Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Institut für Informatik
Fachgebiet Praktische Informatik/Softwaresystemtechnik

Masterarbeit

Integrationstesten von GraphQL mittels Prime-Path Überdeckung

Integration testing of GraphQL using Prime-Path Coverage

Tom Lorenz
MatrikelNr.: 3711679
Studiengang: Informatik M.Sc

Datum der Themenausgabe: 16.05.2023
Datum der Abgabe: (hier einfügen)

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Leen Lambers
Gutachter: M.Sc Lucas Sakizloglou

Eidesstattliche Erklärung

Der Verfasser erklärt, dass er die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt hat. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Wörtlich und inhaltlich verwendete Quellen wurden entsprechend den anerkannten Regeln wissenschaftlichen Arbeitens zitiert. Die Arbeit ist nicht in gleicher oder vergleichbarer Form (auch nicht auszugsweise) im Rahmen einer anderen Prüfung bei einer anderen Hochschule vorgelegt oder publiziert worden. Der Verfasser erklärt sich zudem damit einverstanden, dass die Arbeit mit Hilfe eines Plagiatserkennungsdienstes auf enthaltene Plagiate überprüft wird.

.....	.....
Ort, Datum	Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1 Abstract

Im Zuge der digitalen Transformation nimmt die Anzahl von Softwareanwendungen rasant zu und insbesondere durch das Internet of Things und die generelle fortschreitende Vernetzung diverser Geräte nimmt in diesem Maße auch die Netzwerklast zu. Bisheriger Standard für Kommunikation von Geräten über das Internet waren REST-APIs diese haben jedoch gewisse Limitierungen wie zum Beispiel: Ineffizienz durch Overfechting/Underfetching, Anzahl an Requests, Versionierung und Komplexität uvm. Mit der Veröffentlichung von GraphQL in 2015 wurde ein Konkurrent zu REST in das Leben gerufen der diese Probleme beheben kann. Durch GraphQL lässt sich insbesondere die Netzwerklast reduzieren da eine GraphQL-Request, im Gegensatz zu REST, mehrere Anfragen in einer einzigen HTTP-Request zusammenfassen kann und dabei auch nur die wirklich gewünschten Daten überträgt. Dadurch, dass jedoch die wachsende Anzahl von Softwareanwendungen auch in immer kritischere Bereiche des Lebens vordringt, ist es enorm wichtig die Qualität der Software sicherzustellen. Eine Methodik zum Sicherstellen der korrekten Funktionalität von Software ist das Testen von Software im Sinne von Validierungstests die sicherstellen sollen, dass die Software vorher definierte Szenarien nach Erwartung behandelt. Für REST-APIs existieren zahlreiche Tools die solche Validierungstests automatisch übernehmen können wohingegen es noch einen Mangel an Tools dieser Art für GraphQL gibt. Im Rahmen der IEEE/ACM 2021 wurde ein Paper veröffentlicht, dass eine Methode vorstellt wie GraphQL-APIs mithilfe von PProperty-basedTests automatisch getestet werden können. Property-based"bzeieht sich darauf, dass die Eigenschaften eines Objektes genutzt werden um diese zu testen. Diese Methode generiert zufällig Tests und bietet so eine Möglichkeit, Fehler zu entdecken und generell erstmal eine Grundlage an Tests zu schaffen frei nach dem Motto: lieber irgendwelche Tests als gar keine Tests". Die zufallsbasierte Testgenerierung weist allerdings einige Schwachstellen auf. So kann Sie nicht garantieren, dass die API zu jeder Zeit eine gute Coverage hat denn es können einzelne Routen der API komplett ausgelassen werden. Es sind Testszenarios denkbar, die sehr viele false-positives durchlassen & somit die Qualität der Software nicht ausreichend sicherstellen können. GraphQL ermöglicht außerdem einen potentiell unendlichen Suchraum für die Tests. Um diesem Problem zu entgehen wurde ein einfaches rekursions-limit definiert was jedoch dazu führt, dass die Testabdeckung nur bis zu einem bestimmten Grad überhaupt reichen kann. Längere Pfade die mit GraphQL definiert werden können, werden deshalb niemals getestet.

Mit dieser Arbeit soll ein anderer Ansatz für die automatisierte Testgenerierung untersucht werden. Hierbei soll untersucht werden, inwiefern Graphcoverage auf GraphQL angewendet werden kann zur Generierung von Tests. Mithilfe von einem allgemeinen Graphalgorithmus, der sonst zur Kontrollflussgraphen Analyse benutzt wird, wollen wir zeigen, dass es möglich ist mit einem iterativen Verfahren GraphQL zu testen. Wir

versprechen uns von den Graphcoverage-Algorithmen einer verlässliche und sichere Generierung von Tests die einerseits effizient jegliche Methoden abdecken und andererseits die Anzahl der Tests minimal hält. Um die Methodik zu validieren werden am Ende beide Tools einem Experiment unterzogen um zu sehen ob die hier vorgestellte Methode eine Verbesserung erzielen kann.

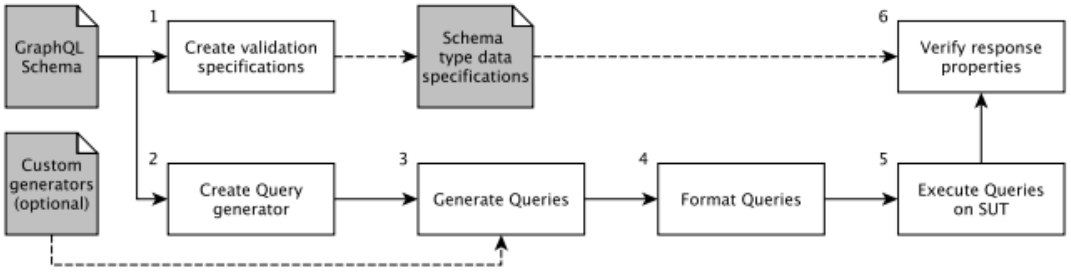
2 Einleitung

In diesem Kapitel wird an das Thema und die Motivation dieser Arbeit herangeführt. Außerdem wird definiert, welche Ziele diese Arbeit erreichen soll und eine grobe Übersicht über die Kapitelstruktur gegeben.

2.1 Motivation

Mit einer steigenden Nutzung von GraphQL wird es immer wichtiger, geeignete Tests für GraphQL-API's zu entwickeln damit eine gute Softwarequalität sichergestellt werden kann. Tests können manuell geschrieben oder automatisch generiert werden. Während bei Unit-Tests für einzelne Methoden der Programmierer frei entscheiden kann, ob er die Tests selbst schreiben will oder doch eher von einem Tool generieren lassen will sind bei Integrations-Tests die Testräume teilweise so groß, dass ein manuelles Schreiben dieser Tests einerseits fehleranfällig aber auch schlicht zu langwierig ist. Für REST-APIs existieren schon automatische Integrationstesttools wie zum Beispiel: EvoMaster [1] , QuickREST [2] oder RESTTESTGEN [3]. GraphQL-APIs haben leider noch einen Mangel an solchen automatischen Testtools. Im Rahmen der IEEE/ACM 2021 wurde mit "Automatic Property-based Testing of GraphQL APIs"[4] eine Methode vorgestellt die diesen Mangel angehen soll. Ergebnis der Arbeit war hierbei ein Prototyp der die vorgestellte Methode umsetzten sollte. Die vorgestellte Methode bezieht sich auf "Property-based Testing" wobei diese gleichzusetzen ist mit "Random Testing" [4][vgl. 2.B] Durch die starke Typisierung und Schema-Definition, welche prinzipiell ein Graph ist, lässt sich in GraphQL sehr einfach auswerten welche Anfragen nun zulässig sind. Die hier vorgestellte Methode nutzt den Fakt, dass zum Beispiel alle möglichen Anfragen immer im Query-Knoten beginnen müssen und somit alle weitergehenden Felder im Schema innerhalb des Query-Knoten definiert sein müssen. Da die Definition des Schemas der eines Graphens entspricht ist jedoch der mögliche Suchraum potentiell unendlich da GraphQL Zyklen innerhalb des Graphens erlaubt. Der unendliche Suchraum wurde durch ein Rekursionslimit begrenzt allerdings wird so eine schlechtere Test-Coverage erreicht.

Die bisher entwickelte Methode funktioniert auf folgende Weise:



Methode von [4]

wobei neben dem vorher erwähnten Rekursionslimit außerdem Punkt 6. "Verify response Properties" kritisch zu betrachten ist da die Auswertung wirklich nur auf die Properties schaut. Dies bedeutet, dass ein zurückgegebens Objekt nur auf seinen Typ überprüft wird aber nicht, ob seine tatsächlichen Rückgabewerte, die exakt erwartet sind. Hierdurch können false-positives entstehen.

Die vorgestellte Methode wollen wir verbessern durch Änderung einiger Ansätze. Hierbei sollen Graphcoverage-Algorithmen zum Einsatz kommen, die mit iterativen Verfahren auch zyklische Graphen ideal überdecken können und dabei immer verlässlich arbeiten, sodass die generierten Tests stets für vergleichbare Ergebnisse sorgen und nicht davon abhängig sind, dass der Zufall eine gute Überdeckung liefert. Zusammenfassend sei gesagt, dass bei der Testgenerierung und Testauswertung Verbesserungen möglich sind und dies Gegenstand dieser Arbeit sein soll.

2.2 Umsetzung

Zuallererst wird in dieser Arbeit etwas Theorie definiert und in Bezug gesetzt. Wir beginnen damit die Graphentheorie als mathematisches Konzept zu definieren denn dieses liegt GraphQL zugrunde. Darauffolgend kommt eine kleine Einführung in GraphQL und dann bilden wir schon die Schnittstelle von GraphQL zur Graphentheorie. Sobald diese Verbindung erfolgt ist können wir uns dem eigentlichen Problem widmen: Wie kann man mithilfe von Graphcoverage-Algorithmen Tests generieren? Hierfür erfolgt ein letzter Theorie-Exkurs über Software-Tests. Mit diesen Grundlagen schaffen wir es dann unsere Methode zu entwickeln und können Sie auch mit "Automatic Property-based Testing of GraphQL APIs"[4] vergleichen. Unsere Methode wird konzeptionell vorgestellt und dann folgen einige Implementierungsdetails sowie ein Vergleich beider Tools durch Experimente. Abschließen wird die Arbeit mit einem Ausblick für zukünftige Arbeit und einem Fazit über unsere erreichten Verbesserungen.

