



Performance Analyse der Optimierung von Datenbankabfragen in der HANA Calculation Engine

Projektarbeit 2

im Rahmen der Prüfung zum
Bachelor of Science (B.Sc.)

des Studienganges Wirtschaftsinformatik
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Jared Heinrich

Abgabedatum:	26. August 2024
Bearbeitungszeitraum:	06.05.2024 - 25.08.2024
Matrikelnummer, Kurs:	5101479, WWI22SEA
Ausbildungsfirma:	SAP SE Dietmar-Hopp-Allee 16 69190 Walldorf, Deutschland
Unternehmensbetreuer:	Rainer Agelek
Wissenschaftlicher Betreuer:	Prof. Dr. Hans-Henning Pagnia

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema:

*Performance Analyse der Optimierung von Datenbankabfragen in der HANA
Calculation Engine*

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Mannheim, den 18. Juli 2024

Heinrich, Jared

Abstract

- *Deutsch* -

Das ist der Abstract.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Quellcodeverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1. Calculation Engine	2
2.2. Modelle und Datenbankabfragen	2
2.3. Verschiedene Arten von Performance Analyse	4
2.4. Notwendige Grundlagen aus der Graphentheorie	4
2.5. Statistische Grundlagen	5
3. Aktueller Stand der Performance Analyse in der Calculation Engine	7
3.1. Google Benchmark	7
3.2. HANA Profiler	8
4. Konzept	11
5. Umsetzung	15
5.1. Implementation der neuen Methode	15
6. Verifikation	16
7. Fazit und Ausblick	17
A. Anhang	18
Literaturverzeichnis	19

Abkürzungsverzeichnis

CE Calculation Engine

Abbildungsverzeichnis

2.1. Beispiel Modell	3
3.1. Google Benchmark Ausgabe	8
3.2. Beispielausgabe des HANA Profilers	10
4.1. Beispiel Modelle	14

Tabellenverzeichnis

Quellcodeverzeichnis

1. Einleitung

2. Grundlagen

2.1. Calculation Engine

2.2. Modelle und Datenbankabfragen

Um Daten einer HANA Datenbank zu analysieren, können sogenannte Kalkulationssichten genutzt werden. Da nur diese Kalkulationssichten in der Arbeit weiter betrachtet werden, werden sie im Folgenden auch als Datenbankabfragen bezeichnet. (Vgl. SAP 2024)

In der Calculation Engine (CE) werden diese Datenbankabfragen durch Modelle dargestellt. Für jede Abfrage wird zuerst das dazugehörige Modell instanziiert. Anschließend wird dieses Modell optimiert, um die Ausführungsdauer der Abfrage zu minimieren. Diese optimierte Abfrage, wird dann auf der Datenbank ausgeführt. Allgemein kann man ein Modell als azyklischen gerichteten Graphen nach Definition 1 und Definition 3 beschreiben. Des Weiteren ist zu beachten, dass dieser Graph nur eine Quelle nach Definition 5 hat, welche auch als Abfrageknoten bezeichnet wird. Diese Definitionen reichen jedoch nicht aus, da zwischen verschiedenen Arten von Knoten unterschieden wird, welche jeweils verschiedene Informationen beinhalten. Allgemein werden die Knoten in der CE in zwei Gruppen unterschieden, Datenquellen und Sichtknoten. Es gibt verschiedene Datenquellen, zur Vereinfachung werden in dieser jedoch nur Table-Knoten betrachtet. Deshalb werden Datenquellen im Folgenden auch Tabellenknoten genannt. Die andere Gruppe sind die Sichtknoten. Zu diesen gehören z. B. Projection, Aggregation, Join und Union. Auch hier gibt es zwar noch Weitere, diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf diese. Diese Modelle könnte man zwar wie in Definition 1 beschreiben als eine Menge von Knoten und Kanten darstellen, gespeichert wird jedoch eine Liste an Knoten, von welchen jedem seine Kind- und Elternknoten zugeordnet sind. Die Kindknoten werden dabei als Eingangsknoten und die Elternknoten als Ausgangsknoten bezeichnet. Jeder Knoten kann beliebig viele Ausgangsknoten haben, wobei es wie bereits beschreiben nur einen Knoten mit 0 Ausgangsknoten gibt. Die Anzahl der Eingangsknoten unterscheidet sich dabei je nach Knotentyp. Projection- und Aggregation-Knoten haben genau

