

Konzept und prototypische Implementierung eines föderativen Complex Event Processing Systems mit Operatorverteilung

Marcus Pinnecke

Fachbereich Mathematik und Informatik
Philipps Universität Marburg*

Abstract: Complex Event Processing (CEP) ist eine etablierte Technologie zur Verarbeitung von Ereignisströmen in nahezu Echtzeit. Trotz alledem unterscheiden bestehende CEP-Systeme sich stark in ihren jeweiligen Leistungsumfängen und -profilen. Werden verschiedene CEP-Systeme in einem föderativen System kombiniert, so kann das resultierende System im Vergleich zu den Einzelsystemen eine höhere Datendurchsatzrate und einen breiteren Leistungsumfang erreichen. Fehlende Standardisierung und inkompatible Schnittstellen der CEP-Systeme behindern diesen Ansatz jedoch. Dieser Missstand wird durch die Middleware Java Event Processing Connectivity (JEPC) behoben. Gegenstand dieser Arbeit ist das auf JEPC basierendes föderatives CEP-System so zu erweitern, dass eine Verteilung von Anfrageoperatoren auf die beteiligten Systeme automatisch durchgeführt wird. Hierfür wird in dieser Arbeit das zugrundeliegende Konzept, eine Anfrageoptimierung sowie ein Kostenmodell für die Auswahl eines konkreten Systems vorgestellt. In einer Evaluation wird gezeigt, dass durch den Einsatz einer Föderation die Datendurchsatzrate deutlich steigt, insbesondere wenn es sich um eine heterogene Föderation mit unterschiedlichen Leistungsprofilen handelt.

1 Einleitung und Motivation

Complex Event Processing (CEP) ermöglicht kontinuierliche Analysen, Prognosen und Reaktionen basierend auf Veränderungen in Ereignisströmen [Luc01]. Währenddessen klassische Datenbanksysteme auf einer persistenten Datenbasis arbeiten, werden in CEP-Systemen *kontinuierliche Anfragen* auf einen Strom von Ereignissen ausgeführt, die als Ergebnis wieder einen Ereignisstrom liefern [BW01]. Beim Leistungsumfang und Datendurchsatz unterscheiden sich CEP-Systeme verschiedener Hersteller erheblich voneinander.

Um eine geringe Latenz oder einen hohen Durchsatz zu einer vorgegebenen Latenz zu erreichen, könnte ein Mix aus Systemen in Form einer Föderation in Betracht gezogen werden. Ein Ansatz ist föderative Datenbanksysteme auf das CEP-Szenario anzupassen. Hierzu wird das föderative Datenbanksystem um kontinuierliche Anfragen erweitert [ea09]. Ein anderer Ansatz ist eine reine Föderation aus CEP-Systemen anzubieten. Dieser Ansatz

*Seit WS 2014/2015 für Informatik M.Sc. Studium: Fakultät für Informatik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. E-Mail: marcus.pinnecke@ovgu.de

ist Grundlage dieser Arbeit und ermöglicht eine wesentlich feinere Verteilung von kontinuierlichen Anfragen, indem diese operatorweise auf beteiligte Systeme (den *Pool*) verteilt werden. Hierdurch wird eine kollaborative Verarbeitung der Anfrage im Pool möglich. Die Zusammenstellung des Pools nimmt maßgeblich Einfluss auf das Leistungsprofil des föderativen Systems. Besteht der Pool aus einer Menge von Systemen des gleichen Herstellers (*homogene* Föderation), gibt es zwar keine Schnittstellenprobleme zwischen den Systemen, aber das föderative System ist auf den Leistungsumfang des gewählten Systems beschränkt. Werden Systeme unterschiedlicher Hersteller (*heterogene* Föderation) genutzt, so kann der Leistungsumfang im Vergleich zu einer homogenen Föderation gesteigert werden. Möglich wird dies durch die Kompensation fehlender Funktionalität eines Systems durch ein anderes System. Weiterhin kann für eine Operation ein Spezialist aus dem Pool gewählt werden, der diese besonders effizient bearbeiten kann (*Leistungsprofil*). Um neben einem hohen Datendurchsatz zusätzlich einen großen Leistungsumfang für die Föderation zu erreichen, muss ein heterogener Pool genutzt werden.

Die Heterogenität des Pools führt sofort zu einem Kommunikationsproblem der Systeme untereinander, da es keine durchgehend implementierten Standards für Systeme unterschiedlicher Hersteller gibt (vgl. [JMS⁺08]).