3 related Work / verwandte Arbeiten

Da GraphQL eine stetig wachsende Beliebtheit verzeichnet [5][vgl. Language Features] steigt auch der Bedarf und das Interesse an Testmethoden. Aktuell gibt es für GraphQL noch eine Lücke an produktionsreifen Testtools, insbesondere automatischen Testtools. Eine wachsende Anzahl an research-tools beziehungsweise untersuchten Methoden ist allerdings zu verzeichnen. In diesem Kapitel sollen diese Methoden benannt werden und Verwandheiten, Unterschiede oder thematische Überschnitte von dieser und anderen Arbeiten benannt werden.

3.1 Property Based Testing

In "Automatic Property-based Testing of GraphQL APIs"[4] wird der Ansatz des Property-based Testing verfolgt, um Integrationstests zu erstellen. Property-based Testing ist laut dem Paper heute Synonym mit Random Testing"[4][vgl. 2B] wobei zufällig hierbei meint,dass die Eingabedaten und Routen zufällig generiert werden. Wie Eingangs schon erwähnt, hat die Methode einige Limitierungen. Wir wollen diese hier noch einmal aufgreifen und vertiefen. Der allgemeine Funktionsablauf der Testgenerierung laut Paper ist wie folgt:

1. Vom Schema, generiere Typ-Spezifikationen
2. Generiere einen Generator der zufällig eine Liste an Query-Objekten erstellen kann
3. Generiere n Querys
4. Transformiere die Queries in GraphQL-Format
5. Führe die Queries auf dem SUT (system under test) aus
6. Evaluiere die Ergebnisse auf ihre Properties

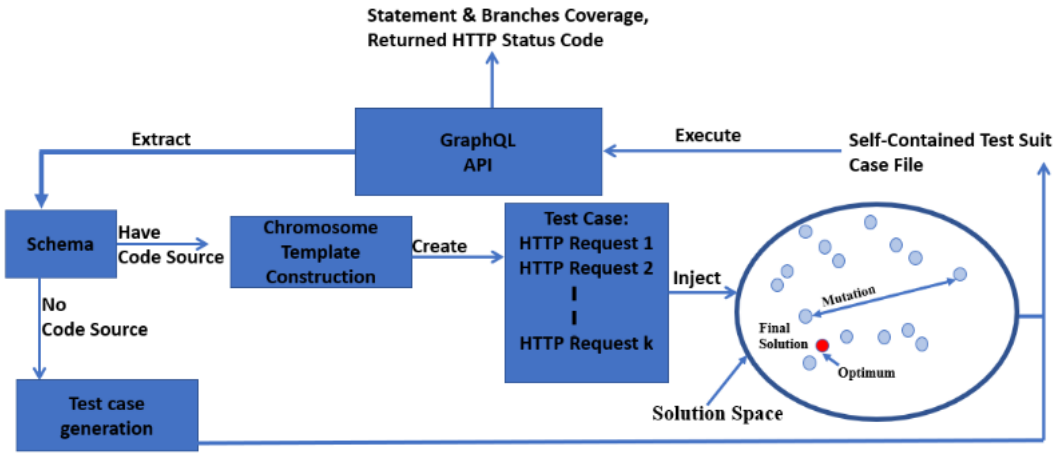
[[4][vgl. 3. Proposed Method]]

Insbesondere Punkt 2. und Punkt 6. weisen Verbesserungsbedarf auf. Punkt 2 wird auch der Hauptunterscheidungspunkt beider Arbeiten sein, denn hier sind dann zwei gänzlich unterschiedliche Konzepte am Werk. Dieser ist beim Property-Based Testing nämlich ein Query-Generator der mithilfe der Clojure-Bilbiothek Serene[6] Clojure.Specs[7] generiert und diese Clojure.Specs[7] dann nutzt um mit der Clojure-Bilbiothek Malli[8] dann Daten für die Testqueries zu generieren. Unsere herangehensweise wird sich hiervon gänzlich unterscheiden. Im Sinne von Property-based Testing ist diese Herangehensweise allerdings eine sehr sinnvolle gewesen da Malli[8] de-facto Standard für Property-based

Testing in der Clojure-Welt ist. Geht man jedoch davon aus, dass das Ziel eine ideale Überdeckung des Graphens jeder größe und jeder Struktur ist, so ist diese herangehensweise nicht die beste.[4][vgl. 3C] Laut dem Paper gilt "ein größeres und mehr rekursives (GraphQL)-Schema würde nicht skalieren und der (zufällig) iterative Ansatz ist besser als eine Breitensuche"[4][vgl. 3C]. Diese Behauptung betrachten wir als falsch und behaupten, dass es besser möglich ist. Dies zu zeigen bleibt Gegenstand der folgenden Arbeit.

3.2 heuristisch suchenbasiertes Testen

EvoMaster[1] ist ein Open-Source Tool welches sich automatisiertes Testen von Rest-APIs und GraphQL APIs zur Aufgabe gemacht hat. Aktuell kann durch EvoMaster sowohl WhiteBox Testing als auch BlackBox Testing durchgeführt werden jedoch ist ein Whitebox Test mittels Vanilla-EvoMaster nur für Rest-APIs möglich die mit der JVM lauffähig sind. Im Paper "White-Box and Black-Box Fuzzing for GraphQL APIs"[9] wurde ein System on-Top für EvoMaster erstellt welches GraphQL Tests generieren kann. Hierbei soll sowohl WhiteBox als auch BlackBox Testing möglich sein. Das erstellte Framework in diesem Paper arbeitet nach folgendem Prinzip:



WhiteBox Testing ist möglich insofern Zugang zum GraphQL-Schema und zum Source Code der API gegeben ist. Andernfalls ist nur BlackBox Testing möglich. Zur Testgenerierung wird ein genetischer Algorithmus genutzt welcher die Tests generiert. Wie dieser genetische Algorithmus genau funktioniert kann im Paper selbst nachgelesen werden[9]. Im Vergleich mit unserer geplanten Arbeit mittels des Prime-Path-Algorithmus ergeben sich einige Unterschiede, diese sind unter anderem: Nutzung eines evolutionären Algorithmus Many-Independent-Objective (MIO). Im Paper selbst wird davon ausgegangen, dass andere evolutionäre Algorithmen unter Umständen passender wären als der MIO Algorithmus für die Testgenerierung. Jedoch ist ein evolutionärer Algorithmus auch immer ein stochastisch, heuristisch sich dem Optimum annähernder Algorithmus. (Beleg

hierfür) Im Gegensatz dazu ist der Ansatz dieser Arbeit ein iterativer Algorithmus der ideale Überdeckungen auf direkte Art bietet und im ersten Durchlauf direkt sein ideales Ergebnis ermittelt. Die ideale Lösung bezieht sich hierbei auf bestimmte Code-Coverage Kriterien die durch unseren Algorithmus erfüllt werden. Inwiefern der evolutionäre Algorithmus diese Kriterien erfüllt bleibt offen, es ist jedoch davon auszugehen, dass er sich einer idealen Lösung dieser Kriterien nur annähert da er eben ein stochastischer Algorithmus ist. (beleg oder Quelle)

3.3 Deviation Testing

Da GraphQL dynamisch auf Anfragen reagiert und es somit möglich ist, in seiner Anfrage einzelne Felder mit einzubeziehen oder auch auszuschließen ist dies im Grunde genommen ein einzelner Test-Case. Im Paper Deviation Testing: A Test Case Generation Technique for GraphQL APIs"wird diese Gegebenheit benutzt und aus einer selbstdefinierten Query werden hier einzelne Test-Cases gebildet. Ein solcher Test macht je nach Implementierung der GraphQL-Resolver druchaus Sinn, da im Backend Felder durchaus zusammenhängen können und es Bugs geben kann wenn Resolver fehlerhaft definiert sind. z.B. könnte folgende Definition zu solchen Fehlern führen:

(hier BSP mit Code einfügen)

Da Deviation Testing jedoch nur bestehende Tests erweitert um mögliche Felder mitzutesten werden hier keine neuen Tests generiert. Durch Deviation Testing werden bestehende Tests nur erweitert allerdings muss eine Edge-Coverage gegeben sein damit diese Arbeit ein zufriedenstellendes Ergebnis erzeugt. Eine Edge-Coverage in einem komplexen Graphen ist allerdings sehr wahrscheinlich schwer umsetzbar mit manuellem Test schreiben. Eine Paarung von Edge-Coverage mit Deviation-Testing wäre sicherlich Interessant. Genau so wäre es interessant Deviation Testing als Teil unserer Arbeit zu nutzen indem mit diesem Tool die Tests erweitert werden. (initialer Plan war es, einfach immer alle Felder eines Nodes zu testen, hierdurch wäre es möglich auch alle Varianten noch zu testen)

3.4 Query Harvesting

Klassisches Testen von Anwendungen beeinhaltet, dass möglichst das komplette System getestet wird bevor es verwendet wird. Im Paper "Harvesting Production GraphQL Queries to Detect Schema Faults"wird ein gänzlich anderer Ansatz verfolgt. Hierbei ist es nicht wichtig die gesamte GraphQL-API vor der Veröffentlichung zu testen sondern echte Queries die in Production ausgeführt werden zu sammeln. Der Ansatz der hierbei verfolgt wird begründet sich daraus, dass ein Testraum für GraphQL potentiell unendlich sein kann und es sehr wahrscheinlich ist, dass nur ein kleiner Teil der API wirklich intensiv genutzt wird, sodass auch nur dieser Teil wirklich stark durch Tests abgedeckt werden muss. AutoGraphQL läuft hierbei in zwei Phasen wobei in der ersten Phase alle einzigartigen Anfragen geloggt werden. In der zweiten Phase werden dann aus den geloggten Anfragen Tests generiert. Hierbei wird für jede geloggte Query genau ein Test-

Case erstellt. Bei dieser Art des Testens wird insbesondere darauf Wert gelegt, dass es keine Fehler im GraphQL Schema gibt. Dies ist ein wichtiger Teil um GraphQL-API's zu testen allerdings noch kein vollständiger Test denn hier wird außer Acht gelassen, dass eine Query konform zum GraphQL-Schema sein kann aber trotzdem falsch indem zum Beispiel falsche Daten zurückgegeben werden durch falsche Referenzierung oder ähnlichem. In dem zu entwickelndem Tool sollten alle Querys die von AutoGraphQL geloggt werden auch berücksichtig werden da sie durch den Prime-Path Algorithmus auch ermittelt werden. Es kann allerdings sinnvoll sein AutoGraphQL als Monitoring-Software mitlaufen zu lassen und weitere etwaige Fehler hiermit zu loggen und automatisch daraus Test-Cases erstellen zu können damit zukünftig keine Fehler dieser Art mehr passieren.