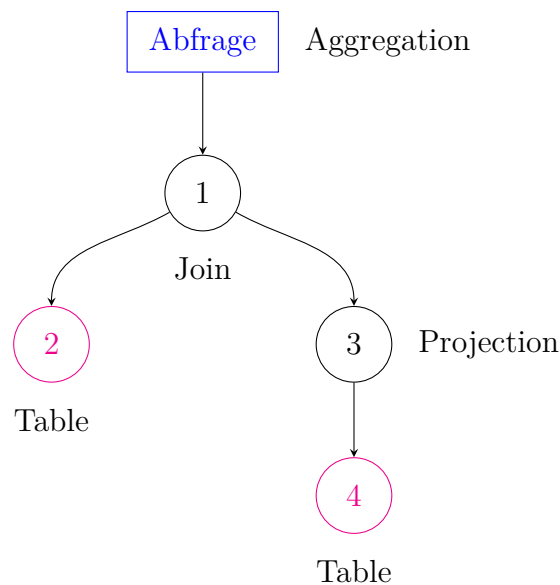


Abbildung 2.1.: Beispiel Modell

einen, Join- und Union-Knoten haben zwei oder mehr und ein Table-Knoten hat keinen Eingangsknoten. Bei den Eingangsknoten kann es sich um Tabellenknoten sowie auch Sichtknoten handeln. (Vgl. SAP 2024, /Create Calculation Views/Supported View Nodes for Modeling Calculation Views)

Abbildung 2.1 zeigt ein einfaches Beispielmmodell, welches zur Veranschaulichung dient. Das Modell besteht aus fünf Knoten, dem Abfrageknoten, zwei Sichtknoten und zwei Tabellenknoten. In dem Knoten steht der Name des Knotens und neben ihm steht der Knotentyp. Bis auf den Abfrageknoten haben in diesem Beispiel alle Knoten eine Zahl als Namen. Der Abfrageknoten sowie alle Tabellenknoten sind zusätzlich farblich markiert. Knoten 1 ist ein Join-Knoten. Er hat zwei Eingangsknoten, den Table-Knoten 2 und den Projection-Knoten 3. Der einzige Ausgangsknoten ist in diesem Fall der Abfrageknoten, dieser ist hier vom Typ Aggregation. Der Abfrageknoten könnte jedoch alternativ auch vom Typ Projection sein.

Was genau ist Aggregation

Join nur 2

Unsicher??

Zusätzlich zu den Eingangs- und Ausgangsknoten werden in jedem Knoten noch weitere Informationen gespeichert. Jeder Knoten beinhaltet eine Liste an Sichtattributen, diese legt fest, welche Sichtattribute dieser Knoten an seine Ausgangsknoten weitergibt. Bei einem Tabellenknoten sind die Sichtattribute gleichbedeutend mit den Spalten der Tabelle. Die Sichtattribute des Abfrageknotens sind die Attribute, welche im Ergebnis der Abfrage

enthalten sind. Damit Sichtattribute umbenannt werden können, wird jedem Eingangsknoten eine Liste an Mappings zugeordnet. Hat der Knoten N einen Eingangsknoten E mit einem Mapping, dann bildet dieses ein Sichtattribut von E auf ein Sichtattribut von N ab.

Die verschiedenen Sichtknotentypen sind für verschiedene Operationen zuständig. Manche dieser Knoten haben noch zusätzliche Attribute, um die genaue Art und Weise der Operation festzulegen. Ein Join-Knoten kann genutzt werden, um die Ergebnisse der beiden Eingangsknoten zu verbinden.