Die Middleware *Java Event Processing Connectivity* (JEPC) begegnet dieser Herausforderung durch die Einführung einer von den herstellerspezifischen Details abstrahierten Beschreibungssprache für Ereignisströmen und Anfragen. Anweisungen in dieser Sprache werden durch JEPC vollautomatisch in die jeweilige Systemsprache übersetzt. Werden Anwendungssysteme (AWP) gegen die Schnittstelle von JEPC entwickelt, so kann das zugrundeliegende CEP-System mühelos durch ein anderes ersetzt werden [HGMR13].

Motiviert durch den resultierenden Nutzen oder oben genannten Ideen, ist der Ansatz dieser Arbeit die Weiterentwicklung des auf JEPC basierenden föderativen CEP-Systems, so dass dieses automatisch auf einen heterogenen Pool zurückgreifen kann. Ein AWP interagiert über die Schnittstelle von JEPC mit diesem föderativen System, wobei die konkrete Verarbeitung an den Pool delegiert wird. Diese Aufgabenübertragung erfolgt durch eine Verteilung der Anfrageoperatoren auf die Systeme innerhalb des Pools und führt zu einer Arbeitsteilung, indem eine Anfrage kollaborativ durch verschiedene Systeme prozessiert werden kann. Bei der Verteilung der Operatoren werden die Leistungsprofile der jeweiligen Systeme berücksichtigt, so dass dies zu einer Beschleunigung der Anfrageverarbeitung insgesamt führt. Ein geeignetes Kostenmodell für die konkrete Auswahl eines Systems führt weiterhin zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung zwischen den Systemen, so dass vorhandene Ressourcen effizienter genutzt werden können.

Im Folgenden wird ein Überblick der Architektur des föderativen CEP-Systems im Abschnitt 2 vorgestellt. Dieser Überblick stellt die Aufgaben des Pools, des föderativen Systems und der AWP zueinander in Beziehung. Die Berücksichtigung der Leistungsprofile bei der Verteilung eines Operators auf ein System basiert auf einem heuristischen Regelwerk, das in Abschnitt 3 ausführlicher beschrieben wird. Eine Evaluation des Systems findet darauffolgend im Abschnitt 4 statt. Hier wird das föderative System einmal mit einem homogenen und einmal mit einem heterogenen Pool in zwei Szenarien untersucht. Nach der Betrachtung verwandter Arbeiten im Abschnitt 5, bildet der Abschnitt 6 den Abschluss. In diesem wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf die zukünftige

Ausrichtung des Projekts gegeben.

2 Architektur

Die Architektur des föderierten CEP-Systems lässt sich schematisch wie folgt einteilen. Auf der einen Seite befinden sich AWP, die beliebige kontinuierliche Anfragen an das föderative System stellen. Hierbei kommunizieren die AWP mit den durch JEPC bereitgestellten Schnittstellen des föderierten Systems. Auf der anderen Seite ist ein Pool bestehend aus verschiedenen Event-Service-Providern (ESP)¹, die ebenfalls durch JEPC an das föderierte System angebunden sind. Im Rahmen des Prototyps wurden folgende ESP von JEPC verwendet:

- N** die Implementierung von CEP-Funktionalität direkt in JEPC,
- E** ein Adapter für das CEP-System *Esper*,
- C** ein Adapter zu einem kommerziellen CEP-System und
- D** eine Emulation von CEP-Funktionalität in Datenbanken über JDBC.

Notation: Dem besseren Lesefluss bedingt, wird ein föderiertes System bestehend aus den Systemen *A* und *B* im Folgenden durch *AB* abgekürzt. So beschreibt zum Beispiel *NECD* eine Föderation aus allen vier oben genannten ESP und *EE* eine Föderation aus zwei Esper ESP.

2.1 Zentrale Komponenten

Zwischen den AWP und dem Pool befindet sich das föderierte System, das die drei folgenden Komponenten umfasst:

Anfragegraph. Der globale Anfragegraph enthält alle durch die AWP an die Föderation gestellten Anfragen. Er ist für den Transfer der Daten zwischen den beteiligten Systemen untereinander, zur Föderation und zu den AWP zuständig. Dieser Graph umfasst Metainformationen über die Verteilung, um eine günstige Weiterleitung der Ergebnisse zwischen den Systemen zu organisieren. Teilanfragen, die innerhalb des zugewiesenen Systems verarbeitet werden können, werden autonom und unabhängig innerhalb des ESP prozessiert (Autonomie-Maximierung). Die kontinuierlichen Ergebnisse der ESP werden durch das föderative System abgefangen und an die AWP sowie abonnierenden ESP weitergeleitet. Die Wahl der Graphenstruktur als Basis für eine Föderation ist maßgeblich durch das Ereignisstromparadigma geprägt, das Anfragen als loses gekoppeltes Netz von Operatoren beschreibt. Die Übernahme dieser Struktur ermöglicht eine feingranulare Aufteilung einer Anfrage, indem die Operatoren der Anfrage verteilt werden.