3.5 Vergleich der Arbeiten

Arbeit / Kriterium	**Property Based Testing**	**heuristisch suchen-basiertes Testen**	**Deviation-Testing**	**Query Harvesting**
Generierungsart	Zufallsbasierte Routenge-nerierung	Heuristische Suche	Erweiterung von beste-henden Tests	Tracken von Querys und daraus Tests generieren
Überdeckung	Zufällig, stark abhängig von Schema	abhängig ob Zugang zu Source Code, Zufällig aber optimaler	stark abhängig von selbst geschriebe-nen Tests	stark Abhängig von User-requests
Orakel	simples Raten	mit Source Code: Analyse	Aus entwickel-ten Tests	Aus gestellten Querys
Ausführzeit	vor Prod	vor Prod	vor Prod	Verifikation / Wartung
Use-Case	allgemeines Testen	allgemeines Testen	allgemeines Testen	Testen bei Code-Änderung

3.6 Andere Arbeiten

Hier ist eine kurze Übersicht über andere Arbeiten, dieses Kapitel ist sehr unwahrscheinlich in einer Abgabeversion. Es dient eher als Notizensammlung in einer hübscheren Form.

3.6.1 Empirical Study of GraphQL Schemas

Eine umfangreiche Untersuchung von Praktiken in GraphQL. Unterteilt in verschiedene Metriken wie z.B. Anzahl der Objekttypen, Querys etc. Interessant ist allerdings die Untersuchung von zyklischen Schemas. Insbesondere, wie groß diese Zyklen werden können und wie sie begrenzt werden. Dies ist interessant für spätere Auswertungen. Allerdings bringt diese Arbeit nicht viel für das direkte Testen.

3.6.2 LinGBM Performance Benchmark to Build GraphQL Servers

Eher eine Untersuchung wie GraphQL-APIs unter Last performen bzw. wie Effizient sie sind. Der benutzte Query-Generator kann interessant sein aber es ist schwer einschätzbar wie dieser in unserem Kontext genutzt werden kann.

3.6.3 GraphQL A Systematic Mapping Study

Richtig gute Übersicht wie GraphQL Ünter der Haubefunktioniert

4 Grundlagen / Theorie

Das automatisierte Testen von GraphQL-APIs erfordert ein spezifisches Domänenwissen in verschiedenen Teilbereichen der Informatik und Mathematik. Dieses Domänenwissen wird in den folgenden Abschnitten aufgrund Lage zweier Lehrbücher erarbeitet und in Kontext gesetzt. Wissen über die Graphentheorie wird benötigt, da GraphQL eine Implementierung von graphenähnlichen Strukturen ist und wir somit Algorithmen darauf anwenden wollen beziehungsweise können. Die mathematische Formalisierung hilft hierbei dann insbesondere bei der Beweisführug für eine allgemeine Termination der zu entwickelnden Algorithmen. Desweiteren ist es nötig sich bewusst zu machen, welche Arten des Testens von Software es gibt und wann man "genug" oder "zu wenig" getestet hat. Hierfür gibt es Metriken die auch insbesondere auf Graphen angewandet werden können und uns dann verraten können ob unsere Tests ausreichend sind. Im konkreten ist das Theorie-Kapitel so strukturiert, dass erst einmal die mathematischen Grundlagen der Graphentheorie vermittelt werden und im Anschluss dazu wird eine Beziehung zwischen GraphQL & Graphentheorie hergestellt. Mit der Beziehung können wir dann zeigen, dass Graphalgorithmen auch bei GraphQL anwendbar sind. Darauffolgend zeigen wir verschiedene Kriterien die eine Testüberdeckung ermöglichen würden und erklären die Unterschiede.

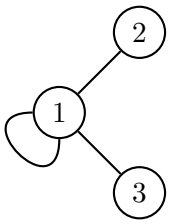
4.1 Graphentheorie

Da GraphQL es ermöglicht, dass komplexe Beziehungen innerhalb eines Datenmodells in Form von Graphen modelliert werden, benötigen wir die Graphentheorie, da diese Methoden liefert um Graphen systematisch zu definieren und analysieren. Desweiteren sind Teile der Testcoverage-Kriterien eng mit Graphenstrukturen verbunden sodass wir gezwungen sind uns einführend mit der Graphentheorie zu beschäftigen damit wir die Grundlagen erarbeiten, die wir später benötigen werden. Generell wird es im folgenden eher etwas theoretischer gehalten, die Zusammenhänge werden sich in späteren Kapiteln erschließen wenn wir Graphen mit GraphQL verbunden oder Tests aus Graphenstrukturen entwickeln.

4.1.1 allgemeiner Graph

Ein Graph ist ein Paar G = (V, E) zweier disjunkter Mengen mit $E \subseteq V^2$ [13, *vgl.S.*20.1*Graphen*]

Elemente von V nennt man Knoten eines Graphens, die Elemente von E nennt man Kanten, Knoten die in einem Tupel von E vorkommen nennt man auch inzident (benachbart) [13, vgl. S.3 0.1 Graphen]. Einen Graphen kann man nun definieren, indem wir zum Beispiel für V = 1, 2, 3 wählen und für E = (1, 1), (1, 2), (1, 3). Dargestellt werden können Graphen, indem man die Elemente von V als, zum Beispiel, Kreis zeichnet und dann alle Kanten aus E einzeichnet, indem man die Punkte verbindet [13, vgl. S.2 0.1 Graphen]. Eben definierter Graph hat dann folgende Darstellung:



Es finden sich auch andere Darstellungsformen für Graphen, hier sei insbesondere die Adjazenzmatrix genannt. Für unseren Anwendungsfall belassen wir es jedoch bei Punkten und Linien. Mit dieser Definition lassen sich nun beliebig große, ungerichtete Graphen erstellen.

4.1.2 Grundbegriffe der Graphentheorie

Verschiedene Begriffe sind grundlegend für ein weiterführendes Verständnis der Graphentheorie. Wir werden hier auf einige dieser Grundbegriffe näher eingehen, insbesondere auf diejenigen die im Testkontext unbedingt benötigt werden.

Kante

Die Kante wurde zwar zuvor schon definiert als $e \in E \subseteq V^2$ also ein Tupel (x, y) wobei $x, y \in V$ mit E und V wie in 4.1.1 definiert. Hierbei zeigt die Kante, dass die Knoten

x und y miteinander verbunden sind. Äquivalent ist auch die Aussage, dass y und x verbunden sind. Wir nennen diese Kanten auch ungerichtete Kanten [13, vgl. S.3 0.1 Graphen] Wir wollen nun zwei weitere Arten von Kanten definieren.

gewichtete Kante

Eine gewichtete Kante fügt einen dritten Parameter zu einer Kante hinzu, sein Gewicht. Dies ist ein dritter Parameter einer Kante (x, y) wir erweitern also die Definition um einen dritten Parameter (x, y, z) wobei z meist $z \in \mathbb{R}$ ist. Solche gewichte können benutzt werden um ideale Wege in Graphen zu finden da sie einer Kante eine Zahl zuweisen, die als Kosten genutzt werden können. Gewichtete Kanten werden in unserem Prototypen eine wichtige Rolle spielen allerdings wird bei uns die Kante keine Zahl aus $\mathbb{R}$ als Gewicht bekommen sondern Objekte aus GraphQL.

gerichtete Kante / gerichteter Graph

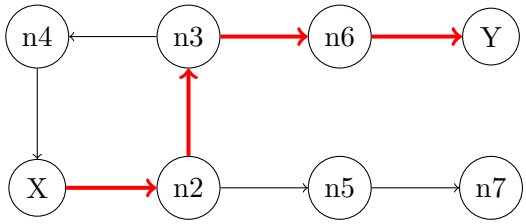
Eine gerichtete Kante besitzt im Gegensatz zu den ungerichteten Kanten eine Orientierung. Dies bedeutet, dass die Kante (x, y) einen Startknoten und einen Endknoten definieren muss. Gekennzeichnet wird dies für den Startknoten durch $init()$ und für den Endkonten durch $end()$. Eine gerichtete Kante vom Knoten x nach y wird somit definiert als $(init(x), end(y))$ [13, vgl. S.26 Verwandte Begriffsbildungen] Die Einführung von gerichteten Kanten ermöglicht es uns, gerichtete Graphen zu erstellen. Gerichtete Graphen sind Graphen, die nur gerichtete Kanten besitzen. Im Prinzip funktionieren gerichtete Kanten wie Einbahnstraßen - es ist nur möglich in die erlaubt Richtung vorzuschreiten. Die gerichteten Graphen sind besonders wichtig für uns, da alle späteren Analysen von GraphQL auf gerichteten Graphen basieren.

Grad eines Knoten

Der Grad eines Knoten gibt an, wie viele andere Knoten mit diesem Knoten verbunden sind und wird als $d_G(node)$ benannt. In ungerichteten Graphen ist der Grad eines Knoten x mit 4 Kanten also $d_G(x) = 4$. Bei gerichteten Graphen unterscheiden wir zwischen Eingangs- und Ausgangsgrad. Der Eingansgrad ist definiert als Anzahl aller Kanten die auf den Knoten eingehen und der Ausgangsgrad ist genau entgegengesetzt, die Anzahl aller Kanten die ausgehend vom gewählten Knote sind.