2.3. Verschiedene Arten von Performance Analyse

Benchmarking

Profiling

2.4. Notwendige Grundlagen aus der Graphentheorie

Definition 1 gibt eine Definition für einen gerichteten Graphen (vgl. Knebl 2021, S.220).

Definition 1. Ein gerichteter Graph ist ein Tupel $G = (V, E)$. V heißt Menge der Knoten. E heißt Menge der gerichteten Kanten. Es gilt $V \neq \emptyset$ und $E \subset V \times V \setminus \{(v, v) | v \in V\}$. Zwischen zwei Knoten $u, v \in V$ gibt es eine Kante mit dem Anfangspunkt u und dem Endpunkt v , wenn $(u, v) \in E$.

Definition 2 gibt eine Definition für einen Pfad in einem Graphen (vgl. Knebl 2021, S.221f).

Definition 2. Ein Pfad P in G ist eine Folge von Knoten v_0, \dots, v_n . Dabei muss $\forall i \in \{0; \dots; n-1\} : (v_i, v_{i+1}) \in E$ gelten. v_0 heißt Anfangspunkt von P , v_n heißt Endpunkt von P und n heißt Länge von P .

Definition 3 gibt eine Definition für Zyklen in einem gerichteten Graphen und definiert den Begriff des azyklischen Graphen (vgl. Knebl 2021, S.222).

Definition 3. Ein Pfad heißt geschlossen, wenn $v_0 = v_n$. Ein geschlossener Pfad heißt einfach, wenn $\forall i, j \in \{0; \dots; n-1\}, i \neq j : v_i \neq v_j$ gilt. In einem gerichteten Graphen heißt ein einfach geschlossener Pfad mit $n \geq 2$ auch Zyklus. Ein Graph heißt azyklisch, wenn er keine Zyklen besitzt.

Definition 4 definiert den Begriff des gewichteten Graphen (vgl. Knebl 2021, S.253).

Definition 4. G heißt gewichtet, wenn es eine Abbildung $g : E \rightarrow \mathbb{R}$ gibt, welche jeder Kante ein Gewicht zuordnet. Für $e \in E$ heißt $g(e)$ Gewicht von e .

Definition 5 definiert die Begriffe Quelle und Senke (vgl. Knebl 2021, S.306).

Definition 5. Ein Knoten $q \in V$ heißt Quelle, wenn $\neg \exists p \in V : (p, q) \in E$, q also nach Definition 6 keine Elternknoten hat. $s \in V$ heißt Senke, wenn $\neg \exists p \in V : (s, p) \in E$, s also nach Definition 6 keine Kindknoten hat.

Definition 6 definiert die Begriffe Kindknoten, Elternknoten und Subknoten.

Definition 6. Für zwei Knoten c und p gilt, c ist Kindknoten von p , wenn $(p, c) \in E$. Umgekehrt gilt, wenn $(p, c) \in E$, p ist Elternknoten von c . c ist Subknoten von p , wenn $\exists P : (v_0 = p) \wedge (v_n = c)$, es also einen Pfad von p nach c gibt.

2.5. Statistische Grundlagen

In Definition 7 wird der Begriff metrisches Merkmal definiert (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.24).

Definition 7. Bei einem metrisch skaliertem Merkmale werden einzelne Ausprägungen anhand einer Zahlenskala bewertet, häufig in Verbindung mit einer Maßeinheit. Sie lassen sich anhand der Größe ordnen und vergleichen. Außerdem kann man die Abstände zwischen verschiedenen Ausprägungen messen und interpretieren.

Definition 8 definiert die, im Kontext dieser Arbeit gleichbedeutenden, Begriffe Durchschnitt, Mittelwert und Arithmetisches Mittel (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.52f).

Definition 8. Das arithmetische Mittel von n metrisch skalierten Beobachtungswerten x_1, \dots, x_n , genannt \bar{x} .

Es gilt:
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Definition 9 beschreibt den Begriff der Varianz (vgl. Fisher 1919, S.399).

