

Universität Augsburg
Fakultät für Angewandte Informatik

**Modellbasierte Testautomatisierung eines
verteilten, adaptiven Load-Balancing-Systems**

Masterarbeit

im Studiengang Informatik

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

von

Mat.-Nr.: 1450117

Datum: 16. Juli 2018

Betreuer: M.Sc. Benedikt Eberhardinger

Erstgutachter: Prof. Dr. Wolfgang Reif

Zweitgutachter: Prof. Dr. Bernhard Bauer

Zusammenfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Verzeichnisse	VI
Abbildungen	VI
Listings	VI
Tabellen	VII
Glossar und Abkürzungen	VIII
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand der Technik	2
2.1. Safety Sharp	2
2.1.1. Aufbau eines Modells	2
2.1.2. Ausführung eines Modells mit S#	3
2.2. Apache Hadoop	4
2.3. Adaptive Komponente in Hadoop	7
2.3.1. MARP-Wert	7
2.3.2. Analyse der Selfbalancing-Komponente	9
2.4. Plattform Hadoop-Benchmark	10
3. Aufbau und Ablauf der Fallstudie	13
3.1. Grundlegender Versuchsaufbau	13
3.2. Anforderungen an das Cluster und Testsystem	14
3.2.1. Funktionale Anforderungen an das Cluster	15
3.2.2. Anforderungen an das Testsystem	15
3.3. Planung der und der Evaluation	16
3.3.1. Behauptungen und Variablen	16
3.3.2. Generierung der Testkonfigurationen	17
3.3.3. Organisation und Ausgabe der Daten	18
4. Entwicklung des Testmodells	20
4.1. Grundlegende Architektur des Testmodells	20
4.2. Implementierung des YARN-Modells	22
4.2.1. Die Klassen Model und ModelSettings	23
4.2.2. Relevante YARN-Komponenten	24
4.2.3. Implementierung der Komponentenfehler	26
4.2.4. Aktivierung von Komponentenfehler	28
4.2.5. Interface IYarnReadable und Monitoring	29
4.2.6. Constraints der YARN-Komponenten	31
4.2.7. Implementierung des Clients	32
4.2.8. Implementierung des Controllers	33
4.2.9. Implementierung des Oracles	34

4.3.	Entwicklung des Treibers	35
4.3.1.	Grundlegender Aufbau und Integration im YARN-Modell	36
4.3.2.	Entwicklung der Parser	37
4.3.3.	Entwicklung der Connectoren	41
4.3.4.	Implementierung der SSH-Verbindung	44
4.4.	Umsetzung des realen Clusters	44
4.4.1.	Grundlegender Aufbau	45
4.4.2.	HostMode des Clusters	45
4.4.3.	Setup- und Startscripte	46
5.	Implementierung der Benchmarks	48
5.1.	Übersicht möglicher Anwendungen	48
5.1.1.	Mapreduce Examples	48
5.1.2.	Intel HiBench	49
5.1.3.	SWIM	49
5.1.4.	Jobclient-Tests	50
5.2.	Entwicklung des Transitionssystems	50
5.2.1.	Auswahl der Benchmarks	50
5.2.2.	Entwicklung der Markow-Kette	53
5.3.	Entwicklung des Benchmark-Controllers	53
5.3.1.	Implementierung von Benchmarks und Transitionssystem	54
5.3.2.	Auswahl der nachfolgenden Benchmarks	55
5.3.3.	Vorabgenerierung von Eingabedaten	57
6.	Implementierung und Ausführung der Tests	58
6.1.	Implementierung der Simulation	58
6.1.1.	Grundlegender Aufbau	58
6.1.2.	Initialisierung des Modells	60
6.1.3.	Weitere mit der Simulation zusammenhängende Methoden . . .	63
6.1.4.	Ablauf eines und der Testfälle	63
6.2.	Generierung der Mutanten	65
6.3.	Auswahl der Testkonfigurationen	67
6.4.	Implementierung der Tests	69
7.	Evaluation der Ergebnisse	72
7.1.	Statistische Kenndaten	72
7.2.	Zusammenfassung der Ergebnisse	73
7.3.	Betrachtung der MARP-Werte	75
7.4.	Erkennung der Mutanten	76
7.5.	Betrachtung der Komponentenfehler	77
7.5.1.	Aktivierte und deaktiverte Komponentenfehler	77
7.5.2.	Nicht erkannte, injizierte bzw. reparierte Komponentenfehler . .	79
7.6.	Rekonfiguration des Clusters nicht möglich	80
7.6.1.	Testkonfigurationen 3 bis 6	80
7.6.2.	Testkonfigurationen 15 und 16	81
7.6.3.	Testkonfigurationen 19 bis 22	81
7.6.4.	Testkonfigurationen 27 und 28	82
7.6.5.	Testkonfigurationen 31 und 32	83
7.7.	Betrachtung der Anwendungen	84
7.7.1.	Aufgrund von Fehlern abgebrochene Anwendungen	84

7.7.2. Nicht gestartete Anwendungen	86
7.7.3. Nicht ausreichend Submitter	86
7.8. Nicht erkannte oder gespeicherte Daten des Clusters	87
7.8.1. Nicht erkannte Nodes auf Host 2	87
7.8.2. Diagnostic-Daten von Anwendungen	88
8. Reflexion und Abschluss	89
Literatur	90
A. CLI-Befehle von Hadoop	95
B. REST-API von Hadoop	98
C. Benötigte Befehle des Setup-Scriptes	100
D. Ausgabeformat des Programmlogs	101
E. Übersicht der ausgeführten Tests	105

Verzeichnisse

Abbildungen

2.1. Architektur des YARN-Frameworks	5
2.2. Architektur des HDFS	7
2.3. LoJP und LoJT in Hadoop	8
2.4. High-Level-Architektur von Hadoop-Benchmark	11
4.1. Grundlegende Architektur des Testsystems	20
4.2. Grundlegender Aufbau des YARN-Modells	22
4.3. Für die Fallstudie relevante, implementierte YARN-Komponenten . . .	24
4.4. Vererbungshierarchie der Docker-Images in Hadoop-Benchmark	44
4.5. Cluster-Setup bei der Nutzung des Multihost-Modes	46

Listings

2.1. Grundlegender Aufbau einer S#-Komponente.	2
4.1. Implementierung der Eigenschaft AppId	25
4.2. Injizierung des Komponentenfehlers NodeDeadFault	26
4.3. Berechnung der Aktivierung von Komponentenfehlern	28
4.4. Implementierung der Methode MonitorStatus() in der Klasse YarnApp	30
4.5. Definition der Constraints in YarnApp	31
4.6. Auswahl und Start des nachfolgenden Benchmarks	32
4.7. Update()-Methode des Controllers	33
4.8. Validieren der Constraints durch das Oracle	34
4.9. Prüfung nach der Möglichkeit weiterer Rekonfigurationen	35
4.10. Implementierte Regex-Pattern im CmdParser	38
4.11. Überladungen der Methode ParseJavaTimestamp()	38
4.12. Entwickelter Konverter für Java-Zeitstempel zur Nutzung mit Json.NET	40
4.13. Konvertierung und Rückgabe der Daten durch den RestParser	41
5.1. Wesentliche Methoden der Klasse Benchmark	54
5.2. Definition der verfügbaren Benchmarks im BenchmarkController	55
5.3. Implementierung des Transitionssystems im BenchmarkController . . .	55
5.4. Auswahl des nachfolgenden Benchmarks	56
6.1. Simulation in dieser Fallstudie	58
6.2. Initialisierung des Modells für die Simulation	60
6.3. Ermitteln der Komponentenfehler mit dem NodeFaultAttribute	62
6.4. Simulation der auszuführenden Benchmarks	63
6.5. Zur Definition einer Testkonfiguration relevante Felder	67
6.6. Ermittlung der für die Testkonfigurationen genutzten Basisseeds	68
6.7. Methode zur Ausführung der Testfälle	69
6.8. Implementierung der Testkonfigurationen	70

6.9. Bestimmung des Dateinamens zur Umbenennung der Logdateien	71
A.1. CLI-Ausgabe der Anwendungsliste	95
A.2. CLI-Ausgabe des Reports einer Anwendung	95
A.3. Starten einer Anwendung in Hadoop-Benchmark	96
A.4. Vorzeitiges Beenden einer Anwendung	97
B.1. REST--Ausgabe aller Anwendungen vom RM	98
B.2. REST-Ausgabe aller Ausführungen einer Anwendung vom TLS	99
C.1. Benötigte Befehle eines Setupscriptes	100
D.1. Ausgaben einer Simulation im Programmlog	101

Tabellen

5.1. Entwickelte Markov-Kette für die Anwendungs-Übergänge in Tabellenform	54
7.1. Finale MARP-Werte der Testkonfigurationen ohne Mutanten.	75
7.2. Übersicht der nicht erkannten, injizierten/reparierten Komponentenfehler	79
7.3. Status der Nodes im fünften Testfall der Tests 13 bis 16	81
7.4. Auslastungen und Komponentenfehler in Node 1 der Tests 19 bis 22 . .	82
E.1. Übersicht der ausgeführten Testkonfigurationen	106

Glossar und Abkürzungen

AM ApplicationManager

Anwendung Ein auf dem Hadoop-Cluster ausgeführtes Programm.