Pfad / Weg

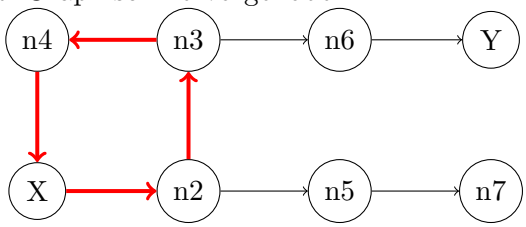
Ein Pfad, oft auch Weg genannt, ist eine Sequenz von Knoten die nachfolgend durch Kanten miteinander verbunden sind. [13, vgl. S. 7 0.3] Der Pfad von einem Knoten x zu einem Knoten y über Knoten n_1 bis n_7 hat dann zum Beispiel diese Struktur $p = \{(x, n2), (n2, n3), (n3, n6), (n6, y)\}$ wobei hierbei gilt, dass die Kanten $\{(x, n2), (n2, n3), (n3, n6), (n6, y)\} \in E$. Graphisch würde dies wie folgt aussehen (der Pfad in Rot markiert):



Pfade haben immer eine Länge. Die Länge des Pfades entspricht der Anzahl der Kanten innerhalb dieses Pfades, das bedeutet, dass Pfadlänge $= |p|$ wobei $p = \{(x, n2), (n2, n3), (n3, n6), (n6, y)\}$. Zu beachten ist, dass Pfade in gerichteten Graphen immer die Orientierung der Kanten beachten müssen. In obigem, gerichteten Pfad wäre also ein Weg $\{(X, N4), (N4, N3)\}$ nicht zulässig.

Zyklus / Kreis

Ein Zyklus, auch Kreis genannt, ist ein Pfad bei dem gilt, dass der Startpunkt und Endpunkt der Pfadsequenz identisch ist. Formell bedeutet dies, dass ein Pfad eine Sequenz p $= \{(X, e1), (e2, e3), ..., (e_n, X)\}$ ist wobei es auch möglich ist, dass der Kreis Länge 1 hat also die Sequenz p $= \{(X, X)\}$ ist. Zyklen können in gerichteten und ungerichteten Graphen auftreten wobei das Vorkommen in ungerichtete Graphen eigentlich garantiert ist, insofern eine Kante existent ist. Das Auftreten in ungerichteten Graphen ist nicht garantiert aber kann durchaus geschehen. Der Graph aus vorigem Beispiel definiert exemplarisch den Pfad p $= \{(X, n2), (n2, n3), (n3, n4), (n4, X)\}$ welcher ein Kreis ist. Graphisch hervorgehoben:



4.1.3 Zusammenfassung

Wir haben nun eine kleine mathematische Einführung in das Gebiet der Graphentheorie hinter uns. Mithilfe der hier erarbeiteten Begriffe und Definitionen werden wir im folgenden verehrt arbeiten. Insbesondere wenn wir die Coverage-Algorithmen im Bezug des Testens einführen benötigen wir das hier erarbeitete Wissen.

4.2 GraphQL

GraphQL ist eine Open-Source Query-Language (Abfragesprache) und Laufzeitumgebung die von Facebook entwickelt wurde. [11, vgl. Introduction] Die Besonderheiten von GraphQL sind, dass man mit nur einer einzelnen Anfrage mehrere Ressourcen gleichzeitig abfragen kann [10, vgl. No More Over- and Underfetching] und die Daten in einem Schema durch einen Typgraphen definiert sind [10, vgl. Benefits of a Schema Type System]. So lässt sich die Effizienz stark erhöhen, indem weniger Anfragen gestellt werden die zeitgleich eine höhere Informationsdichte haben. Außerdem erleichtert GraphQL die Kommunikation von Schnittstellen, indem die gewünschten Felder schon in der Query definiert werden und direkt den erwarteten Datentyp zusichern. Hier liegt auch der große Vorteil im Vergleich zum direkten technologischen Konkurenten REST API. Bei REST-APIs sind nämlich für verschiedene Ressourcen auch jeweils eine eigene Anfrage nötig und die Typsicherheit ist nicht so stark gegeben wie bei GraphQL-APIs. [10, vgl. No More Over- and Underfetching] Diese beiden großen Vorteile sorgen dafür, dass GraphQL an Popularität gewinnt und zunehmend eingesetzt wird. Im Kontext dieser Arbeit ist ein tiefgreifendes, technologisches Verständniss von GraphQL essenziell, deshalb wird hier eine tiefgreifende Erklärung von GraphQL folgen.

4.2.1 Schema & Typen

Grundlage einer jeden GraphQL-API ist ein GraphQL-Schema. [11, vgl. Core Concepts] Dieses Schema definiert genau wie die Daten der API aufgebaut sind und welche Informationen exisitieren. Ein GraphQL-Schema ist eine Sammlung von Typen. Typen sind Objekte einer Datenstruktur. Ein Typ definiert alle Informationen über sich, hierbei wird für jede Information ein Feld angelegt. Das Feld kann entweder ein Standarddatentyp wie String, Integer etc. sein oder ein anderer Typ. Falls das Feld ein anderer Typ ist, so entspricht diese Beziehung einer Kante in einem Graphen. Dies bedeuet, dass eine Abfrage dieses Feldes dann ein Objekt des Types zurückliefert und hier auch die gewünschten Felder definiert werden müssen. Ein sehr einfaches Schema wäre zum Beispiel die Beziehung zwischen Büchern und Authoren. Ein Buch hat einen Titel und einen Author. Ein Author hat einen Namen und ein Geburtsdatum. Zugehöriges Schema für dieses Beispiel sähe wie folgt aus:

```
type Buch {
    title: String
    author: Author
}
type Author{
    name: String
    geburtsdatum: Date
}
```

Es lässt sich also festhalten, dass ein GraphQL-Typ immer als ein Tupel `(Name, Felder)`

definiert wird wobei die Felder eine Liste an Tupeln `(Feldname, Feldtyp, Datentyp)` sind. Hierbei gelten folgende Einschränkungen für die Elemente des Tupels:

Feldname ein eindeutiger Feldbezeichner

Feldtyp gibt Einschänkungen vor, z.B. nicht Null (durch `!`), Listentyp (durch `[]`) etc.

Datentyp der explizite Typ den das Feld hat, kann Standarddatentyp oder anders definierter Type sein

Wenn ein Typ ein Feld enthält, das kein Standarddatentyp ist so entspricht dieses Feld einer Kante in einem Graphen. Dieses Feld muss dann in einer Query näher definiert werden indem angegeben wird, welche Felder nun vom Typ zu dem die Kante führt, ausgegeben werden sollen.

4.2.2 vordefinierte Typen

Jedes GraphQL-Schema definiert initial mehrere Typen die spezielle Aufgaben haben und nicht vom User überschrieben werden können. Hierunter zählen unter anderem auch Standarddatentypen wie Sie gemeinhin bekannt sind. Im folgenden werden wir auf einige wichtige dieser Typen eingehen.

Scalar-Types

Grundlegende Datentypen (Standarddatentypen) werden durch Scalar Types ausgedrückt. Scalar-Types repräsentieren einzelne Werte wie z.B. einen Integer, einen String, Boolean Werte oder auch Datumstypen. Ein Scalar-Type kann nicht vom User geändert werden und enthält auch keine anderen Typen (im Gegensatz zu Objekttypen die das können). Es ist möglich auch eigene Scalar-Types festzulegen jedoch sind in der offiziellen Spezifikation von GraphQL lediglich folgende Scalar-Types definiert:

Typ	Beschreibung
Int	**32-bit Integer**
Float	**Gleitkommazahl nach IEEE 754**
String	**frei wählbarer Text (leerer String zählt nich als non-Null!)**
Boolean	**einzigartiger Identifier, intern behandelt wie ein String**
ID	**Rohkonstrukt von dem geerbt werden kann für eigen definierte Typen**
Scalar Extensions	**Rohkonstrukt von dem geerbt werden kann für eigen definierte Typen**

[11, vgl. 3.5 Scalars]

Query-Type

Der Query-Type definiert alle erlaubten Anfragen (Leseoperationen) an die GraphQL-API. Hierbei können Anfragen mit und ohne Eingabeparameter angegeben werden. Die definierten Anfragen haben, wie jeder Typ, einen eindeutigen Bezeichner, welcher dann auch in der zustellenden Query benutzt wird. Die Felder der Antwort hängen hierbei vom Feldtypen ab. Ist das Ergebnis der Query-Definition ein Standarddatentyp, so wird es direkt ausgegeben. Ist es ein anderer definierter Typ, so müss näher bestimmt werden welche Felder erwartet werden. Nutzen wir das Beispiel der Bücher Autoren weiter, könnte man wie folgt einen Query-Type definieren:

```
type Query{
    # returns a List of all Books
    getBooks: [Book]
    # returns one random Book
    getBook: Book
    # returns the Author from a Book Title
    getBookByTitle(String title): Author
}
```

Mutation

Der Mutation-Type ist das Pendant des Query-Types. Im Mutation-Type werden alle erlaubten Schreiboperationen definiert. Dies beeinhaltet das Erstellen, Aktualisieren und Löschen von Daten in der GraphQL-API. Felder im Mutation-Type haben auch immer einen Rückgabewert, Konvention ist es hierbei, die veränderten Objekte zurückzugeben, sodass der Client als Validierung exakt das Objekt bekommt, welches er sich "gewünscht hat". Die Operationen die mittels Mutation hervorgerufen werden, werden linear abgearbeitet. So ist es in GraphQL möglich, die Operationen miteinander zu verknüpfen. Man stelle sich z.B. vor, dass ein User seine Mail ändern will und gleichzeitig noch seinen Namen. Mit REST wären hier zwei Anfragen nötig, GraphQL kann dies mit einer Anfrage erledigen. Kehren wir wieder auf unser bisheriges Beispiel zurück, ein Mutationstyp hierfür könnte wie folgt aussehen:

```
type Mutation{
    # erstelle einen Author, return den erstellten Author
    createAuthor(name: String!, birthdate: Date):Author
    # erstelle ein Buch, return das erstellte Buch
    createBok(title: String!, author:Author): Book
    # ändere den Titel eines Buches, return des Buches mit geänderten Titel
    changeBookTitle(title: String! , newTitle: String!): Book
    # ändere den Geburtstag eines Autors, return des geänderten Authors
    changeBirthdateFromAuthor(author: Author!, newBirthDate: Date!)
}
```

eine einzelne Mutation kann Pflichtfelder und optionale Felder markieren. Pflichtfelder werden mit einem ! markiert. Diese Felder müssen dann als Argument bei jeder Ausführung mitgesendet werden. Optionale Felder benötigen dies nicht.