Klassifikationsverfahren. Das Klassifikationsverfahren schlägt für jeden Operatortypen (Filter, Aggregator, Korrelator, Join und Mustererkennung) eine Menge von homogenen Systemen innerhalb des Pools vor (*Zielmenge*), deren Wahl günstig für den gegebenen Operator ist. Die Wahl eines konkreten Systems aus der Zielmenge wird allerdings durch die *Systemzuweisung* ausgeführt und berücksichtigt weitere Kriterien, wie z.B. die aktuelle Auslastung der Systeme innerhalb der Zielmenge. Der vom Klassifikationsverfahren gegebene Vorschlag berücksichtigt sowohl das Leistungsprofil als auch den Leistungsumfang

¹Ein konkretes CEP-System oder eine Emulation innerhalb einer Datenbank [HGMR13]

und versucht beides zu optimieren. Im Rahmen des Prototyps ist das Klassifikationsverfahren durch einen Entscheidungsbaum umgesetzt, welcher basierend auf einer Heuristik schnell gute Platzierungen ermittelt und eine sinnvolle initiale Verteilung der Operatoren durchführt.

Systemzuweisung. Nachdem für jeden Operator einer Anfrage eine Zielmenge bestimmt ist, wird jeder Operator einzeln auf ein konkretes System (*Zielsystem*) seiner Zielmenge bereitgestellt. Die Wahl des Zielsystems wird durch ein Kostenmodell bestimmt, das die momentane Systemauslastung aller Systeme innerhalb der Zielmenge berücksichtigt und eine möglichst gleichmäßige Lastverteilung innerhalb der Zielmenge anstrebt.

2.2 Verwalten von kontinuierlichen Anfragen

Aus der Perspektive eines AWP verhält sich das föderierte System wie jedes andere System, das der Spezifikation von JEPC entspricht. Währenddessen JEPC eine Anfrage direkt in die herstellereispezifische Sprache übersetzen würde, werden innerhalb des föderierten Systems folgende Schritte durchgeführt: (1) Die Anfrage wird in den globalen Anfragegraphen übernommen, (2) im Anschluss wird für jeden noch nicht zugewiesenen Operator durch die Klassifikation ein prädestiniertes System gewählt, (3) jeder Operator wird anhand der Systemzuweisung in Abhängigkeit des Kostenmodells auf ein konkretes System im Pool übertragen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei diesem Vorgang werden die betroffene ESP im Pool über ihre JEPC Schnittstelle angesprochen, so dass diese Übertragung zu einer Übersetzung der (Teil-)Anfrage in die herstellereispezifische Sprache führt. Aus Sicht eines ESP ist die ihm übertragene (Teil-)Anfrage eine vollständige kontinuierliche Anfrage, die wie gewohnt verarbeitet werden kann. Für einen Übergang

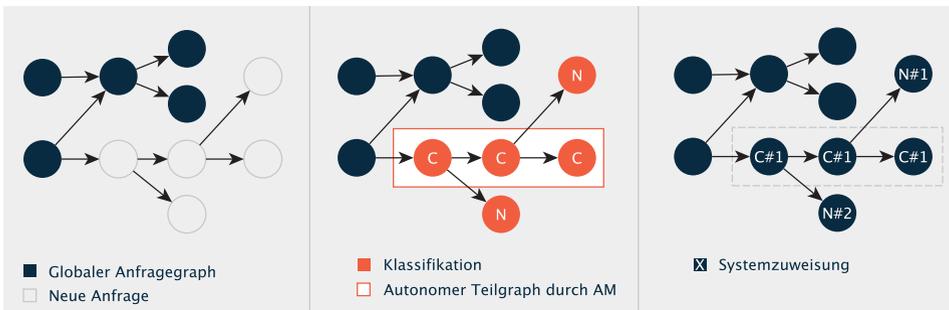


Abbildung 1: Dem globalen Anfragegraphen wird eine neue Anfrage hinzugefügt. Jeder Operator wird klassifiziert und anschließend auf ein Zielsystem übertragen. In der Abbildung werden zwei Operatoren für dieselbe Zielmenge N an zwei unterschiedliche Zielsysteme $N\#1$ und $N\#2$ delegiert. In der mittleren Abbildung ist die Autonomie-Maximierung (AM) dargestellt, die einen Teilgraphen komplett überträgt, so dass für alle Operatoren dieses Teilgraphen das Zielsystem $C\#1$ der Zielmenge C identisch ist.

von einem System zu einem anderen System fängt das föderative System die Ausgaben vom ersten System ab und leitet diese an das zweite System weiter (*Inter-System-Kommunikation*). Bei einer naiven Verteilung der Operatoren kann es zu einer unnötigen Kommunikation zwischen der Föderation und den Pool kommen. Damit dies verhindert

wird, wird die Autonomie-Maximierung durchgeführt.