AppMstr ApplicationMaster

Attempt Ausführungsinstanz einer Anwendung auf dem Hadoop-Cluster.

CLI Kommandozeile

Container 1. Ausführungsinstanz eines Tasks auf dem Hadoop-Cluster. 2. Ausgeführte Instanz eines Docker-Images.

DCCA Deductive Cause-Consequence Analysis

HDFS Hadoop Distributed File System

MARP `maximum-am-resourcepercent`

MC Model Checking

MC Model Checker

MR MapReduce

Mutationstest Test, bei denen das zu testende Programm verändert wird. Ziel hierbei ist es, Fehler im Programm oder Testsystem zu finden (vgl. Abschnitt 6.2).

NM NodeManager

Regex Regular Expression

REST Abkürzung für *Representational State Transfer*. Programmierparadigma um maschinenlesbare Schnittstellen, meist für Webservices, bereitzustellen.

RM ResourceManager

S# Safety Sharp

SuT System under Test

SWIM Statistical Workload Injector for Mapreduce

System under Test Das mit einem Test zu testende System selbst.

Test Eine Ausführung einer Testkonfiguration mit mehreren Testfällen. Um mehrmalige Ausführungen einer Testkonfiguration zu kennzeichnen, wurde der jeweiligen Konfiguration eine weitere Ziffer angehängt. Alle ausgeführten Test sind in Anhang E zu finden.

Testfall Ein ausgeführter Simulations"-Schritt. Ein Testfall wird während der Laufzeit basierend auf einer zugrundeliegenden Testkonfiguration sowie den Ereignissen und Ergebnissen zuvor ausgeführter Testfälle der zugrundeliegenden Konfiguration generiert. In einem Testfall können daher unterschiedliche Komponentenfehler aktiviert und deaktiviert sowie unterschiedliche Anwendungen gestartet werden, auch wenn sie durch die gleiche Testkonfiguration generiert wurden (vgl. Abschnitt 6.1.4).

Testkonfiguration Eine Konfiguration bestehend aus mehreren Parametern, die einen Test definieren. Die Nummerierung der in Abschnitt 6.3 definierten Konfigurationen erfolgte fortlaufend.

TLS Timeline Server

YARN Yet Another Resource Negotiator

Abkürzungen der Benchmarks (vgl. Abschnitt 5.2.1)

dfw TestDFSIO -write	tsr terasort
rtw randomtextwriter	pi pi
tg teragen	pt pentomino
dfr TestDFSIO -read	tms testmapredsort
wc wordcount	tv teravalidate
rw randomwriter	sl sleep
so sort	fl fail

1. Einleitung

Im Bereich der Softwaretests wird heutzutage sehr viel mit automatisierten Testverfahren gearbeitet. Dies ist insofern logisch, als dass diese Testautomatisierung einerseits Aufwand und damit andererseits direkt Kosten einer Software einspart. Daher gibt es vor allem im Bereich der Komponententests zahlreiche Frameworks, mit denen Tests einfach und automatisiert erstellt bzw. ausgeführt werden können. Ein Beispiel für ein solches Testframework wäre das *xUnit*-Framework, zu dem u. A. JUnit¹ für Java und NUnit² für .NET zählen. Dabei werden zunächst einzelne Testfälle erstellt und können im Anschluss mit der jeweils aktuellen Codebasis jederzeit ausgeführt werden. Automatisierte Tests können auch dazu genutzt werden, um einen einzelnen Test mit verschiedenen Eingaben durchzuführen. Dadurch können verschiedene Eingabeklassen (wie negative oder positive Ganzzahlen) mit sehr geringem Aufwand in einem Test genutzt werden und somit verschiedene Testfälle direkt ausgeführt werden, wodurch eine massive Kosteneinsparung einhergeht [1].

Es gibt aber nicht nur Frameworks für Komponententests, sondern auch für modellbasierte Testverfahren wie z. B. dem Model Checking (MC). Beim MC wird ein Modell mithilfe eines entsprechenden Frameworks automatisiert auf seine Spezifikation getestet und geprüft, unter welchen Umständen diese verletzt wird [2, 3].

In dieser Masterarbeit soll daher nun ein verteiltes, adaptives Load-Balancing-System getestet werden. Hauptziel ist es, zu ermitteln, wie ein modellbasierter Testansatz auf ein komplexes Beispiel übertragen werden kann. Dafür wird zunächst ein reales System als vereinfachtes Modell nachgebildet und anschließend mithilfe eines MC getestet. Es soll dabei auch ermittelt werden, wie ein reales System in das Modell eingebunden werden kann und wie bei Problemen mit asynchronen Prozessen innerhalb des verteilten Systems umgegangen werden muss.

vielleicht Testing MapReduce-Based Systems einbringen?

¹<https://junit.org>

²<https://nunit.org/>

2. Grundlagen und Stand der Technik

Im folgenden werden zunächst die genutzten Frameworks und Tools erläutert, die zur Durchführung der Fallstudie benötigt wurden. Dies sind neben Hadoop selbst auch die hierfür entwickelte, und in dieser Fallstudie genutzte, selbst-adaptive Komponente für Hadoop, sowie die Plattform Hadoop-Benchmark, die zur einfachen Ausführung eines Hadoop-Clusters dient. Zunächst wird jedoch das Framework S# vorgestellt, das zur Durchführung der Fallstudie genutzt wurde.

2.1. Safety Sharp

Safety Sharp (S#) ist ein am Institute for Software & Systems Engineering der Universität Augsburg entwickeltes Framework zum Testen und Verifizieren von Systemen und Modellen. Da es in C# entwickelt wurde und C# auch zum Entwickeln von Modellen und dazugehörigen Testszenarien genutzt wird, können zahlreiche Features des .NET-Frameworks bzw. der Sprache C# im Speziellen genutzt werden. S# vereint dabei die Simulation, die Visualisierung, modellbasierte Tests sowie die Verifizierung der Modelle durch einen Model Checker (MC) [3, 4]. Dadurch können alle Schritte einer vollständigen Analyse inkl. Modellierung direkt im Visual Studio ausgeführt werden und somit auch alle Features der IDE und .NET, wie z. B. die Debugging-Werkzeuge, genutzt werden. Um entsprechende Analysen zu gewährleisten, hat das Framework jedoch auch einige Einschränkungen, wodurch z. B. Schleifen und Rekursionen nur eingeschränkt bzw. nicht möglich sind. Eine der größten Einschränkungen ist allerdings, dass während der Laufzeit keine neuen Objektinstanzen innerhalb des zu testenden Modells erzeugt werden können, sodass alle benötigten Instanzen bereits während der Initialisierung des Modells erzeugt werden müssen [3].

2.1.1. Aufbau eines Modells

Hier Oracle, Modell selbst und so rein

Um nun ein System testen zu können, muss dieses zunächst mithilfe von C#-Klassen und -Instanzen modelliert werden. Die dafür verwendeten Modelle sind meist stark vereinfacht und bilden nur die wesentlichen Aspekte der realen Systeme ab. Für einen korrekten Test ist es jedoch wichtig, dass das Modell des Systems vergleichbar mit dem echten System ist.

Folgendes Beispiel zeigt den typischen, grundlegenden Aufbau einer S#-Komponente:

```
1 public class MyComponent : Component
2 {
```

```
3 // fault definition, also possible: new PermanentFault()
4 public readonly Fault MyFault = new TransientFault();
5
6 // interaction logic (Fields, Properties, Methods...)
7
8 // fault effect
9 [FaultEffect(Fault = nameof(MyFault))]
10 internal class MyFaultEffect : MyComponent
11 {
12     // fault effect logic
13 }
14 }
```

Listing 2.1: Grundlegender Aufbau einer S#-Komponente.

Jede Komponente des Modells muss von `Component` erben, um als S#-Komponente definiert zu sein. Jede Komponente kann nun temporäre (`TransientFault`) oder dauerhafte (`PermanentFault`) Komponentenfehler enthalten, welche zunächst innerhalb der Komponente als Felder definiert werden. Der Effekt eines Komponentenfehlers wird anschließend in der entsprechenden Effekt-Klasse definiert, welche von der Hauptklasse (hier `YarnNode`) erbt und mithilfe des Attributs `FaultEffectAttribute` dem dazugehörigen Komponentenfehler zugeordnet wird [4].

2.1.2. Ausführung eines Modells mit S#

Um die Modelle zu testen, kommen in S# verschiedene Werkzeuge zum Einsatz. Eines davon ist eine reine Simulation, bei der das Framework nur einen Ausführungspfad ausführt und dabei keine Komponentenfehler aktiviert bzw. die Aktivierung *manuell* gesteuert werden kann. Ein weiterer Nutzen liegt in der Möglichkeit, im ausgeführten Ausführungspfad zeitliche Abläufe zu berücksichtigen, da hier das Modell Schritt für Schritt ausgeführt wird. Hierbei wird für jede im Modell genutzte Komponente pro Schritt einmal die jeweilige Methode `Update()` aufgerufen, in der die jeweiligen Komponenten ihre Aktivitäten durchführen [4].