Subscription

Eine Besonderheit von GraphQL ist der Subscription-Type. Dieser ermöglicht eine Echtzeitkommunikation zwischen Server und Client, indem mithilfe des WebSocket-Protokolls eine permanente Verbindung zwischen Server und Client hergestellt wird. Diese permantente Verbindung ermöglicht es dem Server direkt Daten an den Client zu senden ohne, dass der Client dafür eine Anfrage schicken muss. Wie auch in allen anderen Typen definiert der Subscription-Type Felder mit einem Namen und Rückgabetyp. Im Beispiel der Bücher Autoren wäre hierbei nun denkbar, dass eine Subscription für neue Bücher neue Autoren wünschenswert wäre. Hierdurch folgt dann dieser Subscription-Type:

```
type Subscription{
    # neues Buch veröffentlicht
    newBook: Book
    # ein neuer Author erscheint
    newAuthor: Author
}
```

Ein Client könnte sich auf diese Kanäle nun subscriben. Angenommen, wir wollen immer über ein neues Buch informiert werden so muss der Client diese Anfrage stellen:

```
subscription{
    newBook{
        title
        author{
            name
        }
    }
}
```

Hierdurch wird eine permanente Verbindung hergestellt und immer ein Objekt vom Type Book mit den Feldern title & author gesendet, wenn ein neues erschienen ist. Es ist wie auch in anderen Typen möglich, Felder wegzulassen falls diese nicht. Ein spezieller Client muss gewählt werden, der den WebSocket offen lässt, um den die Nachrichten zu empfangen, dies ist jedoch spezifisch abhängig von dem Projekt (Sprache, gewählte GraphQL Server Instanz).

4.2.3 Resolver

Bisher beschäftigen wir uns vorrangig mit der Strukturierung und Typisierung von GraphQL und den Daten die durch das GraphQL Schema dargestellt werden. Ein wichtiger

Baustein fehlt aber noch. Woher kommen die Daten? Wie werden Eingabedaten behandelt? Diese Fragen werden durch die Resolver beantwortet. Ein Resolver ist in GraphQL eine Funktion die zuständig für die Datenabfragen und Strukturierung ist. Im Schema haben wir bisher definiert in welcher Art und Weise wir die Daten haben wollen, der Resolver ist nun dafür zuständig, diese Daten im definierten Format zur Verfügung zu stellen. Die Resolver sind nicht, wie alle vorher benannten Teil von GraphQL offen einsehbar, sondern sind Funktionen einer Programmiersprache. Für jedes Feld im Schema, das Daten enthält, muss ein Resolver implementiert werden, dies umfasst insbesondere die Query, Mutation und Subscription Typen aber auch alle selbstdefinierten Typen. Die konkrete Implementierung der Resolver hängt von verschiedenen Dingen ab, insbesondere jedoch welchen GraphQL-Server man nutzt und welche Programmiersprache verwandt wird. Ein beispielhafter Resolver für die Query eines Buches anhand seines Titels mit ApolloServer in Javascript könnte folgende minimale Syntax haben:

```
const resolvers = {
    Query: {
        book: (parent, args, context, info) => {
            return getBookByID(args.id);
        },
    },
};
```

Wobei hierbei zu beachten sei, dass alle Argumente die mitgegeben werden im `args` Argument gespeichert sind. Die Funktion getBookByID gibt ein, dem Schema entsprechendes, Json-Objekt zurück. Da die Resolver konkrete Implementierungen außerhalb von GraphQL sind und die einzelnen Resolver untereinander aufrufen können, bedarf es hier einer Reihe an Tests da dieser Code gerne Fehlerhaft sein kann. Ein Klassiker für GraphQL ist es, einzelne Attribute in einem Resolver zu vergessen. Ein Entwickler sollte für jeden Resolver, der ja eine Funktion darstellt, Unit-Tests zur Verfügung stellen. Da sich die einzelnen Resolver aber auch untereinander aufrufen können, muss hier auch die Integrität getestet werden. Hier setzten wir an, indem unsere Testgenerierung darauf aufbaut, jeden möglichen Resolver in mindestens einer Kombination mit anderen Resolvern zu testen. So kann sichergestellt werden, dass die Resolver untereinander integer sind.

4.3 Zusammenhang Graphentheorie und GraphQL

Nun, da wir ein grundlegendes Wissen über Graphentheorie und GraphQL erlangt haben, müssen wir noch zeigen, dass Graphentheorie auch anwendbar ist auf GraphQL. Ohne diese Verknüpfung könnten wir uns nicht sicher sein, dass die zukünftig vorgestellten Algorithmen ausführbar sind für eine GraphQL-API.

4.3.1 Typen als Knoten

Wie in 4.2.1 schon gezeigt, ermöglicht GraphQL das Erstellen von eigenen Typen. Diese Typen repräsentieren einzelne Datenobjekte. Somit liegt es nahe, dass die einzelnen Typen als Knoten eines Graphens repräsentiert werden können. Bleiben wir bei vorigem Beispiel, so definieren wir einen Typen *Book*:

```
type Book {
    id: Int
    title: String
}
```

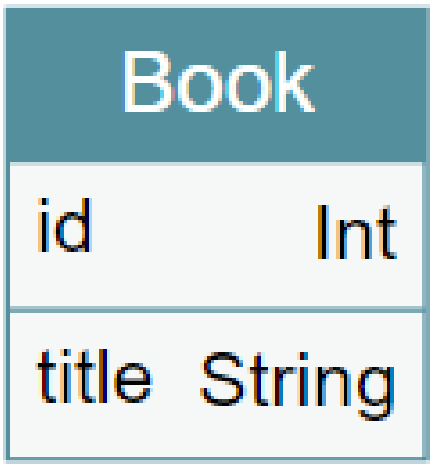
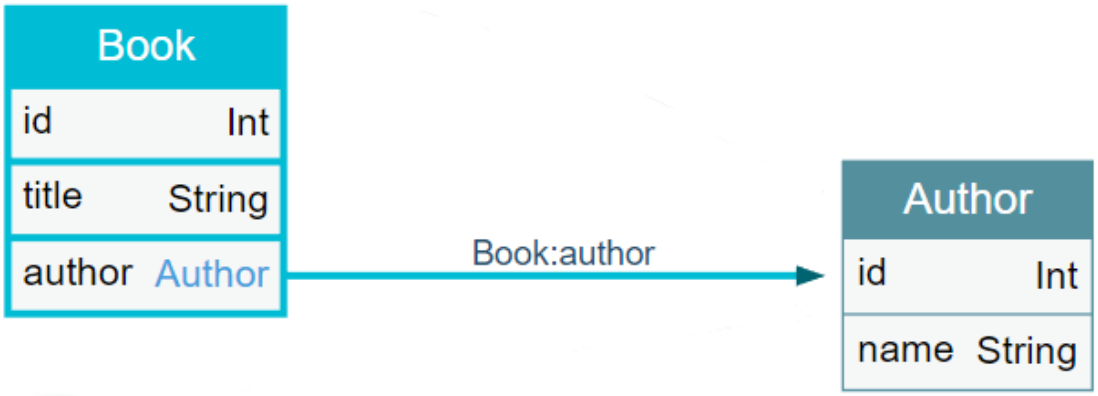


Abbildung 4.1: Book als Knoten

4.3.2 Felder als Kanten

Der eben definierte Typ Book besitzt aktuell nur zwei Felder, id und title. Beides sind Skalare-Datentypen und bilden somit keine ausgehenden Kanten, denn Kanten symbolisieren Beziehungen zwischen Objekten. Wir können einen Graphen mit $G = (V, E)$ wobei $E = \emptyset$ definieren. Allerdings wäre dies sehr restriktiv da wir überhaupt keine Verbindungen haben würden und viele Vorteile von GraphQL würden wegfallen. Es ist aber auch möglich, dass ein Type ein Feld definiert das nicht vom Skalaren Datentyp ist. So können wir das Buch um einen Typen *Author* erweitern wobei der Author gleich definiert wird wie in 4.2.1. Diese Typdefinitionen führen dann zu diesem Graphen:



Wir nutzen also die Typdefinitionen aus um die Beziehungen zwischen einzelnen Objekten zu bekommen. Hierbei wird ein Typ dann mit einem anderen Typen verbunden, wenn dieser als Feld im Ursprungstyp vorkommt. Man muss hierbei klar beachten, dass dies eine gerichtete Beziehung ist. Eben erstellte Beziehung definiert nur, dass ein Book das Feld Author hat. Wir können nach aktuellem Stand nicht die Bücher eines Autoren herausfinden da wir diese Kante nicht deklariert haben. Dies ist allerdings möglich. Definieren wir den Author dann also wie folgt:

```
type Book {
    id: Int
    title: String
    author: Author
}
type Author {
    id: Int
    name: String
    written: [Books!]
}
```

so ergibt sich folgender, zyklischer Graph:

4.3.3 der komplette Graph

Wir wissen nun also wie ein GraphQL-Schema einen Graphen repräsentiert und können Algorithmen die auf Graphen funktionieren auch auf einem GraphQL-Schema anwenden. Abschließend zu diesem Kapitel sei gesagt, dass es in GraphQL allerdings nicht möglich ist, jeden einzelnen Knoten direkt abzufragen. Dies hängt stets von der Definition des Query/Mutation-Types ab, denn alle eingehenden Anfragen müssen vom Query-Type bzw. alle eingehenden Veränderungen müssen über den Mutation-Type ablaufen. Der Einfachheit halber werden wir uns jetzt erstmal dem Query-Type widmen. Jede Anfrage die in GraphQL getätigt werden kann, hat ihren Ursprung im Query-Type. Somit folgt auch, dass alle Routen stets im Query-Type entspringen müssen. Dies bedeutet, dass nur Knoten mit Erreichbarkeit vom Query-Type überhaupt abgefragt werden können. In diesem Beispiel:

```
type Query {
    book: Book
    author: Author
}

type Book {
    id: Int
    title: String
    author: Author
}
```

```
type Author {
    id: Int
    name: String
    written: [Books!]
}

type Publisher {
    name: String
    published:  [Book]
}
```

wäre es nicht möglich einen Knoten des Publishers abzufragen da dieser Knoten nicht erreichbar ist vom Query-Type.