Definition 9. Die empirische Varianz von n metrisch skalierten Beobachtungswerten x_1, \dots, x_n , genannt \tilde{s}^2 , ist der Durchschnitt der quadratischen Abweichung von x_i von \bar{x} .

Es gilt:
$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Definition 10 beschreibt den Begriff der Standardabweichung (vgl. Pearson 1894, S.80).

Definition 10. Die empirische Standardabweichung von n metrisch skalierten Beobachtungswerten x_1, \dots, x_n , genannt \tilde{s} , ist die Quadratwurzel der Varianz.

Es gilt:
$$\tilde{s} = \sqrt{\tilde{s}^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

3. Aktueller Stand der Performance Analyse in der Calculation Engine

In der CE werden bereits verschiedene Wege genutzt, um die Performance und das Verhalten der HANA Datenbank zu analysieren.

3.1. Google Benchmark

Google Benchmark ist ein Open Source Benchmarking Tool von Google, welches es einem ermöglicht einzelne Funktionen in C++ zu benchmarken. Dazu kann man ähnlich zu den meisten Test Frameworks drei verschiedene Codeabschnitte definieren.

Der Hauptabschnitt definiert was genau im Benchmark untersucht werden soll. Dieser legt die für die Messung relevante Logik fest. Der Setup Abschnitt wird einmal vor jeder Ausführung des Benchmarks aufgerufen. In dieser werden die Voraussetzungen für die Ausführung des Hauptabschnitts geschaffen. Man könnte sie beispielsweise nutzen, um Testdaten für den Benchmark zu generieren oder zu laden, da er nicht bei den Messungen beachtet wird. Der Teardown Abschnitt wird nach jeder Ausführung des Benchmarks aufgerufen. Dieser beeinflusst, wie der Setup Abschnitt, die Messung nicht.

Des Weiteren bietet Google Benchmark die Option, einen Benchmark mehrmals mit unterschiedlichen Parametern durchzuführen. Um beispielsweise die Auswirkung der Größe des Testdatensatzes auf das Ergebnis zu beobachten.

Abbildung 3.1 zeigt eine Beispielhafte Google Benchmark Ausgabe. Benchmark ist dabei der Name des Benchmarks und hinter dem Schrägstrich die Größe des Inputs. Time ist die durchschnittliche Dauer einer Ausführung des Hauptabschnitts über alle Iterationen hinweg. CPU ist die durchschnittliche CPU Zeit einer Ausführung des Hauptabschnitts über alle Iterationen hinweg. Iterations ist die Anzahl der durchgeführten Wiederholungen des Hauptabschnitts. Legt man keine Anzahl fest, wird die Anzahl der Wiederholungen

anhand der durchschnittlichen Dauer einer Iteration und der Varianz der Dauer über alle Iterationen hinweg festgelegt. (Vgl. Google 2024)

Benchmark	Time	CPU	Iterations
BM_RemoveDetachedNodes/2	4 us	4 us	189823
BM_RemoveDetachedNodes/8	9 us	9 us	78165
BM_RemoveDetachedNodes/64	58 us	58 us	12106
BM_RemoveDetachedNodes/512	469 us	468 us	1515
BM_RemoveDetachedNodes/4096	4237 us	4234 us	166
BM_RemoveDetachedNodes/8192	10026 us	10019 us	60

Abbildung 3.1.: Google Benchmark Ausgabe

Google Benchmark wird in der CE meistens genutzt, um das Verhalten der Laufzeit bestimmter Funktionen in künstlich generierten Testfällen zu vergleichen. Hierbei wird keine HANA Instanz benötigt, da keine Operationen auf einer Datenbank ausgeführt werden, sondern nur einzelne Funktionen aufgerufen werden. Es werden folglich auch keine Testdatensätze für die Datenbank benötigt, sondern nur Daten, auf welchen man die zu analysierende Funktion aufrufen kann.