Ein anderes wichtiges Werkzeug von S# ist die Deductive Cause-Consequence Analysis (DCCA), welche eine vollautomatische und MC-basierte Sicherheitsanalyse ermöglicht. Dabei wird selbstständig die Menge der aktivierten Komponentenfehler ermittelt, mit denen das Gesamtsystem nicht mehr rekonfiguriert werden kann und somit ausfällt. Je nach Konfiguration können dazu auch Heuristiken genutzt werden, welche die Analyse beschleunigen und genauer machen können [5]. Dabei werden die verschiedenen aktivierten Komponentenfehler während der Analyse in tolerierbare und nicht-tolerierbare Fehler unterschieden. Tolerierbare Komponentenfehler werden dazu genutzt, die Grenzen der Selbstkonfiguration des Systems zu ermitteln. Dabei wird für jeden Systemzustand nach einer Rekonfiguration durch die DCCA eine neue Fehlermenge ermittelt, mit der

das System gerade noch lauffähig ist. Das Auftreten eines tolerierbaren Komponentenfehler ist also gleichbedeutend mit einem einfachen Fehler im System, welcher die gesamte Funktionsweise des Systems nicht massiv einschränkt und eine Rekonfiguration noch ermöglicht. Sobald jedoch ein Fehler auftritt, durch den eine Rekonfiguration des Systems nicht mehr möglich ist, wurde ein nicht-tolerierbarer Fehler gefunden, durch den das System nicht mehr funktionsfähig ist [3].

Das dritte Werkzeug zur Ausführung von Modellen in S# ist der MC selbst. Hierbei kann der in S# bereits enthaltene, oder alternativ *LTSmin*¹ genutzt werden [6]. Beim MC werden in einem *brute-force*-ähnlichem Verfahren alle möglichen Zustände und Ausführungspfade in einem Modell mit einer endlichen Anzahl an Zuständen getestet. Dadurch wird es ermöglicht, verschiedene Eigenschaften eines System zu testen und Fehler (z.B. Deadlocks) zu erkennen [2].

2.2. Apache Hadoop

ApacheTMHadoop®² ist ein Open-Source-Software-Projekt, welches die Verarbeitung von großen Datenmengen auf einem verteilten System ermöglicht. Hadoop wird von der *Apache Foundation* entwickelt und stellt und enthält verschiedene vollständig skalierbare Komponenten. Es ist daher möglich, ein Hadoop-Cluster auf nur einem einzelnen PC, aber auch verteilt auf zahlreichen Servern auszuführen. Hadoop ermöglicht es dadurch, sehr einfach Anwendungen auszuführen, um große Datenmengen zu verarbeiten. Die für das Cluster, und damit den Anwendungen, verfügbaren Ressourcen beschränken sich lediglich auf die Summe der verfügbaren Ressourcen aller Hosts, auf denen das Cluster ausgeführt wird.

Hadoop besteht aus folgenden Kernmodulen [7]:

Hadoop Common

Gemeinsam genutzte Kernkomponenten

Hadoop YARN (Yet Another Resource Negotiator)

Framework zur Verteilung und Ausführung von Anwendungen und das dazugehörige Ressourcen-Management

Hadoop Distributed File System

Kurz HDFS, verteiltes Dateisystem

Hadoop MapReduce

Kurz MR, Implementierung des MR-Ansatzes zum Verarbeiten von großen Datenmengen, nutzt YARN zur Ausführung der Anwendungen

¹<http://ltsmin.utwente.nl/>

²<https://hadoop.apache.org/>

Aufgrund seiner Verbreitung stellt Hadoop eine der wichtigsten Implementierungen des MR-Ansatzes dar [8]. Die Eingabe- und Ausgabedaten sind hierbei als *Key-Value*-Paare definiert, die mithilfe des MR-Frameworks verarbeitet werden. Hierbei werden zunächst die eingelesenen Eingabedaten in kleine und dadurch einfach zu verarbeitende Datenmengen aufgeteilt. Die geteilten Daten werden dann in mehreren, parallel ausgeführten Map-Tasks verarbeitet und zwischengespeichert. Die zwischengespeicherten Daten werden anschließend von einem oder mehreren Reduce-Tasks zusammengeführt und in die Ausgabedateien geschrieben. Das Framework ist hierbei sehr Fehlertolerant, da ein fehlerhafter Task jederzeit neu gestartet werden kann [9, 10]. Zur Speicherung der Ein-, Zwischen- und Ausgabedaten wird im Falle von Hadoop das HDFS genutzt [11]. Für weitere Details zum MR-Framework sei hier auf [9] und [10] verwiesen, eine ausführliche Betrachtung des MR-Frameworks mit Vorteilen und Problemen lässt sich in [12] finden.

Da das MR-Framework bzw. seine Implementierung in Hadoop nicht perfekt ist und in der Praxis zum Teil auch zweckentfremdet wurde, wurde in [13] das **YARN**-Framework vorgestellt. Die Kernidee ist hierbei die Trennung von Ressourcenmanagement und Scheduling vom eigentlichen Programm. In diesem Kontext bildet der MR-Ansatz eine mögliche Anwendung, die mithilfe des YARN-Frameworks ausgeführt wird [13].

Ein Hadoop-Cluster mit dem YARN-Framework besteht aus zwei wesentlichen Komponenten, dem *Controller* mit Resource Manager (RM) und den angeschlossenen *Nodes*:

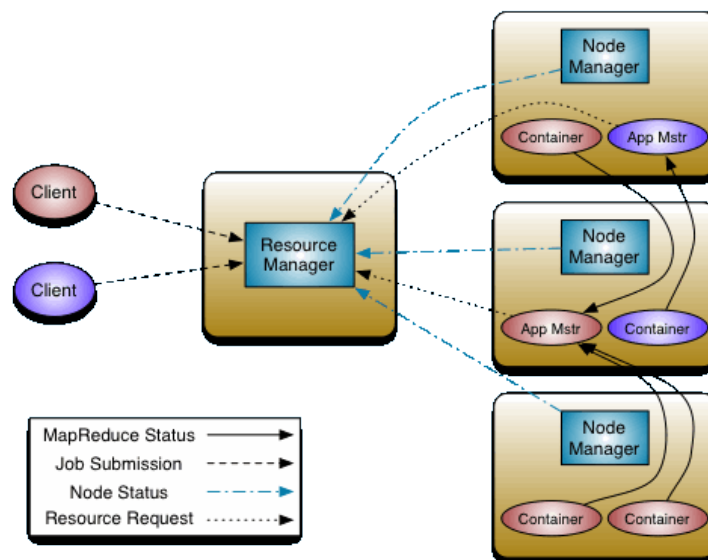


Abbildung 2.1.: Architektur des YARN-Frameworks (entnommen aus [14])

Der RM dient hierbei als *Load-Balancer* für das gesamte Cluster und besteht aus dem Application Manager (AM) und dem *Scheduler*, die eigentliche Ausführung der Anwendungen findet auf den Nodes statt. Der AM ist für die Annahme und Ausführung von einzelnen Anwendungen zuständig, denen der Scheduler die dafür notwendigen Ressourcen im Cluster zuteilt. Jeder Node besitzt einen Node Manager (NM), der für

die Überwachung der Ressourcen auf dem jeweiligen Node sowie der auf dem Node ausgeführten Anwendungs-Container zuständig ist und diese Daten dem RM übermittelt.

Jede YARNAnwendung bzw. Job besteht aus einer oder mehreren Ausführungsinstanzen, genannt Attempts. Jeder Attempt besitzt einen eigenen ApplicationMaster (AppMstr), welcher das Monitoring der Anwendung und die Kommunikation mit dem RM und NM übernimmt und die dafür benötigten Informationen bereitstellt [14]. Die eigentliche Ausführung einer Anwendung findet in den bereits erwähnten *Containern* statt, die jeweils einem Attempt zugeordnet sind. Container können auf einem beliebigen Node ausgeführt werden und repräsentieren die Ausführung eines Tasks innerhalb der Anwendung.

Zu erwähnen ist hier zudem, dass die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten nicht in allen Fällen in Echtzeit statt findet. Vor allem das Prüfen des generellen Node-Zustandes durch den RM wird bei einer Standard-Konfiguration in periodischen Abständen von jeweils mehreren Minuten durchgeführt. Sollte der NM bei solchen Status-Abfragen zunächst nicht reagieren, wird mehrere Minuten gewartet, bis der Node als defekt erkannt wird. Ähnlich verhält es sich bei Zustandsabfragen an den AppMstr [15].

Ein weiterer Bestandteil von Hadoop bzw. YARN ist der Timeline Server (TLS). Er ist speziell dafür entwickelt, die Metadaten und Logs der YARNAnwendungen zu speichern und jederzeit, also als Anwendungshistorie, auszugeben [16].

Zum Steuern des Clusters bzw. dem Monitoring der mithilfe von YARN ausgeführten Anwendungen stellt Hadoop drei Schnittstellen zur Verfügung. Dies sind eine graphische Weboberfläche, was zugleich auch die wichtigste Schnittstelle darstellt, entsprechende Befehle für die Kommandozeile (engl. *Command-line interface*, kurz CLI), sowie eine REST-API. Während sich die Weboberfläche zur menschlichen Interaktion oder zum Finden von Fehlern eignet, dienen die CLI-Befehle vor allem zum Steuern des Clusters und die REST-API zur automatisierten Rückgabe der Daten des Clusters zur Nutzung in anderen Programmen [17–20].