4.4 Testen

Indem technische Geräte und somit auch Software im umfangreichen Maßstab Einzug nehmen in nahezu alle Bereiche des Lebens ist es wichtig die Sicherheit, Qualität und Zuverlässigkeit von Software sicherzustellen. Um all dies sicherzustellen sind strukturelle Tests von Software nötig. Ziel ist es sicherzustellen, dass die Software den definierten Anforderungen und Spezifikation entspricht. Hierbei sind diverse Techniken und Ansätze verfolgt. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich insbesondere auf Integrationstests fokussiert also Tests, die Zusammenarbeit von einzelnen Softwarekomponenten (Units) sicherstellen sollen.

4.4.1 Arten von Tests

Es existieren verschiedene Arten von Tests welche unterschiedliche Ziele haben. Nachfolgend wird eine Auswahl verschiedener Arten erklärt wobei wir in der Granularität aufsteigen, wir fangen mit feingranularen Unit-Tests an und steigen immer weiter zu kompletten System-Tests auf. In der Mitte davon liegt das Integrations-Testen. Diese Methode wird mit dieser Arbeit für einen Anwendungsfall benötigt. Die Erklärung der anderen Arten erfolgt für eine einfachere Einordnung ebendieser.

Unit Testing

Feingranulare Tests die zur Aufgabe haben, einzelne Funktionen/Methoden zu testen. Es wird insbesondere darauf geachtet, dass die einzelne Methode genau das macht, was Sie soll. Es existieren diverse Tools, die diesen Schritt vereinfachen. Diese Tools helfen einem dabei, dass man Tests definieren kann & ein erwartetes Verhalten der Funktion angibt. Eine Auswertung dieser Funktionalität wird dann vom Tool übernommen und bei etwaiigen Fehlern gibt es eine Erklärung nach dem Muster: +ABC+ war erwartet, `DEF` ist eingetreten. Unit-Tests werden bei der Entwicklung der einzelnen Funktionen von der Software entwickelt (sollten sie zumindest). Im Idealfall wird Test-Driven-Development verwendet, hierbei wird erst der Test entwickelt und dann die Methode entwickelt, die diese Tests erfüllen muss.

Integration Testing

Eine Granularitätsebene höher sind die Integrationstests. Hier wird getestet, ob einzelne Komponenten der Software miteinander gut zusammen arbeiten, d.h. ob sie integer sind. Die Testentwicklung ist hierbei meist eher komplex da einzelne Komponenten der Software selbst eine sehr hohe Komplexität haben können. Eine automatische Testentwicklung ist auf dieser Granularitätseben eigentlich eher selten der Fall, allerdings bietet sich im Kontext von GraphQL die Automatisierung durchaus an da die Zusammenarbeit von Softwarekomponenten mit klar definierter Struktur lohnenswert scheint. Will man allerdings die Intergration von großen Librarys als einzelne Komponente in der eigenen Anwendung testen, so gestaltet sich dies meist schwer und muss manuell getestet wer-

den da meist komplexe Datenstrukturen händisch gemockt (Mocken als Kapitel oder Glossar?) werden müssen.

System Testing

Auf der Ebene des System-Testing wird das komplette entwickelte System getestet. Hierbei ist sicherzustellen, dass alle funktionalen Anforderungen an das System eingehalten werden. Die Tests werden hierbei so realistisch wie möglich ausgeführt, d.h. das Testsystem soll möglichst nah am späteren Produktivsystem sein und Testfälle sollen die funktionalen Anforderungen der Software abdecken. So sind insbesondere alle Geschäftsprozesse zu testen. Im allgemeinen werden System-Tests als Blackbox Tests durchgeführt, dies bedeutet, dass nur externe Funktionsmerkmale getest werden, z.B. ob eine gewünschte Interaktion stattfand. Hierbei wird keine Rücksicht auf interne Zustände genommen. Ziel ist es, die Funktionsweise so zu testen wie ein realer Benutzer die Software nutzen würde.

4.4.2 Test-Coverage

Es ist nun bekannt, welche Arten des Testens es gibt. Allerdings ist noch nicht klar, wie viele Tests ausreichend sind. Man könnte nun argumentieren, dass man einfach jede einzelne Eingabe in einem Programm testen könnte um zu sehen, dass für jede Eingabe die korrekte Ausgabe kommt. Hierbei bemerkt man jedoch relativ schnell, dass dies mit heutigen Prozessoren nicht mehr möglich ist. Als Beispiel sei hier eine simple Addition von 2 64-bit Integern genannt. Für eine komplette Testung dieser simplen Addition gibt es `2^64  18 Trillionen` Kombinationen. Mit einem 3GHz Prozessor wäre eine vollständige Testung nach `2^64 / 3.000.000.000  6.149.571` Sekunden (69 Tage) erledigt. Es ist also ersichtlich, dass schon so eine vermeintlich einfache Funktion nicht komplett testbar ist. Daher wird also ein strukturierter Ansatz benötigt, der den Testraum einerseits klein hält, andererseits trotzdem dafür sorgt, dass Fehler ausgeschlossen werden können. Hierfür wurden formale Coverage-Kriterien entwickelt.[12, vgl. S.17]

Coveragekriterien

Wie gezeigt ist ein "vollständiges Testen also ein ausprobieren aller Möglichkeiten einfach unmöglich. Hierdurch sind wir gezwungen einen anderen Ansatz zu verfolgen. Coveragekriteren liefern hierbei einen Ansatz die einem dabei helfen können, sinnvolle Tests zu entwickeln und zu entscheiden, wann genug Tests entwickelt wurden. Die Grundidee ist hierbei, dass wir Test-Requirements definieren. Ein Test Requirement ist ein spezielles Element eines Software-Artefakts, dass von einem Testfall erfüllt sein muss. [12, vgl. S.17] Hiermit ist gemeint, dass ein Test-Requirement ein spezifisches Kriterium definiert, dass durch einen Test überprüfbar wird. Ein Beispiel für ein Test-Requirement wäre es, das wir prüfen, ob die Division von 2 und 1 wirklich 2 ergibt. Ein Coveragekriterium ist dann eine Regel beziehungsweise eine Sammlung von Regeln die eine Menge an Test-Requirements erzeugen. [12, vgl. S.17] Bleiben wir bei dem eben genannten Beispiel wäre ein Coveragekriterium hierbei, dass wir die Divison durch 0 auch noch überprüfen da

diese speziell ausgeschlossen wird. Es gibt diverse Methoden wie ein Coveragekriterium entwickelt werden kann. Einige grundlegende Typen wären zum Beispiel Call-Coverage, Branch-Coverage, Boundary-Coverage oder Statement-Coverage. (Man könnte hier noch weiter darauf eingehen aber das wäre nur um mehr Text zu haben TODO)

5 Graphcoverage

Wie zuvor gesehen, existieren verschiedene Coverage-Kriterien um Testabdeckung zu prüfen. Graphcoverage ist hierbei eine Herangehensweise um graphenbasierte Datenstrukturen zu überdecken. Graphen können nämlich ähnliche Probleme aufweisen wie vorheriges Beispiel der Addition. Die Addition zweier 64-bit Integer ist wenigstens endlich, Graphenstrukturen haben sogar unter Umständen unendliche Testräume. Umso wichtiger ist es hier, dass Überdeckungskriterien formuliert werden können, die diesen möglicherweise unendlichen Suchraum stark verkleinern und dennoch eine ausreichende Testung ermöglichen. Da wir vorher ergründet haben, dass GraphQL sich als gerichteten Graph darstellen lässt, können wir nun die Graphcoverage nutzen, um Tests mithilfe der Grapcoverage zu erstellen. Wie genau die Coverage erstellt wird und daraus Tests resultieren, werden im folgenden geklärt. Gerichtete Graphen sind die Grundlage für viele Coverage-kriterien, wobei die Grundidee hierbei ist, Sachverhalte als Graphen zu modellieren und dann eine ausreichende Überdeckung zu finden. [12, vgl. Software-testing S. 27 2.1] In 4.1.2 wurden gerichtete Graphen bereits eingeführt, daher können wir direkt fortfahren und verschiedene Kriterien definieren, die einen Graphen überdecken. Wir erklären zuerst verschiedene Techniken, die einen Graphen überdecken und erklären dann ihre Anwendung an Beispielen. Erst sortieren wir Graphcoverage ein im Kontext von Code-Coverage und bilden im zweiten Schritt eine Coverage für GraphQL.

5.1 Graphcoverage allgemein

Um Graphcoverage zu nutzen, verfeinern wir zuerst die allgemeine Definition von gerichteten Graphen. Ein gerichteter Graph ist ein Paar $G = (V, E)$ zweier disjunkter Mengen mit $E \subseteq V^2$ wobei alle Elemente aus E gerichtete Kanten sind. [vgl. 4.1.2] Die Definition erweitern wir nun mit:

Menge N von Knoten

Menge N_0 von Anfangsknoten, wobei $N_0 \subseteq N$

Menge N_f von Endknoten, wobei $N_f \subseteq N$

Menge E von Kanten, wobei E $\subseteq$ N x N. Hierbei ist die Menge als initx x targety definiert.

[12, 2.1 Overview]

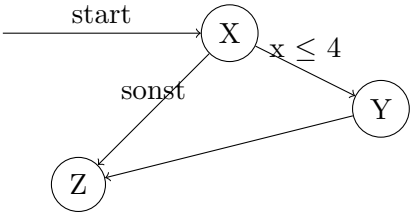
Mithilfe dieser Definition können nun zum Beispiel Kontrollflussgraphen abgebildet werden indem die Einstiegspunkte die Anfangsknoten sind und die Endknoten die Austrittspunkte. Ein Pfad innerhalb von eben definierten Graphen, mit möglicher Länge Null, der in einem Knoten $\mathrm{N}_0 startet und in einem Knoten N_f endet, nennt sich Testpfad [12, vgl. S. 28]$

5.2 Graphcoverage Kriterien

Mithilfe voriger Definition können wir nun Coveragekriterien entwickeln, die uns Testpfade liefern, die je nach Kriterium für eine spezielle Abdeckung des Graphens mit Test-Requirements sorgen.