Autonomie-Maximierung (AM). Ohne weitere Optimierung werden die Ergebnisse *jedes* Operators durch das föderierte System abgefangen und weitergeleitet, da jeder Operator einzeln auf einem Zielsystem bereitgestellt wird. Dies tritt auch dann ein, wenn Teilanfragen durch dasselbe Zielsystem prozessiert werden und keine Kommunikation mit dem föderierten System für die Verarbeitung dieser Teilanfrage nötig ist. Diese Indirektion ist Folge des einheitlichen Aufbaus der Inter-System-Kommunikation und führt in Grenzfällen zu einem vermeidbaren Kommunikationsaufwand. Die AM ist eine optionale Optimierungsstrategie, die möglichst große Teilanfragen einer kontinuierlichen Anfrage *gemeinsam* für ein Zielsystem vorsieht, anstelle dies *operatorweise* zu tun, um Kommunikationskosten zwischen dem Pool und dem föderierten System einzusparen. Standardmäßig ist dieses Verfahren aktiviert.

AM-Kriterium: Die AM kann auf jeder Teilanfrage einer kontinuierlichen Anfrage, deren Operatoren (1) direkt miteinander verbunden und (2) nach der Anwendung der Klassifikation für dieselbe Zielmenge vorgesehen sind, ausgeführt werden.

In Folge der AM können ESP möglichst große Teilanfragen selbständig bearbeiten, so dass der Aufwand für die Kommunikation mit dem föderierten System eingespart werden kann. Diese Herangehensweise zeigt positive Effekte in Bezug auf die Datendurchsatzrate in heterogenen Föderationen, wie in der Evaluation in Abschnitt 4 zu sehen ist. Die hierfür nötigen Informationen werden im globalen Anfragegraphen hinterlegt.

Ein unerwünschter Nebeneffekt ist die Einschränkung der kollaborativen Verarbeitung von Anfragen. Hierzu soll folgendes Beispiel betrachtet werden: Nach Anwendung der AM auf eine beliebige Anfrage Q an eine homogene Föderation A_1A_2 wird Q komplett an A_1 delegiert ohne A_2 zu berücksichtigen, da *ganz* Q das AM-Kriterium erfüllt und somit vollständig an ein einzelnes Zielsystem übergeben wird - obwohl eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit durch eine bessere Lastverteilung zwischen A_1 und A_2 im Fall einer gemeinsamen Verarbeitung von Q möglich sein könnte. Welchen Einfluss dieser Nebeneffekt hat und ab welchem Verhältnis zwischen kollaborativer Abarbeitung und Autonomie innerhalb einer homogenen Systemmenge die AM automatisch deaktiviert werden sollte, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch offen.

Zuweisung zu einer Systeminstanz. Da einzelne Ereignisströme unterschiedlich stark frequentiert und Operatoren unterschiedlich rechenintensiv sind, kann es zu einer Schiefelage der Auslastung in der Zielmenge für einen Operator kommen. Um dies zu vermeiden wird eine gute Balance der Systeme durch folgendes Kostenmodell angestrebt: Zunächst wird die momentane Auslastung jedes Systems als Kriterium herangezogen. Findet sich ein eindeutiges kleinstes Element, so ist ein System mit größtmöglicher freier Kapazität gefunden. Das Verfahren wählt dieses System und ist beendet. Sollte jedoch kein eindeutiger Kandidat existieren, so wird aus der Menge der Kandidaten jenes gewählt, das in vorangegangenen Systemzuweisungen am wenigsten berücksichtigt wurde. Sollte dies eindeutig sein, kann ein System gewählt werden und das Verfahren ist beendet. Wurde das Verfahren nicht beendet, so wird zufällig eine Instanz aus der Kandidatenmenge gewählt und beendet.