Das **HDFS** basiert auf einer ähnlichen Architektur wie YARN und besitzt ebenfalls einen Controller und mehrere Nodes:

Der *NameNode* dient als Controller für die Verwaltung des Dateisystems und reguliert den Zugriff auf die darauf gespeicherten Daten. Unterstützt wird der NameNode vom *Secondary NameNode*, der Teile der internen Datenverwaltung des HDFS durchführt [22]. Die Daten selbst werden in mehreren Blöcke aufgeteilt auf den *DataNodes* gespeichert. Um den Zugriff auf die Daten im Falle eines Node-Ausfalls zu gewährleisten, wird jeder Block auf anderen Nodes repliziert. Dateioperationen (wie Öffnen oder Schließen) werden direkt auf den DataNodes ausgeführt. Sie sind darüber hinaus auch dafür verantwortlich, dass die gespeicherten Daten gelesen und beschrieben werden können [21, 23].

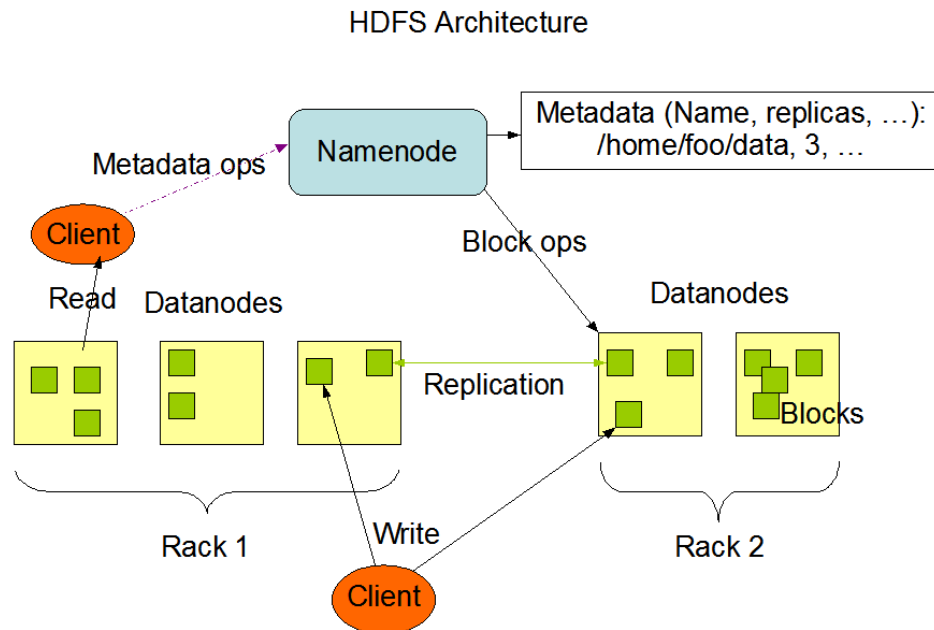


Abbildung 2.2.: Architektur des HDFS (entnommen aus [21])

Das Überprüfen der DataNodes durch den NameNode erfolgt genauso wie bei den entsprechenden YARN-Komponenten periodisch im Abstand von mehreren Minuten. Auch hier dauert es bei einer Standard-Konfiguration daher mehrere Minuten, bis erkannt wird, wenn ein DataNode nicht mehr verfügbar ist [24].

2.3. Adaptive Komponente in Hadoop

Eine normale Hadoop-Installation besitzt keine adaptive Komponente, sondern rein statische Einstellungen. Um damit Hadoop zu optimieren, müssen die Einstellungen daher immer manuell auf den jeweils benötigten Anwendungstyp angepasst werden. Dazu gibt es verschiedene Scheduler, den *Fair Scheduler*, welcher alle Anwendungen ausführt und ihnen gleich viele Ressourcen zuteilt, und den *Capacity Scheduler*. Letzterer sorgt dafür, dass nur eine bestimmte Anzahl an Anwendungen pro Benutzer gleichzeitig ausgeführt wird und teilt ihnen so viele Ressourcen zu, wie benötigt werden bzw. der Benutzer nutzen darf. Entwickelt wurde der Capacity Scheduler vor allem für Cluster, die von mehreren Organisationen gemeinsam verwendet werden und sicherstellen soll, dass jede Organisation eine Mindestmenge an Ressourcen zur Verfügung hat [25]. Für diesen Scheduler wurde in [26] ein selbst-adaptiver Ansatz vorgestellt, welcher im Folgenden genauer erläutert wird.

2.3.1. MARP-Wert

Der Capacity Scheduler verschiedene Einstellungen, um ihn für das konkrete Cluster anzupassen. So besteht z. B. die Möglichkeit, den verfügbaren Speicher pro Anwendungs-

Container festzulegen oder wie viel Ressourcen durch AppMstr-Container beansprucht werden darf. Vor allem letztere Einstellungsmöglichkeit namens `maximum-am-resource-percent` (MARF) ist sehr wichtig, wenn mehrere Anwendungen gleichzeitig ausgeführt werden sollen. Der in der Konfiguration des Schedulers definierte MARF-Wert gibt an, wie viel Prozent des verfügbaren Speichers durch AppMstr-Container genutzt werden darf [25]. Der gesamte, für Anwendungen verfügbare Speicher wird durch den MARF-Wert in zwei Teile aufgeteilt. Während der einen Teil des Speichers nur durch AppMstr-Container beansprucht werden darf, wird der andere Teil des Speichers durch alle anderen Anwendungs-Container genutzt. Wird durch den MARF-Wert der erste, für AppMstr-reservierten Teil zu klein gehalten, können daher weniger AppMstr allokiert werden und somit auch weniger Anwendungen gestartet werden (*Loss of Jobs Parallelism*, LoJP). Ist der MARF-Wert dagegen zu groß, wird der verfügbare Speicher zu entsprechend großen Teilen für mögliche AppMstr reserviert. Dadurch ist der Anteil des Speichers für Anwendungs-Container entsprechend klein und es können dadurch weniger Container gestartet werden, um eine Anwendung auszuführen, womit sich die Ausführungsgeschwindigkeit der Anwendungen verringert (*Loss of Job Throughput*, LoJT) [26]:

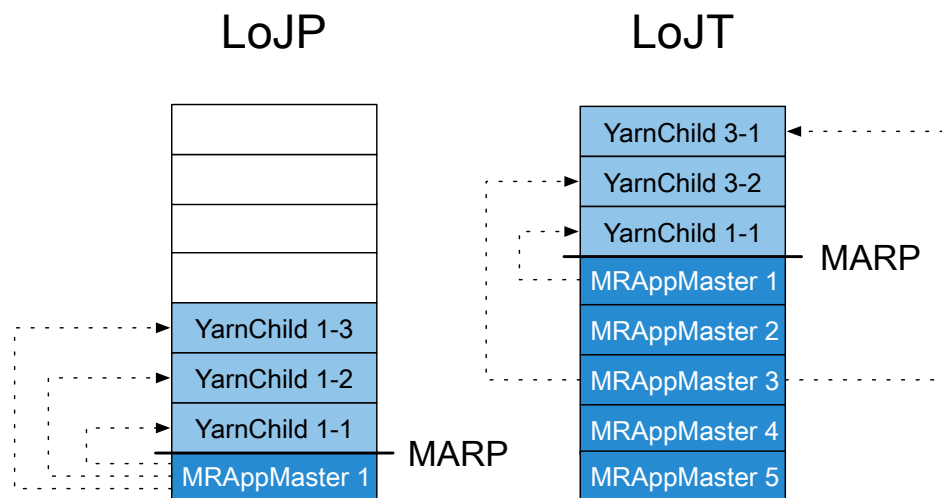


Abbildung 2.3.: LoJP und LoJT in Hadoop (entnommen aus [26]). Während beim LoJP sehr viel Speicher für Anwendungs-Container ungenutzt bleibt, können beim LoJT nicht genügend Anwendungs-Container allokiert werden, um die Anwendungen auszuführen.

Damit bestimmt der MARF-Wert indirekt auch die maximale Anzahl an Anwendungen, die gleichzeitig ausgeführt werden können. Da der MARF-Wert jedoch nicht während der Laufzeit dynamisch angepasst werden kann, haben Zhang u. a. in [26] einen Ansatz zur dynamischen Anpassung des MARF-Wertes zur Laufzeit von Hadoop vorgestellt. Die entwickelte **Selfbalancing-Komponente** passt den MARF-Wert abhängig von der Speicherauslastung der ausgeführten Anwendungen dynamisch zur Laufzeit an. So wird der MARF-Wert verringert, wenn die Speicherauslastung sehr hoch ist, und erhöht, wenn die Speicherauslastung sehr niedrig ist. Die Selfbalancing-Komponente

ermöglicht daher, dass immer die maximal mögliche Anzahl an Anwendungen ausgeführt werden kann. Die Evaluation von Zhang u. a. ergab zudem, dass Anwendungen dadurch im Schnitt um bis zu 40 Prozent schneller ausgeführt werden können. Zudem kann die dynamische Anpassung auch effizienter sein, als eine manuelle, statische Optimierung [26].