5.2.1 Node Coverage

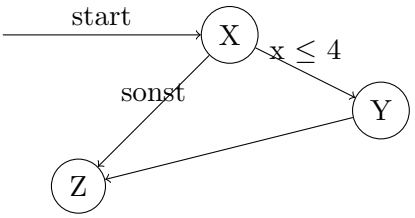
Node-Coverage ist ein Coveragekriterium, dass alle Knoten, die von N_0 erreichbar sind, in einem Graphen abdecken soll. Definieren wir folgenden, sehr einfachen Graphen:



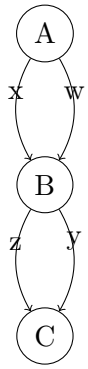
So wäre die Node-Coverage mit einem Test einzigen Test erfüllbar. Dieser müsste der Pfad $X- > Y- > Z$ sein. Es ist auch denkbar, dass wir zwei Pfade oder mehr nutzen allerdings erfüllt dieser Pfad schon unser Kriterium daher geben wir uns vorerst zufrieden. Wir sehen schnell, dass dieser Ansatz noch Lücken aufweist, da der Pfad $X- > Y- > Z$ das Kriterium erfüllt, allerdings wird eine Kante $X- > Z$ nicht im Test berücksichtigt und kann somit ungetestet bleiben. Wir führen also noch andere Kriterien ein, die eher geeignet wären.

5.2.2 Edge-Coverage

Edge-Coverage ist ein Coveragekriterium, dass die Kanten in einem Graphen abdecken soll. Ziel der Edge-Coverage ist es, dass jede Kante des Graphens durch mindestens einen Test abgedeckt wird. Um die Edge-Coverage für vorheriges Beispiel zu erreichen, benötigen wir schon zwei Routen. Der Graph:



wird über die Pfade $X- > Y- > Z$ und $X- > Z$ überdeckt. Edge-Coverage hat allerdings auch Probleme Graphen vollständig zu überdecken. Man nehme folgendes Beispiel:



Pfade die laut Edge-Coverage ausreichen um den Graphen zu überdecken wären:
$x \rightarrow z$
$w \rightarrow y$
Hierbei wird allerdings außer acht gelassen, dass in x auch Änderungen passieren können die Auswirkungen im Programm haben können. So sind die Routen $x- > y$ und $w- > z$ in der Edge-Coverage nicht berücksichtigt. Allerdings wären diese auch zu testen. Wir sehen also, dass wir immer noch kein ideales Kriterium gefunden haben.

5.2.3 Edge-Pair Coverage

Das Edge-Pair Coveragekrtierium ist eine Erweiterung der Edge-Coverage indem hier auch die Beziehungen von einzelnen Kanten untereinander berücksichtigt werden. Ziel dieses Coverage-Kriteriums ist es, dass alle möglichen Kantenpaare abgedeckt sind.

5.2.4 Prime-Path Coverage

5.3 Graphcoverage für Code

5.4 Graphcoverage für GraphQL

6 Testentwurf

Der allgemeine Testentwurf besteht aus zwei einzelnen Phasen. In der ersten Phase wird das GraphQL Schema analysiert und die Prime-Paths generiert. So haben wir grundlegendes Wissen darüber, welche Querys ausgeführt werden müssen damit jeder Bereich der API abgedeckt ist. In der zweiten Phase ...

6.1 erste Phase / GraphQL Analyse

Grundlage der Analyse einer GraphQL-API ist ihr Schema. Die gesamte erste Phase bezieht sich nur auf das Schema denn aus diesem können wir alle grundlegenden Test-Cases ermitteln die nötig sind um eine Überdeckung der Anfragen zu ermitteln. Es sei hier gesagt, dass nur die Überdeckung der Anfragen nicht bedeutet, dass die API hiermit vollständig getestet wird, hierdurch werden nur alle Anfragen erstellt, sodass jeder Knoten und jede Kante im definierten Schema mindestens einmal Betrachtung findet in einem Test. Die dahinterliegenden Resolver benötigen weitere Abdeckung hierzu jedoch mehr in Phase 2.

6.1.1 GraphQL in Graph übersetzen

Um ein GraphQL Schema in einen Graphen zu übersetzen, bedarf es mehrerer Schritte. Im GraphQL Standard implementiert jeder GraphQL-Client eine `parse()` Funktion. Diese werden wir auch nutzen, da wir hierdurch einen Graphen erhalten der für unsere Berechnungen auf dem Graphen passend ist. Die `parse()` Funktion führt im wesentlichen zwei Schritte aus:

Lexikalische Analyse Schema in Token zerlegen

Syntaktische Analyse Token in passende Graph-Repräsentation übersetzen

(Quelle X.Y.Z)

Endergebnis ist ein Abstract Syntax Tree (AST) (Quelle einfügen). Ein AST sieht je nach GraphQL-Client Plattform unterschiedlich, jedoch sehr ähnlich aus. Folgendes, sehr simples Schema:

```
type Query {
  user(id: Int): User
}

type User {
```

```
  id: Int
  name: String
}
```

wird in folgenden AST übersetzt (in Java-/Type-script ist der AST in json Format):

```
{
  "kind": "Document",
  "definitions": [
    {
      "kind": "ObjectTypeDefinition",
      "name": {
        "kind": "Name",
        "value": "Book"
      },
      "fields": [
        {
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "id"
          },
          "type": {
            "kind": "NamedType",
            "name": {
              "kind": "Name",
              "value": "Int"
            }
          }
        },
        {
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "title"
          },
          "type": {
            "kind": "NamedType",
            "name": {
              "kind": "Name",
              "value": "String"
            }
          }
        },
        {
```

```
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "author"
          },
          "type": {
            "kind": "NamedType",
            "name": {
              "kind": "Name",
              "value": "Author"
            }
          }
        }
      ]
    },
    {
      "kind": "ObjectTypeDefinition",
      "name": {
        "kind": "Name",
        "value": "Author"
      },
      "fields": [
        {
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "id"
          },
          "type": {
            "kind": "NamedType",
            "name": {
              "kind": "Name",
              "value": "Int"
            }
          }
        },
        {
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "name"
          },
          "type": {
            "kind": "NamedType",
```

```
            "name": {
              "kind": "Name",
              "value": "String"
            }
          }
        },
        {
          "kind": "FieldDefinition",
          "name": {
            "kind": "Name",
            "value": "written"
          },
          "type": {
            "kind": "ListType",
            "type": {
              "kind": "NonNullType",
              "type": {
                "kind": "NamedType",
                "name": {
                  "kind": "Name",
                  "value": "Books"
                }
              }
            }
          }
        }
      ]
    }
  ]
}
```


Die Ausgabe in diesem AST verrät uns für jede ÖbjectTypeDefinition"das wir hier einen Knoten des Graphens haben und in dem Fieldsëintrag kann man alle möglichen Verbindungen des Knotens finden.

6.1.2 Pfadgenerierung

Da wir im vorherigen Schritt eine geeignete Darstellung gefunden haben, um unseren Graphen zu repräsentieren können wir nun im ersten Schritt alle Pfade ausgehend vom Querytype innerhalb dieses Graphens finden. Um die Pfade zu ermitteln müssen wir lediglich wissen, welche Typen ein einzelner Knoten haben kann. In Kapitel (GraphQL Kapitel verlinken) wurde bereits auf alle möglichen Typen eingegangen. Hierbei sind für die Pfadgenerierung nur diese wichtig:

FieldDefiniton

NonNullType

ListType

ObjectTypeDefinition

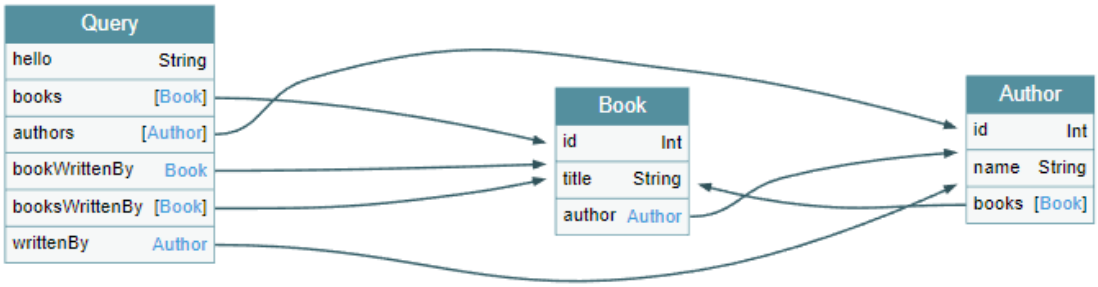
(Quelle X.Y.Z)

Aus unserem schon bekannten Schema:

```
type Book {
    id: Int
    title: String
    author: Author
}
type Author {
    id: Int
    name: String
    books: [Book]
}
type Query {
    # test query
    hello: String
    # all books
    books: [Book]
    # all authors
    authors: [Author]
    # a single book from a author name
    bookWrittenBy(name: String!): Book
    # all books from a author
    booksWrittenBy(name: String!): [Book]
    # a author for a book title
    writtenBy(title: String!): Author
}
```

können wir nun beginnen die Pfade zu generieren. Hierbei müssen wir nur Pfade generieren, die ihren Ursprung im Query Type haben denn andere Typen sind nicht initial abfragbar sondern nur durch Verkettung mit einer Operation vom Query Type. Jedes Feld vom Query Type ist ein Einstiegspunkt für einen Pfad. Ein Pfad führt weiter, wenn das Ergebnis eines Pfades eine ObjectTypeDefinition enthält. Also hier dementsprechend Äuthoröder "Book"

Besagtes Schema führt dann zu folgendem Graphen:



Ausgehend davon, dass jedes Feld vom Query-Type Ausgangspunkt eines Pfades ist, existieren in Iteration 0 die Pfade:

Iteration 0:

- hello
- books
- authors
- bookWrittenBy
- booksWrittenBy
- writtenBy

Iteration 1:

- hello
- books
- books →author
- authors
- authors →books
- bookWrittenBy →author
- booksWrittenBy →author
- writtenBy →book

Iteration 2:

- hello
- books

- books →author
- books →author →books
- authors
- authors →books
- authors →books →author
- bookWrittenBy
- bookWrittenBy →author
- bookWrittenBy →author -¿ book
- booksWrittenBy
- booksWrittenBy →author
- booksWrittenBy →author →book
- writtenBy
- writtenBy →book
- writtenBy →book →author

In Iteration 2 ist nun zu erkennen, dass sich Kreise bilden. Weitere Iterationen führen dazu, dass sich nur noch Kreise bilden innerhalb der definierten Struktur. D.h. Iteration 3,4 etc würde an neuen Pfaden nur noch Verlängerungen des Schemas "..... book →author →book →author ....."hervorbringen. Jede Kante im Graphen entsteht dadurch, dass das Feld keine Standarddatentyp Definition hat sondern einen Objekt-Type. Somit ist es möglich, mithilfe von folgendem Pseudo-Code, die Pfade alle zu erzeugen.

```
0. Importiere funktionen buildSchema(), parse() und printSchema()
1. Lese GraphQL-Schema String
2. Erstelle AST
3. pfade = []
4. Für alle Definitionen im AST mache:
  4.1 Wenn Definition.kind == "ObjectTypeDefinition"
      4.1.1 ermitteltePfade = ermittel alle Pfade ausgehend von diesem Knoten
      4.1.2 pfade[] = ermitteltePfade
  sonst ist Definition BasisDatentyp -> Pfadende
5. return pfade
```

Endergebnis dieser Funktion sollten exakt Iteration 2 entsprechen.