Im Vergleich zu anderen Methoden der Performance Messung, die Operationen auf einer HANA-Instanz ausführen, ist ein Google Benchmark relativ einfach. Dies liegt daran, dass sie weniger Voraussetzungen erfordern und sich lediglich auf einen kleinen Teil der Logik konzentrieren.

3.2. HANA Profiler

Eine weitere Methode die Performance und das Verhalten von Software zu analysieren ist, das bereits in Abschnitt 2.3 beschriebene, Profiling.

In der CE wird hauptsächlich der „BOOSS-Profiler“, ein in HANA integrierter Profiler, verwendet. Auf diesen kann entweder manuell oder im Code zugegriffen werden. Dabei sind die wichtigsten Befehle `profiler clear` um die aktuellen Profilinginformationen zurückzusetzen, `profiler start` um den Profiler zu starten, `profiler stop` um den

Profiler zu stoppen und `profiler print` um die gesammelten Profilinginformationen auszugeben.

Der Profiler kann in diesem Kontext auf zwei verschiedene Arten genutzt werden. Entweder in dem zur Laufzeit des Profilers Anfragen an eine bestehende HANA-Instanz gestellt werden. Oder der Profiler wird innerhalb eines Tests oder Benchmarks aufgerufen und es werden die dort aufgerufen Funktionen gemessen.

Die Ausgabe erzeugt dabei ist dabei zwei gewichtete gerichtete azyklische Graphen, nach Abschnitt 2.4, von denen einer die Verteilung der CPU-Zeit und der andere die Verteilung der Wartezeit, der aufgerufenen Funktionen beinhaltet. Im Folgenden werden die beiden Graphen CPU-Graph und Warte-Graph genannt. Abbildung 3.2 stellt eine mögliche Ausgabe des HANA Profilers dar. Die folgende Beschreibung gilt für den CPU- als auch den Warte-Graphen. Jeder Knoten des Graphen spiegelt eine zur Laufzeit des Profilers aufgerufene Funktion wider. Jeder Knoten beinhaltet drei Informationen. Den Namen der aufgerufenen Funktion, sowie den Wert I und den Wert E . I ist der Anteil der Gesamtzeit, welcher von diesem Knoten und all seinen Subknoten benötigt wurde. E ist der Anteil der Gesamtzeit, welcher von diesem Knoten benötigt wurde. Folglich gilt für alle Knoten $I \geq E$. Die Kindknoten eines Knoten K sind die Funktionen, welche von K aufgerufen wurden.