2.3.2. Analyse der Selfbalancing-Komponente

Da in dieser Fallstudie auch Mutationstests eingesetzt werden, bei denen die Selfbalancing-Komponente entsprechend verändert wird (Implementierung in Abschnitt 6.2), wurde die Komponente zunächst analysiert. Sie besteht aus folgenden vier Java-Klassen, welche den Kern der Komponente darstellen, und drei Shell-Skripten, die als Verbindung zum Hadoop-Cluster dienen:

- Java-Klassen:
 - `controller.Controller`
 - `effectuator.Effectuator`
 - `monitor.ControlNodeMonitor`
 - `monitor.MemUtilization`
- Shell-Skripte:
 - `selfTuning-CapacityScheduler.sh`
 - `selfTuning-controlNode.sh`
 - `selfTuning-mem-controlNode.sh`

Um den Zustand von Hadoop korrekt zu ermitteln, wird ein Kalman-Filter in Form der Open-Source-Bibliothek JKalman³ genutzt. Der Kalman-Filter wurde von Kálmán erstmals in [27] beschrieben und wird genutzt, um „aus verrauschten und teils redundanten Messungen die Zustände und Parameter des Systems zu schätzen“ [28]. Der Filter lässt sich aufgrund seines Aufbaus zudem auch für Echtzeitanwendungen nutzen [28]. Als einfaches Anwendungsbeispiel hierfür ist in [28] die Apollo-Mondlandefähre genannt, Strukov nutzte ihn in [29] aber auch zur Reduktion der Komplexität im Controlling. Für weitere Informationen zum Kalman-Filter wie seinen Aufbau, Funktionsweise und Anwendung sei hier auf entsprechende Fachliteratur wie z. B. [30–32] verwiesen.

Die drei Shell-Skripte der Selfbalancing-Komponente dienen zur Interaktion zwischen der Komponente und dem Hadoop-Cluster. Die beiden zuletzt genannten Skripte werden von den beiden Monitor-Klassen sekundlich gestartet und ermitteln basierend auf den Logs von Hadoop die Auslastung des Clusters. Mithilfe von `selfTuning-controlNode.sh`, das von `ControlNodeMonitor` gestartet wird, wird die Anzahl an aktiven und

³<https://jkalman.sourceforge.io/>

wartenden YARN-Jobs ermittelt und anschließend in der `controlNodeLog`-Datei gespeichert. Durch die Ausführung von `selfTuning-mem-controlNode.sh` (gestartet durch `MemUtilization`) wird dagegen die Auslastung des Speichers des Clusters ermittelt und in der `memLog`-Datei notiert.

Die in den beiden Dateien enthaltenen Werten werden im Anschluss wiederum sekundlich vom `Controller` der Selfbalancing-Komponente ausgelesen und mithilfe des Kalman-Filters bereinigt. Anschließend werden die bereits in [26] vorgestellten Algorithmen zum Ermitteln des neuen MARP-Wertes ausgeführt, damit dieser entsprechend erhöht bzw. verringert wird.

Um den dadurch neu ermittelten MARP-Wert anzuwenden, wird abschließend mithilfe des `Effectuators` das dritte Shell-Script `selfTuning-CapacityScheduler.sh` ausgeführt. Mithilfe dieses Shell-Scriptes wird der neue MARP-Wert in der Konfiguration des *Capacity Schedulers* gespeichert.

2.4. Plattform Hadoop-Benchmark

Zhang u. a. haben im Rahmen ihrer gesamten Forschungsarbeit an der Selfbalancing-Komponente darüber hinaus auch die Open-Source-Plattform Hadoop-Benchmark entwickelt⁴. Sie dient zur einfachen und schnellen Ausführung eines Hadoop-Clusters und wurde speziell zum Einsatz in der Forschung erstellt. Dadurch kann sie auch mit geringem Aufwand an eigene Bedürfnisse angepasst werden.

Zur Ausführung des Clusters wird die Virtualisierungs-Software Docker⁵ und das dazugehörige *Docker Machine* genutzt. Durch die Virtualisierung wird für jeden Hadoop-Node eine Docker-Machine gestartet, auf der der Hadoop-Node wiederum in einem Docker-Container ausgeführt wird. Verbunden werden die Nodes dabei mithilfe eines *DockerSSwarms*⁶.

Docker-Machine ist keine komplette Virtualisierungs-Software, sondern nutzt hier *VirtualBox*⁷, um virtuelle Maschinen zu starten, die mit dem Betriebssystem *Boot2Docker* ausgestattet sind. *Boot2Docker* ist eine leichtgewichtige Linux-Distribution, auf der Docker bereits vorinstalliert ist [34].

Mit *Graphite*⁸ ist zudem ein Monitoring-Tool enthalten, mit dem die Systemwerte wie CPU- oder Speicher-Auslastung des Clusters überwacht und analysiert werden kann. Jeder Hadoop-Container enthält dazu das Tool *collectd*⁹, was das Monitoring des Containers auf Systemebene übernimmt und die Daten an den Graphite-Container übermittelt.

⁴<https://github.com/Spirals-Team/hadoop-benchmark>

⁵<https://www.docker.com/>

⁶<https://docs.docker.com/engine/swarm/>

⁷<https://www.virtualbox.org/>

⁸<https://graphiteapp.org/>

⁹<https://collectd.org/>

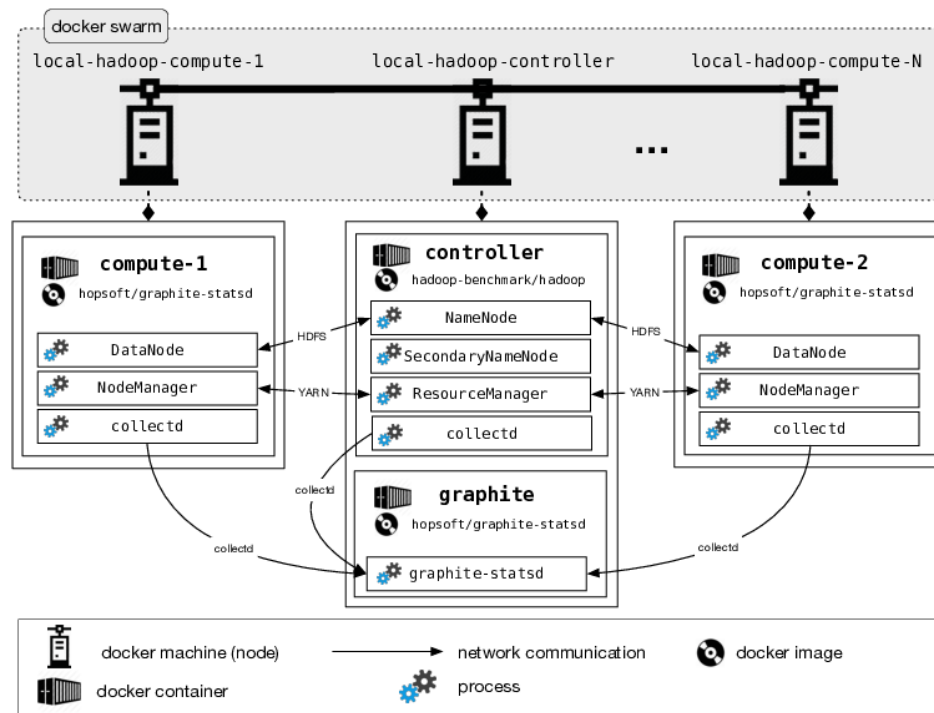


Abbildung 2.4.: High-Level-Architektur von Hadoop-Benchmark (entnommen aus [33])

Da mithilfe der Plattform auch unterschiedliche Hadoop-Konfigurationen ausgeführt werden können, ist die Plattform in mehrere Szenarien unterteilt. Jedes Szenario stellt eine Hadoop-Konfiguration dar, die vollständig angepasst werden kann. Jedes Szenario enthält daher eine *Dockerfile*, aus der die Docker-Images und -Container erstellt werden, weitere für Hadoop benötigte Daten und Einstellungen, sowie dazugehörige generelle Einstellungen des Szenarios. Die Plattform enthält bereits mehrere Szenarien, u. A. Hadoop in der Version 2.7.1 ohne Anpassungen sowie ein darauf basierendes Szenario mit der Selfbalancing-Komponente. Aufgrund eines der Kernkonzepte von Docker, wonach Docker-Images auf einem passenden, bereits vorhandenen Images aufbauen können bzw. sollten [35], ist es möglich, neue Szenarien basierend auf bereits vorhandenen zu entwickeln.

Zum Starten des Clusters ist ein Script enthalten, welches basierend auf dem zu nutzenden Szenario das Cluster in der entsprechenden Konfiguration startet.