3 Ermitteln der Zielmenge pro Operator

Eine optimale Verteilung minimiert die Kommunikationskosten und maximiert den Datendurchsatz über alle Systeme. Dies durch Berechnung zu ermitteln, kann jedoch nicht erwartet werden, da es sich um ein komplexes kombinatorisches Problem handelt. Der für diese Arbeit gewählte Ansatz ist eine Heuristik, die eine gute Startplatzierung der Operatoren ermittelt. In einer zukünftigen Entwicklung könnte diese Platzierung durch *dynamische Planmigration* weiter verbessert werden [ZRH04]. Das Verfahren zur Startplatzierung eines Operators ist durch den in Abbildung 2 dargestellten Entscheidungsbaum beschrieben. Dieser Entscheidungsbaum bestimmt für einen Operatortypen eine günstige

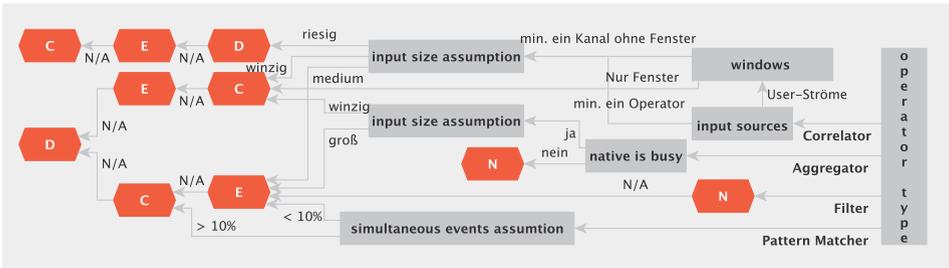


Abbildung 2: Vollständiges Regelwerk zur Bestimmung eines Systems. Eine Kante stellt eine geforderte Merkmalausprägung für die Testfunktion dar. Erfüllt eine Ausprägung dieses Kriterium, wird mit der nächsten Testfunktion fortgefahren. Durch rekursive Anwendung wird eine Zielmenge ermittelt.

Zielmenge, indem eine Reihe von Merkmalausprägungen geprüft werden. Soll beispielsweise ein Filter-Operator platziert werden, so wird zunächst die Implementierung von CEP-Funktionalität direkt in JEPC (N) vorgeschlagen. Sollte dieser ESP nicht im Pool vorhanden oder ausgelastet sein, wird die bestmögliche Alternative gewählt (Esper, kommerzielle ESP oder als letztes JDBC). Neben dem Operatortypen müssen Annahmen zur Statusgröße² des Operators *Aggregator* und des *Joins* sowie eine Einschätzung zur relativen Anzahl gleichzeitig eintretender Ereignisse³ gegeben werden. Diese Informationen werden in Abhängigkeit des zu klassifizierenden Operators genutzt, um im Entscheidungsbaum eine geeignete Verzweigung zu wählen.

Die Güte des Entscheidungsbaums wird durch seine Regeln bestimmt. Um gute Regeln zu finden, wurden Benchmarks zu den verfügbaren ESP in JEPC durchgeführt. Durch diese Benchmarks wurden die durchschnittlichen Durchsatzraten der ESP in unterschiedlichen Szenarien je Operatortyp ermittelt. Diese Szenarien untersuchten den Einfluss von Parametern, wie dem Selektivitätsgrad des Filters, der Komplexität von Join-Bedingungen oder dem Umfang der Nutzlast. Im Anschluss wurden die Leistungsprofile anhand markanter Eigenschaften isoliert.

²Die Statusgröße bezieht sich auf die Anzahl vorgehaltenen Tupel für statusbehaftete Operatoren.

³Dies betrifft Ereignisse mit gleichen Zeitstempel.

4 Experimente

In diesem Abschnitt wird untersucht, welches Potential ein föderiertes CEP-System mit einem heterogenen gegenüber einem homogenen Pool besitzt und welchen Einfluss die AM auf heterogene Föderationen nimmt. Hierbei wird der Durchsatz (Tupel pro Sekunde) der jeweiligen Föderationen ermittelt und gegenübergestellt. Dabei wächst mit laufenden n die Anfragekomplexität (Anzahl der Operatoren).

Setup. Die Experimente wurden jeweils mit 2 Millionen Tupeln zu je 28 Byte auf einem virtualisierten Server mit 8 Intel^R CoreTM2 Duo-CPU T7700@2.40GHz mit 32 GB RAM durchgeführt, wobei die CPUs exklusiv für die VM reserviert waren. Da die Berechnungen auf den CPUs ausgeführt wurden, die keiner anderen VM zur Verfügung standen, ist eine Verzerrung durch die Virtualisierung nicht zu befürchten. Das Betriebssystem war Ubuntu 14.04 LTS. Jeder Durchlauf $1, \dots, n$ wurde pro Föderation in einem separaten Prozess ausgeführt. Die Gesamtausführung erfolgte sequentiell.