6.1.3 Filtern der Prime-Paths

Da wir nun eine Liste aller möglichen Pfade haben, müssen wir diese nur noch nach PrimePaths filtern. Wie in (Kapitel verlinken) bereits erwähnt, sind PrimePaths die längsten Pfade, die kein Teilpfad eines anderen Pfades sind. Hierzu können wir eine einfache Funktion entwickeln, die alle nicht Prime Paths"herausfiltert. Diese Funktion muss hierfür jeden errechneten Pfad einmal überprüfen ob dieser Pfad ein Teilpfad eines anderen Pfades ist. Sollte der Pfad ein Teilpfad sein, so ist dieser kein PrimePath andernfalls handelt es sich um einen PrimePath und dieser wird behalten. Folgender Pseudo-Code übernimmt die Filterung der Pfade:

```
Input: Pfadliste
0. Variable primePaths: []
1. Für alle pfade aus Pfadliste:
  1.1 Für alle andererPfad aus Pfadliste
    1.1.1 Wenn istKeinTeilpfad(pfad, andererPfad)
          primePaths.push(pfad)
2. return primePaths
# ausgehend davon, dass pfade als Liste [1,2,3] gespeichert sind.
# isSubarray sollte vordefiniert sein in diversen Sprachen
Function istKeinTeilpfad(pfad, andererPfad):
  return !isSubarray(pfad, andererPfad)
```

Wendet man die Filterung nun auf unsere Liste aus Iteration 2 an, sollte sich folgende, gefilterte Liste ergeben:

- hello
- books →author
- authors →books →author
- bookWrittenBy →author →book
- booksWrittenBy →author →book
- writtenBy →book →author

Dies sind dann die Prime-Paths des Schemas. Mithilfe dieser Pfade haben wir jeden Knoten und jede Kante mindestens einmal in einer Query berücksichtigt. Aus dieser Liste können wir nun fortfahren und unsere Tests entwickeln.

6.2 zweite Phase / Pfade untersuchen und Tests für resolver entwickeln

Aus den gefundenen Pfaden entwickeln wir nun die Tests. Wir werden weiterhin das Beispiel von vorher bentuzen um zu zeigen, wie die Testentwicklung für unser Schema aussieht. Jeder gefundene Prime-Path wird nun so untersucht, dass er

7 Testautomatisierung

Hi

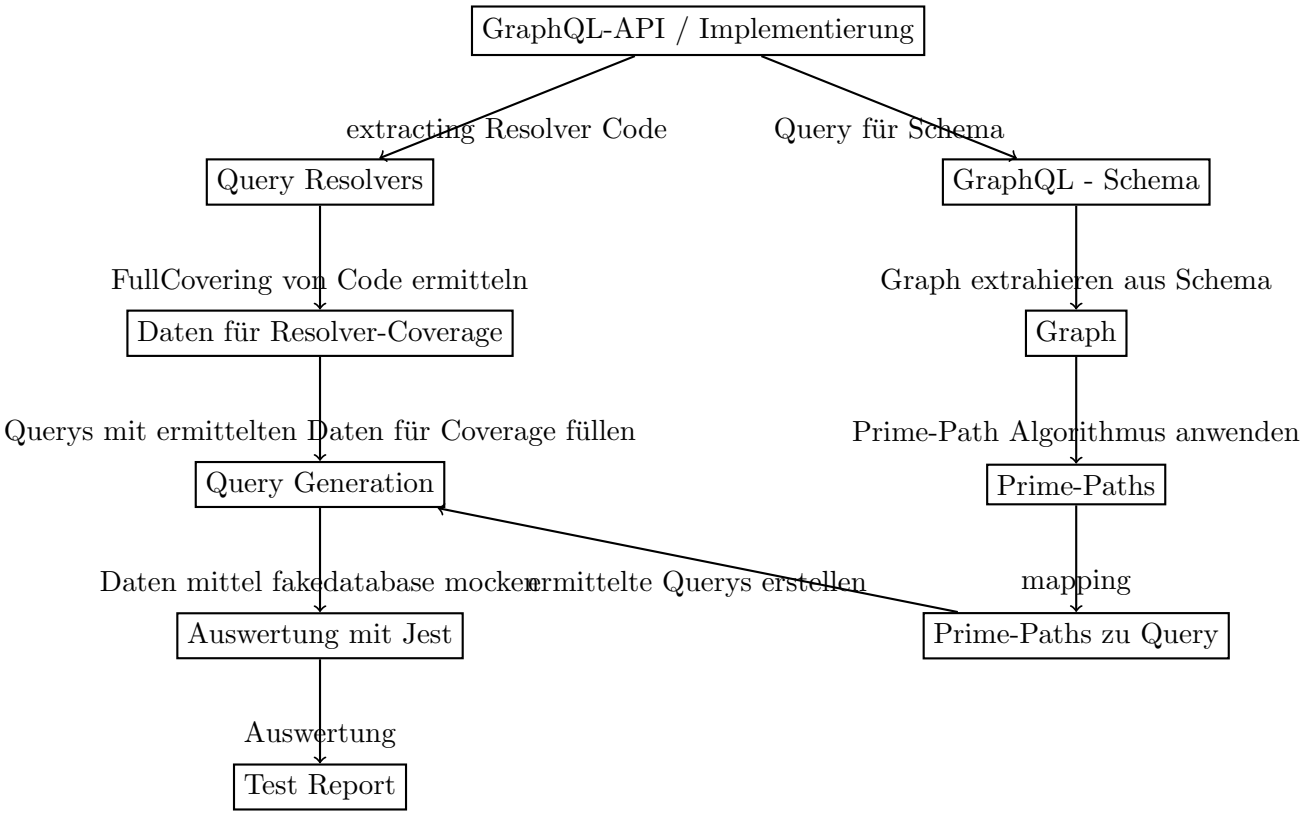
8 Praxis

Im folgenden wird die praktische Umsetzung der vorher erarbeiteten Theorie behandelt. Hierzu wurde/wird ein Tool geschrieben, das aufgrund eines GraphQL-Schemas automatisiert Tests erzeugt. Diese Tests werden dann ausgeführt und ausgewertet mit den entsprechenden Verbesserungen.

8.1 Toolchain

Da GraphQL ein Standard für diverse Sprachen ist und das mocken"von Daten essentiell zum testen ist, kann der Teil der Testgenerierung und Auswertung nur sprachspezifisch stattfinden. Es können somit nicht alle Sprachen berücksichtigt werden. Da GraphQL vor allem in der Webentwicklung verwendet wird, bezieht sich das Testtool auf JavaScript/TypeScript mit der Testbibliothek Jest. Als Server für die Verarbeitung wird ApolloServer genutzt, es ist jedoch denkbar, dass man jeden Server einsetzen kann insofern dieser eine executeOperation() implementiert die einen String als Query akzeptiert. Um Daten zu generieren wird auf das Tool Factory.ts zurückgegriffen (kann sich noch ändern), dieses ermöglicht es "Baupläneänzulegen und dann beliebig viele Objekte zu erschaffen. Die benötigte Toolchain ist also sehr klein, sie benötigt nur Factory.ts für die Datengenerierung, Jest für die Ausführung der generierten Tests und ApolloServer für die Ausführung der GraphQL-Resolver.

8.2 Ablauf der Generierung



8.3 Requirements an das Tool

9 zukünftige Arbeit

Hisdfsdf

10 Fazit

Hi

11 Glossar

Im Text werden einige Fachbegriffe genutzt. Hier findet sich deren Erklärung

Begriff Erklärung

IEEE/ACM

HTTP

HTTP-Request

API

REST

GraphQL Waren-Managment-System; Ein System das das Lager verwaltet und die kompletten Betriebsprozesse eines Lagers abbilden kann

Overfetch

Underfetch

Evolutionärer Algorithmus

Literaturverzeichnis

[1] *Evo Master*, https://github.com/EMResearch/EvoMaster, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[2] S. Karlsson, A. Causevic und D. Sundmark, *QuickREST: Property-based Test Generation of OpenAPI-Described RESTful APIs*, 2019. arXiv: 1912.09686 [cs.SE].

[3] *Rest Test Gen*, https://github.com/SeUniVr/RestTestGen/, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[4] D. S. Stefan Karlsson Adnan Causevic, "Automatic Property-based Testing of GraphQL APIs," *International Conference on Automation of Software Test*, 2021.

[5] *State of GraphQL 2022 survey*, https://blog.graphqleditor.com/state-of-graphql-2022, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[6] *Serene - Clojure.Spec from GraphQL Schema*, https://github.com/paren-com/serene, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[7] *Clojure Spec - Data structure definiton*, https://clojure.org/guides/spec, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[8] *Mali - Data Driven Specification Library for Clojure*, https://github.com/metosin/malli, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[9] A. Belhadi, M. Zhang und A. Arcuri, *White-Box and Black-Box Fuzzing for GraphQL APIs*, 2022. arXiv: 2209.05833 [cs.SE].

[10] *GraphQL is the better REST*, https://www.howtographql.com/basics/1-graphql-is-the-better-rest/, zuletzt besucht: 15.06.2023.

[11] *GraphQL-Specification*, https://spec.graphql.org/June2018/, zuletzt besucht: 16.06.2023.

[12] P. A. J. Offutt, *Introduction to Software Testing*. 2008, ISBN: 978-0-521-88038-1.

[13] R. Diestel, *Graphentheorie*. 2000, ISBN: 3-540-67656-2.

Onlineressourcen wurden am 18. Juni 2023 auf ihre Verfügbarkeit hin überprüft.