In der Plattform Hadoop-Benchmark sind auch bereit einige Benchmarks integriert:

- Hadoop Mapreduce Examples
- Intel HiBench¹⁰
- Statistical Workload Injector for Mapreduce (SWIM)¹¹

Die Benchmarks werden ebenfalls mithilfe der in der Plattform enthaltenen Scripte gestartet. Hierbei besitzt jeder Benchmark ein eigenes Start-Script, das den Benchmark

¹⁰<https://github.com/intel-hadoop/HiBench>

¹¹<https://github.com/SWIMProjectUCB/SWIM>

in einem Docker-Container startet und die entsprechende Anwendung so dem Cluster zur Ausführung übergibt. Die Ausführung einer Anwendung mithilfe des entsprechenden Start-Scriptes sowie das Beenden einer Anwendung ist in Anhang A beispielhaft aufgezeigt.

Genauere Informationen zu den in der Plattform enthaltenen Benchmarks sind in Abschnitt 5.1 erläutert.

3. Aufbau und Ablauf der Fallstudie

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll nun mithilfe von Hadoop und der Selfbalancing-Komponente eine Fallstudie durchgeführt werden, durch die ermittelt wird, unter welchen Umständen eine Testautomatisierung möglich ist.

Ergebnis zur Frage zur Testautomatisierung in Reflexion

Hierfür werden mehrere Anforderungen an das durch den grundlegenden Versuchsaufbau definierte Modell gestellt. Dieses Modell wird zur Realisierung der Tests mithilfe des S#-Frameworks als ein vereinfachtes Modell von Hadoop entwickelt und mit einem realen Cluster verbunden.

Teile der Beiträge und Inhalte dieses Kapitels wurden bereits in [36] publiziert.

3.1. Grundlegender Versuchsaufbau

Neben den Anforderungen an Hadoop und das gesamte Testsystem muss auch der grundlegende Versuchsaufbau und das System unter Test (SuT) in definiert werden. Im Grunde wird, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, Hadoop mithilfe des S#-Frameworks nachgebildet und dieses Modell mit einem realen Cluster verbunden.

dort erwähnen

In diesem Cluster sollen anhand des Modells unterschiedliche Komponentenfehler injiziert und repariert werden, als auch unterschiedliche Benchmarks gestartet werden. Hierbei soll nicht nur das Verhalten von Hadoop selbst analysiert werden, sondern auch das der von Zhang u. a. entwickelten Selfbalancing-Komponente. Anhand dieses Verhaltens und dem des kompletten Testsystems soll schließlich ermittelt werden, ob eine Testautomatisierung in diesem Versuchsaufbau erfolgreich war. Es ist hierbei der gleiche Versuchsaufbau wie in [36], da dafür das gleiche Testsystem genutzt wurde wie für diese Fallstudie, in deren Rahmen es entwickelt wurde.

Bei der Entwicklung des Modells liegt der Fokus auf dem grundlegenden Aufbau von YARN. Dazu gehören die Anwendungen und ihre Attempts, sowie zum Teil auch ihre Container. Daneben muss das Modell auch die Nodes des Clusters und zum Ausführen der Benchmarks auch simulierte Clients enthalten. Da bei den Tests auch Ausfälle von Nodes eine Rolle spielen, müssen hierfür entsprechende Komponentenfehler implementiert werden, die mithilfe von S# aktiviert und deaktiviert werden können. Das Modell soll dabei immer den aktuellen Status des realen Clusters repräsentieren, weshalb regelmäßig alle benötigten Daten des realen Clusters ausgelesen und im Modell gespeichert werden müssen.

Da die Auswahl der ausgeführten Benchmarks eines jeden Clients nicht bei jedem Test manuell bestimmt werden soll, wird hierfür ein Transitionssystem verwendet. Mithilfe dieses Transitionssystems, in dem die Wahrscheinlichkeiten von Wechseln zwischen zwei Anwendungen definiert sind, soll während der Ausführung eines Testfalls zufällig eine nachfolgende Anwendung ausgewählt werden.

Die Verbindung zwischen dem Modell und dem realen Hadoop-Cluster wird mithilfe eines dafür entwickelten Treibers durchgeführt. Der Treiber ist dafür verantwortlich, Komponentenfehler und Anwendungen an das reale Cluster zu senden. Zudem dient er dazu, um den Status des Clusters jederzeit ermitteln und an das Modell zur dortigen Speicherung übergeben zu können. Er kann daher nicht nur aus der Verbindung zum Cluster selbst bestehen, sondern muss auch die Kommunikation zwischen Modell und Cluster sicherstellen und übermittelte Daten entsprechend umwandeln.

Das SuT selbst stellt das reale Hadoop-Cluster dar, das mithilfe der von Zhang u. a. entwickelten Plattform Hadoop-Benchmark, die Hadoop 2.7.1 enthält, umgesetzt werden soll. Hierfür sollen basierend auf dem in der Plattform enthaltenen Szenario mit der Selfbalancing-Komponente für diese Fallstudie angepasste Szenarien genutzt werden. Zudem soll auch mithilfe von Mutationstests, bei denen einer oder mehrere Mutanten in der Selfbalancing-Komponente implementiert werden, das Testsystem geprüft werden.

Dieser Versuchsaufbau soll zudem mithilfe eines dafür entwickelten *Oracles* geprüft werden. Das Oracle dient zur Validierung der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen an das Cluster und das Testsystem. Hierfür werden, sofern möglich, die Anforderungen als *Constraints* im Modell implementiert und bei jedem Test automatisch geprüft. Die Implementierung der Constraints erfolgt hierbei nicht zentral mithilfe des Oracles, sondern dezentral in den jeweiligen Komponenten des Modells. Für jede implementierte Komponente werden somit nur die jeweils relevanten Bestandteile der Anforderungen als Constraints implementiert und durch das Oracle validiert.

Die Implementierung des eben beschriebenen Modells und Oracles ist im Kapitel 4 beschrieben. Die Auswahl der verwendeten Benchmarks und deren Implementierung mit dem Transitionssystem findet sich in Kapitel 5.

3.2. Anforderungen an das Cluster und Testsystem

Zur Überprüfung des Clusters und des Testsystems selbst werden hierfür jeweils mehrere Anforderungen gestellt. Unterschieden wird hierbei zwischen funktionalen Anforderungen an das SuT und Anforderungen an das Testsystem. Während die funktionalen Anforderungen ausschließlich vom Hadoop-Cluster als SuT erfüllt werden müssen, müssen die Test-Anforderungen vom gesamten Testsystem erfüllt werden.

Mithilfe der im Folgenden definierten Anforderungen soll bereits automatisiert geprüft werden können, inwieweit eine Testautomatisierung möglich ist. Hierfür werden die Anforderungen, sofern möglich, in Form von Constraints ebenfalls im Modell

implementiert. Mithilfe dieser Constraints können die Anforderungen somit ebenfalls automatisiert und bereits während der Testausführung durch das Oracle validiert werden.

3.2.1. Funktionale Anforderungen an das Cluster

Obwohl in dieser Masterarbeit der Fokus auf Testautomatisierung und Validieren eines Testsystems liegt, müssen auch die funktionalen Anforderungen an das SuT, also das Hadoop-Cluster selbst, berücksichtigt werden. Da im Rahmen der Publikation [36] ebenfalls der in Abschnitt 3.1 beschriebene und in dieser Fallstudie genutzte Versuchsaufbau genutzt wurde, wurden im Rahmen dieser Fallstudie auch funktionale Anforderungen an das Cluster selbst durch das Oracle geprüft. Dies betrifft konkret folgende, bereits in [36] definierte, Anforderungen an das SuT:

1. Ein Task wird vollständig ausgeführt, sofern er nicht abgebrochen wird
2. Kein Task oder Anwendung wird an inaktive, defekte oder nicht verbundene Nodes gesendet
3. Die Konfiguration wird aktualisiert, sobald eine entsprechende Regel erfüllt ist
4. Defekte oder Verbindungsabbrüche werden erkannt

3.2.2. Anforderungen an das Testsystem

Neben den funktionalen Anforderungen, gibt es weitere Anforderungen an das gesamte Testsystem. Diese Anforderungen betreffen das Hadoop-Cluster, die Selfbalancing-Komponente, das entwickelte S#-Modell sowie der Treiber zur Kommunikation zwischen Modell und Cluster. Konkret sind dies folgende Anforderungen an das Testsystem:

1. Der MARP-Wert ändert sich basierend auf den derzeit ausgeführten Anwendungen
2. Der jeweils aktuelle Status des Clusters wird erkannt und im Modell gespeichert
3. Defekte Nodes und Verbindungsabbrüche werden erkannt
4. Im Modell implementierte Komponentenfehler werden im realen Cluster injiziert und repariert
5. Wenn alle Nodes defekt sind, wird erkannt, dass sich das Cluster nicht mehr rekonfigurieren kann
6. Ein Test kann vollautomatisch ausgeführt werden
7. Das Cluster kann ohne Auswirkungen auf seine Funktionsweise auf einem oder mehreren Hosts ausgeführt werden
8. Es können mehrere BenchmarkAnwendungen gleichzeitig gestartet und ausgeführt werden
9. Tests und Testfälle können zeitlich unabhängig und mehrmals ausgeführt werden

Die funktionalen Anforderungen dienen zudem ebenfalls als Anforderungen an das Testsystem und erweitern somit die hier genannten Anforderungen.