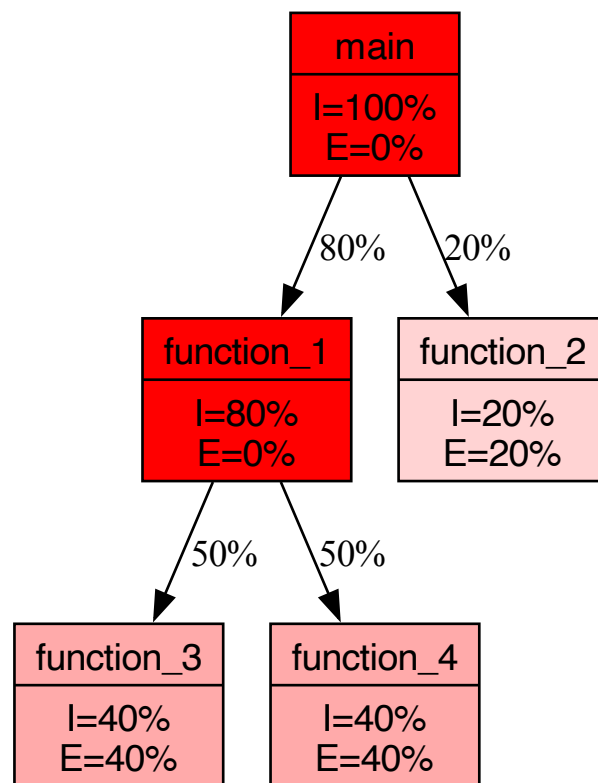


Abbildung 3.2.: Beispielausgabe des HANA Profilers

4. Konzept

Für die Untersuchung des Optimierungsalgorithmus wird ein experimenteller Ansatz statt einem analytischem gewählt, da die experimentelle Vorgehensweise es zum einen einfacher macht sehr komplexe Algorithmen zu untersuchen, zum anderen, eine experimentelle Untersuchung realitätsnähere Ergebnisse liefern kann (vgl. Bartz-Beielstein 2010, S.3). Hierzu werden in dieser Arbeit zwei unabhängige Variablen betrachtet. Zum einen die Größe und zum anderen der Aufbau des zu optimierenden Modells, diese wurden gewählt, da sie direkt kontrolliert werden können und erwartet wird, dass sie einen großen Einfluss auf die Laufzeit haben (vgl. McGeoch 2002, S.506). Der Aufbau wird in dieser Arbeit als Art des Modells bezeichnet. Die gemessene abhängige Variable ist die Laufzeit des Optimierungsvorgangs. Unabhängige Variablen sind Variablen, welche aktiv verändert werden, während abhängige Variablen gemessen werden (vgl. Brosius, Haas und Unkel 2022, S.236). Damit Messergebnisse sinnvoll verglichen werden können, dürfen sie sich nur in einem Parameter unterscheiden (vgl. Brosius, Haas und Unkel 2022, S.236). Deshalb werden mehrere Messreihen durchgeführt, wobei innerhalb einer Messreihe der Art konstant ist, die Größe jedoch variabel ist. Für jede Art wird eine neue Messreihe begonnen. Störvariablen, also Einflussfaktoren, welche ebenfalls die abhängigen Variablen beeinflussen, jedoch während der Messung unkontrolliert auftreten, ist z. B. die Prozessorauslastung des Rechners, auch welchem die Messung durchgeführt wird (vgl. Brosius, Haas und Unkel 2022, S.237). Ist der Prozessor weniger ausgelastet, dann ist die gemessene Zeit vermutlich geringer, als wenn der Prozessor stark ausgelastet ist.

Um den Einfluss der Störvariablen möglichst gering zu halten, wird jede Messung n mal wiederholt. Aus diesen Messwerten wird nun ein Konfidenzintervall gebildet, welches mit der Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ den tatsächlichen Erwartungswert μ enthält. Dazu werden die Messwerte als eine T-verteilte Zufallsvariable X betrachtet, da n aufgrund der Dauer einer Messung nicht sehr groß gewählt werden kann. Die Varianz σ^2 von X ist dabei unbekannt und muss anhand der Stichprobe geschätzt werden, für diese Schätzung gilt: $\hat{\sigma}^2 = S^2$ (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.528). Für das $(1 - \alpha)$ -Konfidenzintervall ergibt sich deshalb nach (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.533):

$$[\bar{X} - t_{n-1,1-\alpha/2}\sqrt{S^2/n}, \bar{X} + t_{n-1,1-\alpha/2}\sqrt{S^2/n}]$$

\bar{X} ist der Mittelwert der Stichprobe: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.59).

S^2 ist die korrigierte Stichprobenvarianz: $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$ (vgl. Stocker und Steinke 2017, S.507).

Für die verschiedenen Arten von Modellen, werden Modelle, von reellen Abfragen betrachtet, um aus diesen, allgemeine Regeln festzulegen, mit welchen man Modelle variabler Größe aber derselben Art erzeugen kann. Die Modelle werden für die Messung künstlich erzeugt, um die unabhängigen Variablen gezielt verändern zu können. Auf die reellen Abfragen wird dabei zurückgegriffen, um die Relevanz der Messung, für reelle Szenarien zu gewährleisten. (Vgl. McGeoch 2002, S.500f)

Interessante Fälle genauer Betrachten Profiling um exakte Ursache zu ermitteln.