Zunächst wurde der Durchsatz eines einzelnen ESP gegenüber einer Föderation bestehend aus nur diesem einzelnen ESP ermittelt. Wie zu erwarten war, rentiert sich der Aufwand für die zusätzliche Föderationsschicht nicht, wenn der Pool nur aus einem einzelnen System besteht, obwohl die Leistungseinbuße gleichfalls vernachlässigt werden kann. Demgegenüber zeigte ein Vergleich zwischen einem einzelnen ESP und einer heterogenen Föderation, dass die Föderation in den meisten Fällen deutlich höhere Durchsatzraten erzielt und in keinem der untersuchten Fälle signifikant schlechter war als das einzelne System. Motiviert hierdurch, wurde nun der Einfluss der AM für homogene und heterogene Föderationen untersucht.

4.1 Größtmögliche Autonomie-Maximierung

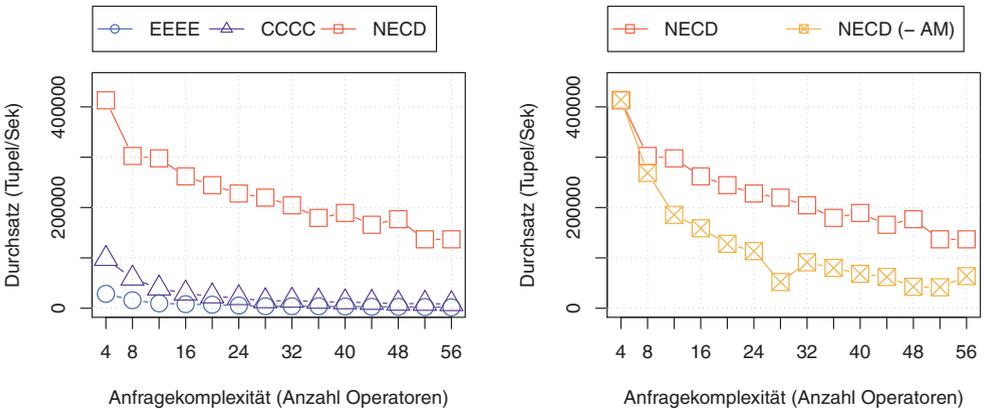


Abbildung 3: Durchsatzraten in Abhängigkeit der Anfragekomplexität (Anfrage q_1)

Eine optimale Anfrage für die AM wird durch die erste Anfrage q_1 erreicht. Diese Anfrage umfasst eine Reihenschaltung von Operatorgruppen. Jede dieser Gruppen ist so organisiert, dass sie nur Operatoren vom gleichen Typ umfasst. Für jeden Operatortyp gibt

es genau eine Gruppe. Hierdurch sind Operatoren gleichen Typs unmittelbar verbunden und können als Ganzes an das bestmögliche System übertragen werden. Es bestehen keine Abhängigkeiten der Gruppen untereinander, außer beim ersten bzw. letzten Operator jeder Gruppe.

Ergebnisse. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt und zeigen einerseits einen deutlich erhöhten Datendurchsatz der heterogenen Föderation (NECD) gegenüber den homogenen Föderationen (EEEE bzw. CCCC). Dies wird durch die nahezu optimale Platzierung der Operatoren auf den jeweils am besten geeigneten Systemen möglich. Gemäß dem Entscheidungsbaum (Abbildung 2) und der AM wird jede Operatortyp-Gruppe auf genau ein System der Föderation abgebildet. Da einer homogenen Föderation nur gleichartige Systeme zur Verfügung stehen, können keine Spezialisten für einen bestimmten Operatoren gewählt werden, währenddessen dies in einer heterogenen Föderation möglich ist. Letzteres erklärt die erhöhte Leistung der heterogenen Föderation. Aufgrund der Reihenschaltung der Operatortypen und der Definition der AM bleibt die Anzahl potentiell autonomer Einheiten trotz wachsendem n konstant. Es wird deutlich, dass die AM eine Leistungssteigerung bringt.

