book*. Pearson Education India.
- Germany, R. (2024). *Was ist ein Snapshot Backup?* Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://www.rubrik.com/de/insights/what-is-a-snapshot-backup>
- GitHub. (2025a). *Caching dependencies to speed up workflows*. Verfügbar 7. Januar 2025 unter <https://docs.github.com/en/actions/writing-workflows/choosing-what-your-workflow-does/caching-dependencies-to-speed-up-workflows#comparing-artifacts-and-dependency-caching>
- GitHub. (2025b). *Understanding GitHub Actions*. Verfügbar 20. Januar 2025 unter <https://docs.github.com/en/actions/about-github-actions/understanding-github-actions>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Kopytov, A. (2024). *Sysbench Github Repository*. Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://github.com/akopytov/sysbench>
- Luber, D.-I. (S. (2018). *Was ist ACID?* Verfügbar 26. Januar 2025 unter <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-acid-a-776182/>
- Luber, D.-I. (S. (2023). *Was ist Scale-Out Storage?* Verfügbar 13. Februar 2025 unter <https://www.storage-insider.de/was-ist-scale-out-storage-a-c2251e6e6a1381fd5e7647120b2d2e47/>
- Matzer, M. (2019). *Der Greedy-Algorithmus*. Verfügbar 28. Februar 2025 unter <https://www.bigdata-insider.de/der-greedy-algorithmus-a-843043/>
- Oracle. (2025a). *10.3.1 How MySQL Uses Indexes*. Verfügbar 28. Februar 2025 unter <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/mysql-indexes.html>
- Oracle. (2025b). *13.1.2 Integer Types (Exact Value) - INTEGER, INT, SMALLINT, TINYINT, MEDIUMINT, BIGINT*. Verfügbar 7. März 2025 unter <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/integer-types.html>
- Oracle. (2025c). *26.6 Restrictions and Limitations on Partitioning*. Verfügbar 17. Februar 2025 unter <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/partitioning-limitations.html>

- Oracle. (2025d). *27.3.1 Trigger Syntax and Examples*. Verfügbar 27. Januar 2025 unter <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/trigger-syntax.html>
- Oracle. (2025e). *MySQL 8.0 Release Notes*. Verfügbar 1. März 2025 unter <https://dev.mysql.com/doc/relnotes/mysql/8.0/en/>
- Ouko, A. (2025). *SQL Materialized View: Verbesserung der Abfrageleistung*. Verfügbar 26. Januar 2025 unter <https://www.datacamp.com/de/tutorial/sql-materialized-view>
- pandas development team, T. (2020, Februar). *pandas-dev/pandas: Pandas (Version latest)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- Reimers, N. (2017). *Virtuelle, dezidierte und Cloud-Server: MySQL-Benchmark mittels sysbench*. Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://www.webhosterwissen.de/know-how/server/mysql-benchmark-mittels-sysbench/>
- Reinboth, C. (2020). *Grundlagen der Statistik: Lagemaße – Median, Quartile, Perzentile und Modus*. Verfügbar 4. März 2025 unter <https://wissenschafts-thurm.de/grundlagen-der-statistik-lagemasse-median-quartile-perzentile-und-modus/>
- Schwartz, B., Zaitsev, P., & Tkachenko, V. (2012). *High performance MySQL: optimization, backups, and replication*. „O'Reilly Media, Inc.“
- Shopify. (2022a). *Detailed design documentation*. Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://shopify.github.io/mybench/detailed-design-doc.html#live-monitoring-user-interface>
- Shopify. (2022b). *What is mybench?* Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://shopify.github.io/mybench/introduction.html>
- Shopify. (2024). *Mybench Github Repository*. Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://github.com/Shopify/mybench>
- Shortcut. (2023). *Grundlagen des Datenbankentwurfs, ER-Modell, Normalisierung*. Verfügbar 27. Februar 2025 unter <https://entwickler.de/datenbanken/1-grundlagen-des-datenbankentwurfs-er-modell-normalisierung>
- Vogel, M. (2009). *EDV-Lexikon: Bottleneck*. Verfügbar 28. Oktober 2024 unter <https://martinvogel.de/lexikon/bottleneck.html>
- Williams, T., Kelley, C., & many others. (2010, März). *Gnuplot 4.4: an interactive plotting program*.

Anhang

Hier beginnt der Anhang. Siehe die Anmerkungen zur Sinnhaftigkeit eines Anhangs in Abschnitt

Der Anhang kann wie das eigentliche Dokument in Kapitel und Abschnitte unterteilt werden. Der Befehl `\appendix` sorgt im Wesentlichen nur für eine andere Nummerierung.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

Performance - Optimierung von Datenbanken

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 21. Dezember 1940