Da sich die Arbeit auf die Optimierungsfunktion der CE beschränkt, kann sich auch bei den Messungen auf diese beschränkt werden. Um die Leistung einer bestimmten Funktion zu untersuchen, eignet sich, das in Abschnitt 2.3 beschriebenen, Benchmarking. Somit sind die Messungen präziser auf diese Funktion ausgerichtet und es wird Aufwand gespart, welcher auftreten würde, wenn man die Untersuchungen mit einer HANA-Installation durchführen würde. Um mehrere Ergebnisse eines Benchmarks mit verschiedenen Parametern sinnvoll miteinander vergleichen zu können, dürfen sich die Parameter, der Messungen nur in einem Wert unterscheiden. Bei der Analyse, wie sich verschiedene Modelle auf die Laufzeit der Optimierung von diesen auswirken, sind die Größe und der Aufbau des Modells als Parameter denkbar. Die Größe eines Modells könnte z. B. die Anzahl der Knoten in diesem sein. Diese ist sehr leicht festzulegen oder zu verändern. Der Aufbau, im folgenden auch Art des Modells genannt ist etwas komplizierter. In dieser Arbeit wird die Art eines Modells wie folgt definiert. Zwei Modelle sind von gleicher Art, wenn sie mit der gleichen Vorgehensweise erzeugt wurden. Abbildung 4.1 zeigt verschiedene Modelle. Von diesen könnten z. B. Abbildung 4.1a und Abbildung 4.1b von der gleichen Art sein, da diese erzeugt wurden, indem ein Aggregation-Knoten, n Projection-Knoten und ein Table-Knoten hintereinander gehängt werden. Um die Größe des Modells auch bei anderen Erzeugungsmethoden einfach festlegen zu können wird die Größe eines Modells abhängig von der Erzeugungsmethode definiert. Die Größe ist also nicht immer gleich der Anzahl

quelle

der Knoten in einem Modell. Bei Abbildung 4.1a und Abbildung 4.1b könnte die Größe z. B. die Anzahl der Projection-Knoten im Modell sein. Das Modell wird durch eine Funktion beschrieben, welche für einen Parameter n ein Modell der Größe n erzeugt. Um beide Parameter zu untersuchen, wird für beide Parameter eine Menge von Werten festgelegt. Anschließend wird das kartesische Produkt dieser beiden Mengen gebildet, um eine Menge von Parameterpaaren zu erhalten. Die Messung wird nun für jedes Paar dieser Menge ausgeführt. Google Benchmarks bieten eine Funktionalität sie mit mehreren Parametern auszuführen.

quelle

Der Benchmark kann also genutzt werden, um zu untersuchen, wie sich die Dauer der Optimierung von bestimmte Arten von Modellen mit verschiedenen Größen verhält. Beispielfhaft könnte man die Größen G und die Arten A festlegen.

$$G = \{2; 4; 8\} \quad A = \{j; p\}$$

$$K = G \times A = \{(2, j); (4, j); (8, j); (2, p); (4, p); (8, p)\}$$

Das kartesische Produkt K ist eine Menge von Tupeln (g, a) . Jedes Tupel spiegelt eine Kombination von Parametern wider, für welche der Benchmark ausgeführt wird. Für alle $(g, a) \in K$ wird das Modell der Art a und der Größe g optimiert und die Dauer dieser Optimierung gemessen.