4.2 Kleinstmögliche Autonomie-Maximierung

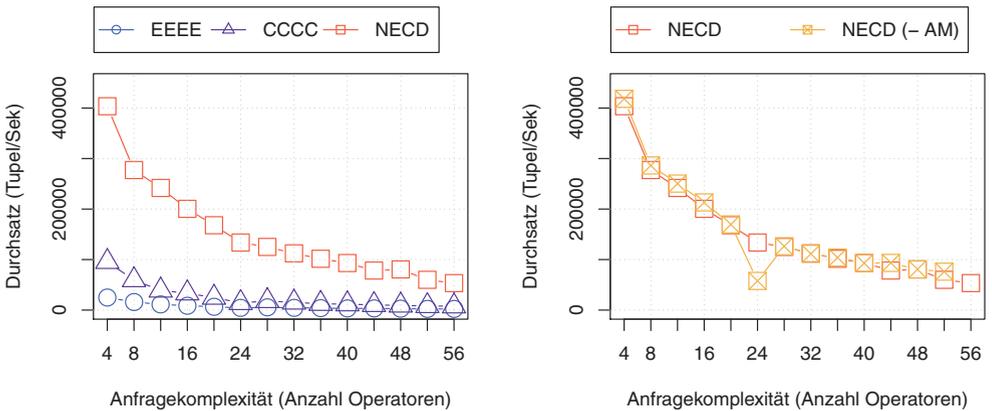


Abbildung 4: Durchsatzraten in Abhängigkeit der Anfragekomplexität (Anfrage q_2)

Eine möglichst ungünstige Struktur für die AM wird in q_2 erreicht, indem keine zwei Operatoren gleichen Typs miteinander verbunden sind. Somit ist q_2 das Gegenstück zu q_1 . Die Anfrage q_2 muss *operatorweise* auf den ESP-Pool verteilt werden. Damit kann die AM keine Teilgraphen finden, die autonom an die ESP delegiert werden können.

Ergebnisse. Wie in q_1 wird der Vorteil der heterogenen Föderation deutlich. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. In diesem Szenario können die Operatoren von q_2 nur einzeln an die jeweiligen ESP übergeben werden. Hierdurch steigt der Interaktionsaufwand mit der Föderation im Vergleich zu q_1 . Produziert ein Operator ein Ergebnis, muss dieses durch den Föderationsdienst abgefangen und an den nachfolgenden Operator weitergeleitet werden. Da direkt verbundene Operatoren auf unterschiedlichen Systemen

ausgeführt werden, ist diese Indirektion nötig. Dies ist eine Konsequenz aus der Struktur von q_2 und dem Ablauf der AM. Indem zwei verbundene Operatoren nicht vom gleichen Typ sind, wird jeder Operator zwangsläufig auf ein anderes System gegeben. Für direkt verbundene Operatoren bedeutet dies zwangsweise eine erhöhte Kommunikation. Dies zeigt sich in der stärker abfallenden Leistungskurve aller Systeme. Dass die AM in diesem Szenario keine zusätzlichen Vorteile bringen kann, ist den Ergebnissen ebenfalls zu entnehmen. Mit Ausnahme eines Ausreißers unterscheiden sich die Durchsatzraten der heterogenen Föderation, mit und ohne AM nicht signifikant voneinander.

5 Verwandte Arbeiten

Indem die Schnittstellenkonflikte zwischen ESP durch Einsatz von JEPC überwunden werden können, ist die Umsetzung einer Föderation heterogener ESP ein konsequenter Schritt. Ein Vorteil föderativer Systeme ist der Lastausgleich zwischen den beteiligten Systemen und der Leistungszugewinn durch eine Anfrageoptimierung. Wie im Abschnitt 4 gezeigt wurde, trifft dies ebenfalls für eine Föderation aus ESP zu. Eine gemeinsame Herausforderung von föderativen Informationssystemen ist die Integration heterogener Systeme. Ein wesentlicher Unterschied ist der Ansatz der Föderation. Währenddessen in föderativen Datenbanksystemen ein operatorbasierender Ansatz selten vorkommt [Con97], ist dies die erste Wahl für eine ereignisstromgetriebene Verarbeitung. Der operatorbasierende Ansatz ist eine Konsequenz aus der zugrundeliegenden theoretischen Basis von JEPC (vgl. [Krä07]) und dem Ereignisstromparadigma. Indem Operatoren einer Anfrage gemäß den Leistungsprofilen der ESP verteilt verarbeitet werden, wird die Verarbeitungsgeschwindigkeit für diese Anfrage insgesamt deutlich erhöht.