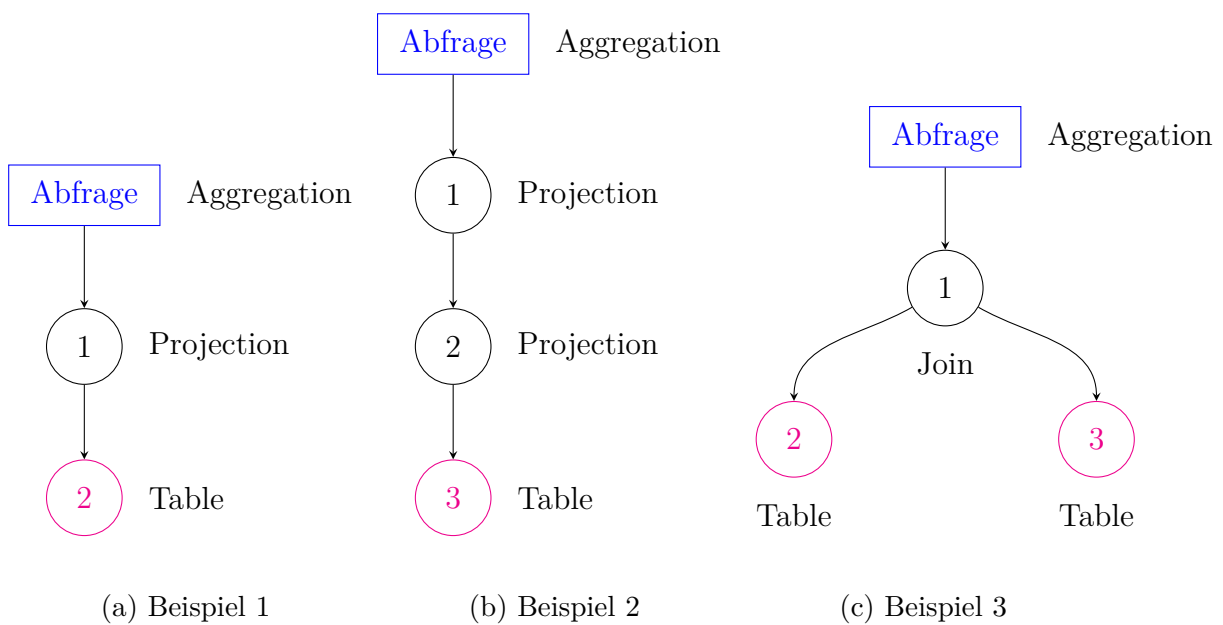


Abbildung 4.1.: Beispiel Modelle

5. Umsetzung

5.1. Implementation der neuen Methode

6. Verifikation

7. Fazit und Ausblick

A. Anhang

Hier ist der Anhang

Literaturverzeichnis

- Bartz-Beielstein, T., Hrsg. (2010). *Experimental methods for the analysis of optimization algorithms*. Berlin [Heidelberg]: Springer. ISBN: 978-3-642-02537-2.
- Brosius, H.-B./ A. Haas/ J. Unkel (2022). *Methoden der empirischen Kommunikationsforschung: eine Einführung*. 8., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer VS. ISBN: 978-3-658-34195-4 978-3-658-34194-7.
- Fisher, R. A. (1919). „XV. —The correlation between relatives on the supposition of mendelian inheritance.“ In: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 52.2, S. 399–433. DOI: 10.1017/S0080456800012163.
- Google (2024). *benchmark A microbenchmark support library*. URL: <https://google.github.io/benchmark/> (Einsichtnahme: 10.06.2024).
- Knebl, H. (2021). *Algorithmen und Datenstrukturen: Grundlagen und probabilistische Methoden für den Entwurf und die Analyse*. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-32714-9 978-3-658-32713-2.
- McGeoch, C. C. (2002). „Experimental Analysis of Algorithms“. In: *Handbook of Global Optimization: Volume 2*. Hrsg. von Pardalos, P. M./ Romeijn, H. E. Boston, MA: Springer US, S. 489–513. ISBN: 978-1-4757-5362-2. DOI: 10.1007/978-1-4757-5362-2_14.
- Pearson, K. (1894). „III. Contributions to the mathematical theory of evolution“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. (A.)* 185, S. 71–110. DOI: 10.1098/rsta.1894.0003.
- SAP (2024). *SAP HANA Cloud, SAP HANA Database Modeling Guide for SAP Web IDE Full-Stack*. URL: <https://help.sap.com/docs/hana-cloud-database/sap-hana-cloud-sap-hana-database-modeling-guide-for-sap-web-ide-full-stack/creating-graphical-calculation-view> (Einsichtnahme: 09.07.2024).
- Stocker, T. C./ I. Steinke (2017). *Statistik: Grundlagen und Methodik*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg. ISBN: 978-3-110-35388-4.