Der vorgestellte Föderationsdienst fokussiert sich auf die Integration von heterogenen ESP ohne hierbei auf vorhandene föderative Datenbanksysteme zurückzugreifen. Wie sich ESP in vorhandene Datenbankföderationen einbinden lassen, wird in [ea09] näher untersucht. Der Vorteil dieses Ansatzes ist klar: Ist einmal die Brücke zwischen der Datenstrom- und Datenbankwelt geschlagen, so profitiert ein föderatives Datenbank-/Datenstromssystem automatisch von den Ergebnissen jahrelanger Entwicklung und Forschung. Um konsistent mit dem Datenbankparadigma zu sein, werden kontinuierliche Anfragen als Ganzes an die beteiligten ESP weitergegeben. Hierdurch kann allerdings keine feingranulare Aufteilung der Anfrage unternommen werden und folglich wird nicht das gesamte Optimierungspotential ausgenutzt. Das föderative System dieser Arbeit setzt genau hier an. Indem Anfragen operatorweise verteilt werden, kann ein möglichst gute Anfrageoptimierung erreicht werden.

6 Zusammenfassung und zukünftige Arbeit

Für zeitkritische Anwendungen hat sich Ereignisstromverarbeitung längst etabliert. Fehlende Standards erschweren die Kompatibilität von CEP-Systemen untereinander. Dem kann durch Einsatz eines Adapters wie JEPC entgegengetreten werden. Dieser Ansatz ermöglicht ein operatorbasierendes föderatives CEP-System, das in dieser Arbeit konzeptionell besprochen und evaluiert wurde. Das Design dieses Systems erlaubt anstelle des standardmäßigen Entscheidungsbaums auch benutzerdefinierte Verfahren. Damit ist die

Verteilung adaptier- und austauschbar. Um die Kommunikation zwischen dem föderativen Systems und den beteiligten ESP zu verbessern, wird eine Autonomie-Maximierung durchgeführt, in deren Folge möglichst große Teilanfragen direkt durch den einzelnen ESP unabhängig bearbeitet werden können. Die Evaluation zeigt, dass heterogene Föderationen gegenüber homogenen Föderationen höhere Durchsatzraten erzielen. In Abhängigkeit der Anfragestruktur kann die Autonomie-Maximierung zusätzliche Leistungsvorteile bringen.

Da der Fokus der aktuellen Arbeit auf einer prototypischen Entwicklung lag, berücksichtigt diese Architektur momentan keine Ausnahmebehandlungen im Fall eines Ausfalls beteiligter Komponenten. Dies kann jedoch in zukünftigen Versionen durch Techniken wie Checkpoints oder redundanter Datenhaltung, sowie einem Adhoc-Master nachgeholt werden.

Das vorgestellte Klassifikationsverfahren findet eine gute Startplatzierung der Operatoren, aber berücksichtigt laufende Änderungen nicht. Zur Laufzeit können allerdings weitere Verbesserungen im Rahmen einer dynamischen Planmigration unternommen werden. Die hierzu nötigen Konzepte und Techniken im Rahmen einer Föderation sind weitere spannende Forschungsfragen.

Literatur

- [BW01] Shivnath Babu und Jennifer Widom. Continuous Queries over Data Streams. *SIGMOD Rec.*, 30(3):109–120, September 2001.
- [Con97] Stefan Conrad. *Föderierte Datenbanksysteme: Konzepte der Datenintegration*, Jgg. 1 of 3-540-63176-3. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, September 1997.
- [ea09] Irina Botan et al. Design and Implementation of the MaxStream Federated Stream Processing Architecture. Technical Report TR-632, ETH Zurich Department of Computer Science, June 2009.
- [HGMR13] Bastian Hoßbach, Nikolaus Glombiewski, Andreas Morgen und Bernhard Ritter, Franz und Seeger. JEPC: The Java Event Processing Connectivity. *Datenbank-Spektrum*, 13(3):167–178, 2013.
- [JMS⁺08] Namit Jain, Shailendra Mishra, Anand Srinivasan, Johannes Gehrke, Jennifer Widom, Hari Balakrishnan, Uğur Çetintemel, Mitch Cherniack, Richard Tibbetts und Stan Zdonik. Towards a Streaming SQL Standard. *Proc. VLDB Endow.*, 1(2):1379–1390, August 2008.
- [Krä07] Jürgen Krämer. *Continuous Queries over Data Streams - Semantics and Implementation*. Dissertation, Fachbereich Mathematik und Informatik, Philipps-Universität Marburg, 2007.
- [Luc01] David C. Luckham. *The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise Systems*. 0201727897. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2001.
- [ZRH04] Yali Zhu, Elke A. Rundensteiner und George T. Heineman. Dynamic Plan Migration for Continuous Queries over Data Streams. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, SIGMOD '04, Seiten 431–442, New York, NY, USA, 2004. ACM.