Eine Besonderheit bildet zudem die fünfte Anforderung, wonach erkannt werden muss, dass im Cluster keine weitere Rekonfiguration möglich ist. Wird diese Anforderung verletzt soll der ausgeführte Test abgebrochen werden, während bei den anderen, auch den funktionalen, Anforderungen dies nur durch das Oracle vermerkt werden soll, die Ausführung aber nicht weiter durch das Oracle beeinträchtigt werden soll.

3.3. Planung der und der Evaluation

Um das Testsystem zu validieren, wurde zunächst ein Evaluationsplan aufgestellt. In diesem ist festgehalten, was getestet wird, wie die Testkonfigurationen definiert sind, und wie die bei der Ausführung gewonnen Daten organisiert werden.

3.3.1. Behauptungen und Variablen

Als Basis für die Behauptungen und Variablen dienten die in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen an das Cluster und das Testsystem. Sie gehen damit auch einher mit den Behauptungen, welche für die Evaluation aufgestellt werden. Basierend auf den Anforderungen wurden daher folgende unabhängigen Variablen zur Evaluation ermittelt:

- Anzahl der Hosts und Nodes
- Anzahl der Clients
- Anzahl der Testfälle pro Test
- *Seed* für Zufallsgeneratoren
- Generelle Wahrscheinlichkeit zur Aktivierung und Deaktivierung der Komponentenfehler

Basierend auf den unabhängigen Variablen wurden u. A. folgende abhängigen Variablen ermittelt:

- Anzahl der tatsächlich ausgeführten Testfälle
- Aktivierten und deaktivierten Komponentenfehler
- Anzahl ausgeführter Anwendungen
- Anzahl und Gründe für evtl. nicht vollständig ausgeführte Anwendungen

Während die unabhängigen Variablen dazu genutzt werden, um Testkonfigurationen zu definieren (vgl. Abschnitt 3.3.2), dienen die abhängigen Variablen als wichtige Kennzahlen im Rahmen der Evaluation in Kapitel 7.

3.3.2. Generierung der Testkonfigurationen

Um nun anhand der in Abschnitt 3.3.1 definierten Variablen die in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen zu prüfen, sind mehrere Tests nötig. Als Basis zur Definition einer Testkonfiguration dienen die in Abschnitt 3.3.1 definierten unabhängigen Variablen, die durch weitere Angaben ergänzt werden:

- Anzahl genutzter Hosts
- Basisanzahl der Nodes
- Anzahl simulierter Clients
- Verwendeter Basisseed für Zufallsgeneratoren
- Anzahl auszuführender Testfälle
- Minstdauer für einen Testfall
- Nutzung einer oder mehreren Mutationen
- Generelle Wahrscheinlichkeit zur Aktivierung von Komponentenfehlern
- Generelle Wahrscheinlichkeit zur Deaktivierung von Komponentenfehlern
- Verwendung von vorab generierten Eingabedaten

Die Auswahl der ausgeführten Anwendungen erfolgt während der Testausführung anhand des Basisseeds der Testkonfiguration. Zwar werden durch das Transitionssystem wahrscheinlichkeitsbasierend zufällig Anwendungen ausgewählt, jedoch kann dies durch den Charakter des im .NET-Framework vorhandenen Zufallsgenerators gesteuert werden. Der in .NET implementierte Zufallsgenerator ist nämlich kein *echter*, sondern ein Pseudo-Zufallsgenerator, der mithilfe eines mathematischen Algorithmus' Zufallszahlen berechnet [37]. Zwar wird standardmäßig ein zeitbasierter Seed als Startwert für den Algorithmus genutzt, durch die Angabe eines spezifischen Seeds kann jedoch die Wiederausführbarkeit der Tests sichergestellt werden.

Auch die Aktivierung und Deaktivierung von Komponentenfehlern selbst soll während der Ausführung eines Testfalls festgelegt werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit für deren Aktivierung bzw. Deaktivierung einen maßgeblichen Einfluss besitzt. Da Anwendungen, die Eingabedaten für andere Anwendungen generieren, u. U. nicht erfolgreich beendet werden können, kann eine Testkonfiguration mit vorab generierten und im HDFS gespeicherten Daten durchgeführt werden. Dadurch wird es ermöglicht, dass in solchen Tests spätere Anwendungen nicht vom Erfolg der zuvor ausgeführten Anwendungen zur Generierung der Eingabedaten abhängig sind. Da einige Tests zudem als Mutationstests durchgeführt werden sollen, muss für eine Testkonfiguration dies entsprechend definiert werden.

Die Auswahl der konkreten Testkonfigurationen in Abschnitt 6.3 erfolgte im Rahmen der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Implementierung der Tests.

3.3.3. Organisation und Ausgabe der Daten

Damit die bei der Ausführung gewonnenen Daten auch zur Evaluation genutzt werden können, wurde hierzu festgelegt, welche Daten während der Ausführung ausgegeben werden. Alle relevante Daten werden hierzu während der Ausführung der Testfälle in eine Log-Datei ausgegeben und gespeichert. Zur Unterscheidung von einzelnen Ausführungen werden die Daten klar strukturiert.

Beim Start eines Testfalls sollen daher zunächst einige generelle Daten ausgegeben werden:

- Basis-Seed für die Zufallsgeneratoren
- Wahrscheinlichkeit für Aktivierung und Deaktivierung der Komponentenfehler
- Anzahl genutzter Hosts, Nodes und Clients
- Anzahl der ausgeführten Simulations-Schritte
- Angabe, ob ein normaler Test oder ein Mutationstest ausgeführt wird

Im Rahmen der Simulation können weitere Daten ausgegeben werden, wie z. B.:

- Angabe, ob vorab generierte Eingabedaten genutzt werden oder diese während der Ausführung eines Testfalls generiert werden
- Mindestdauer für einen Simulations-Schritt
- Auszuführende Benchmarks pro Client

Die Ausgabe der Daten der YARN-Komponenten wird bei jedem erfolgreichen Testfall durchgeführt, damit das Verhalten des Clusters berücksichtigt werden kann. Bei nicht erfolgreichen Testfällen wird die Simulation dagegen beendet. Für solche Fälle werden nach Abschluss der Simulation erneut die Daten des Clusters ausgelesen und ausgegeben. Es können hierbei alle Daten ausgegeben werden, welche erkannt werden können, mindestens jedoch:

- Für jeden Node:
 - ID bzw. Name des Nodes
 - Aktueller Status
 - Informationen zur Fehleraktivierung
 - Anzahl ausgeführter Container auf dem Node
 - Angaben zur Speicherauslastung
 - Angaben zur CPU-Auslastung
- Für jeden Client:
 - ID bzw. Name des Clints
 - Aktuell ausgeführter Benchmark
 - ID der aktuell ausgeführten Anwendung auf dem Cluster

- Für jede Anwendung:
 - ID der Anwendung
 - Bezeichnung der Anwendung
 - Aktueller und finaler Status der Anwendung
 - ID bzw. Name des Nodes, auf dem der AppMstr ausgeführt wird
- Für jeden Attempt:
 - ID des Attempts
 - Aktueller Status des Attempts
 - ID des AppMstr-Containers
 - ID bzw. Name des Nodes, auf dem der AppMstr ausgeführt wird
 - Anzahl der derzeit ausgeführten Container

Die Details zur Implementierung und dem Ausgabeformat während der Ausführung der Simulation sind in Abschnitt 6.1.4 erläutert, die zur Ausgabe der generellen Testfalldaten in Abschnitt 6.4. Ein Beispiel einer möglichen Ausgabe für einen Testfall findet sich in Anhang D.

4. Entwicklung des Testmodells

Um die in Kapitel 3 beschriebene Fallstudie durchführen zu können, wurde zunächst das Testmodell mithilfe des S#-Frameworks entwickelt. Das dabei entwickelte Modell bildet vereinfacht die für die Fallstudie relevanten YARN-Komponenten ab und besteht aus den drei im Folgenden beschriebenen, architektonischen Schichten.

4.1. Grundlegende Architektur des Testmodells

Um Hadoop mit der Selfbalancing-Komponente mit den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Anforderungen prüfen zu können, wird mithilfe des S#-Frameworks ein vereinfachtes Modell der relevanten YARN-Komponenten entwickelt. Dieses YARN-Modell wird mithilfe des Treibers mit dem realen Cluster verbunden, was durch hierfür entwickelte Skripte gesteuert wird. Daraus resultiert folgende Drei-Schichten-Architektur für das gesamte Testmodell:

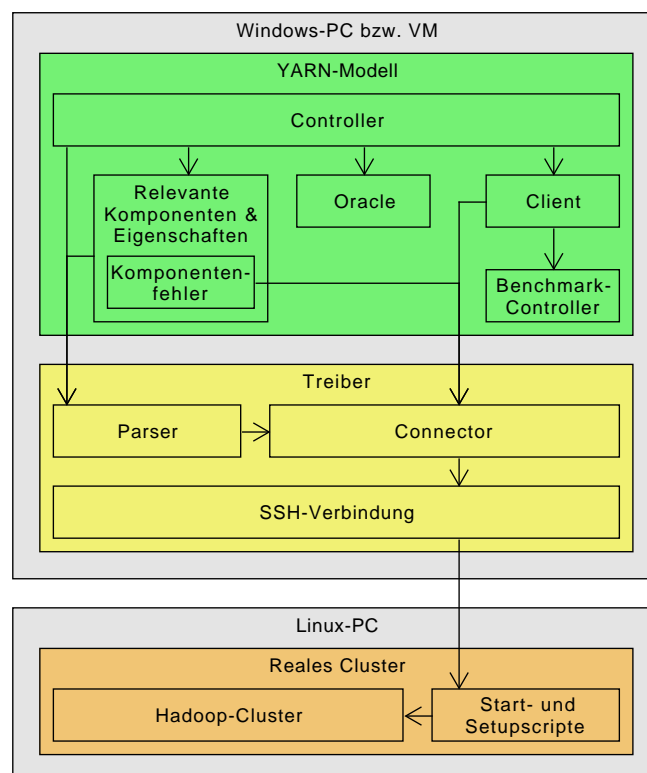


Abbildung 4.1.: Grundlegende Architektur des Testsystems

Das YARN-Modell stellt die oberste Schicht des Testmodells dar. Es bildet das Kernstück dieser Fallstudie, da dieses Modell mit den hierin abgebildeten, für diese

Fallstudie relevanten YARN-Komponenten und implementierten Komponentenfehlern, dem Controller und dem Oracle direkt im Rahmen des modellbasierten Testens mit S# interagiert. Folgende Komponenten sind im YARN-Modell enthalten:

Controller

Steuert den Ablauf einer Testausführung und das Zusammenspiel zwischen den Komponenten des YARN-Modells.

Relevante YARN-Komponenten und Eigenschaften

Bilden die grundlegende Architektur von Hadoop YARN ab. Implementiert wurden in dieser Fallstudie die Nodes, Anwendungen, Attempts und Container mit den jeweils relevanten Eigenschaften zur Durchführung der Fallstudie.

Komponentenfehler der YARN-Komponenten

Bilden die bei den Tests zu injizierenden Komponentenfehler der jeweiligen YARN-Komponenten.

Oracle

Validiert die in Form von Constraints in den jeweiligen YARN-Komponenten implementierten Anforderungen.

Client

Dient zum starten und beenden von Benchmarks im Cluster.

Benchmark-Controller

Enthält das Transitionssystem zur Auswahl der Benchmarks und steuert diese.

Die Verbindung zwischen dem YARN-Modell und dem realen Cluster bildet der Treiber. Er besteht aus folgenden Komponenten:

Parser

Verarbeitet die Monitoring-Ausgaben vom realen Cluster und konvertiert diese für die Nutzung im YARN-Modell.

Connector

Abstrahiert die Verbindung zum realen Cluster und die dabei auszuführenden Befehle.

SSH-Verbindung

Stellt die Verbindung zum realen Cluster her.

Der Parser wird hierbei nur zur Durchführung des Monitoring benötigt und nutzt wiederum den Connector zum abrufen der Daten. Andere Befehle und Zugriffe auf das reale Cluster, wie z. B. das Injizieren von Komponentenfehlern, werden direkt mithilfe des Connectors durchgeführt.

Die Implementierung des YARN-Modells wird in Abschnitte 4.2 und 5.3 beschrieben, die Implementierung des Treibers in Abschnitt 4.3. Die Umsetzung des realen Clusters wird in Abschnitt 4.4 beschrieben.

In allen Komponenten des Modells werden, sofern benötigt, mithilfe des Frameworks `log4net`¹ (Version 2.0.8), Logausgaben getätigt. Dies betrifft vor allem das Monitoring (vgl. Abschnitt 4.2.5), aber auch weitere Informationen wie zur Validierung der Constraints (vgl. Abschnitt 4.2.9) oder reine Debug-Informationen. All diese Informationen werden im Programmlog zusammengefasst, welches auch zur Auswertung der ausgeführten Tests dient. Zu Analysezwecken im Fehlerfall wird zudem jede Kommunikation der SSH-Verbindung in einem eigenen Log, dem SSH-Log, abgespeichert (vgl. Abschnitt 4.3.4).

4.2. Implementierung des YARN-Modells

Das implementierte YARN-Modell besteht, wie bereits in Abschnitt 4.1 gezeigt, aus fünf Komponenten und den Komponentenfehlern der hier relevanten YARN-Komponenten. Die vier implementierten YARN-Komponenten sind die Anwendungen, ihre Attempts und Container, sowie die Nodes. Zudem wurde eine Klasse implementiert, die zur Repräsentation des RM dient, und als Controller im Rahmen des Testens mit S# dient. Einen Überblick über den Aufbau des implementierten YARN-Modells gibt folgendes Klassendiagramm:

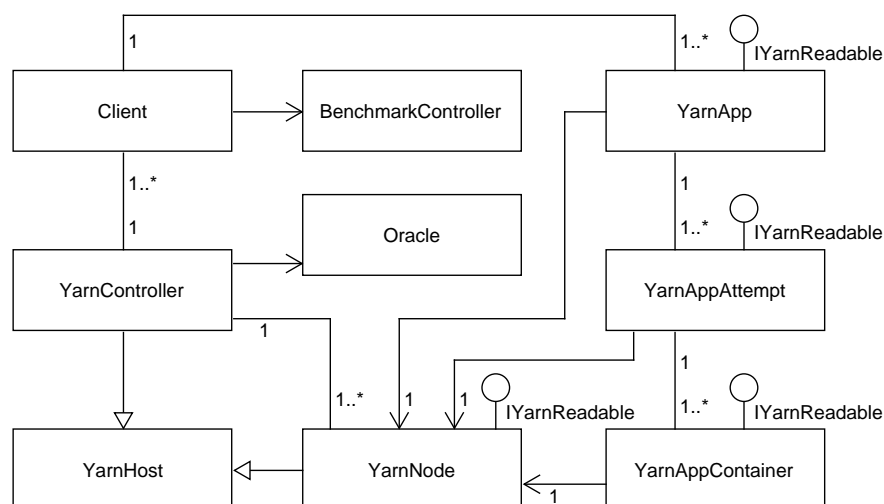


Abbildung 4.2.: Grundlegender Aufbau des YARN-Modells. Assoziationen und weitere Verbindungen zum Treiber und S# sind hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

¹<https://logging.apache.org/log4net/>

Im Klassendiagramm wird zudem ersichtlich, dass jedem Client mehrere Anwendungen in Form der Klasse **YarnApp** zugeordnet sind, jeder Anwendung mehrere Attempts (**YarnAppAttempt**) und jedem Attempt mehrere Anwendungs-Container (**YarnAppContainer**). Der Client stellt somit auch die den relevanten YARN-Komponenten übergeordnete Komponente dar.

Zunächst wird im Folgenden zunächst die dem Modell übergeordnete zentrale Klasse **Model** erläutert, danach die relevanten YARN-Komponenten mit ihren Komponentenfehlern, anschließend die anderen Komponenten des YARN-Modells. Der Aufbau des Benchmark-Controllers wird in Abschnitt 5.3 erläutert.

4.2.1. Die Klassen **Model** und **ModelSettings**

Die Klasse **Model** stellt die zentrale Schnittstelle des Testsystems mit **S#** dar, während die Klasse **ModelSettings** alle generellen, variablen Einstellungen und Konstanten des YARN-Modells bereitstellt. Da die **Model**-Klasse auch das gesamte Modell repräsentiert, wird sie zur Verwaltung des von **S#** auszuführenden Modells genutzt. Hierfür werden alle Komponenten wie Clients oder Anwendungen zusätzlich zur Struktur innerhalb des Modells auch direkt in entsprechenden Eigenschaften dieser Klasse gespeichert, welche zur Interaktion mit **S#** entsprechend markiert sind (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Daneben dient die Klasse auch zur Initialisierung des gesamten Modells. Hierbei werden zunächst der Controller, der Treiber in Form der benötigten Parser und Connectoren, sowie die Nodes des Clusters initialisiert. Anschließend wird für jeden Client eine gewisse Anzahl an **YarnApp**-Instanzen zum Speichern der Daten von Anwendungen, für jede Anwendung eine gewisse Anzahl an **YarnAppAttempt**-Instanzen für Attempts, sowie für jeden Attempt eine gewisse Anzahl an **YarnAppContainer** für die Daten der Anwendungs-Container initialisiert. Die genaue Anzahl der erzeugten Instanzen kann hierbei für jede YARN-Komponente und auch für Clients nach Bedarf angepasst werden, wodurch auch einzelne Komponenten wie z. B. in der Fallstudie die Anwendungs-Container, deaktiviert werden können.

Alle initialisierten YARN-Komponenten werden durch die **Model**-Klasse auch innerhalb des Modells zur Verfügung gestellt, sofern Komponenten diese benötigen. Darunter zählen auch die bei der Ausführung des Modells benötigten Parser und Connectoren. Aufgrund der Einschränkungen von **S#** im Umgang mit dem Treiber (vgl. Abschnitt 4.3.1), sowie zur einfacheren Bereitstellung von benötigten Komponenten und Funktionen im Modell, ist die **Model**-Klasse als Singleton realisiert.

Die **ModelSettings**-Klasse dient zum Speichern der variablen Einstellungen sowie zum Bereitstellen von generellen, Modell- oder Testsystemweiten Konstanten. Gespeichert und bereitgestellt werden hier Daten wie z. B. die Zugangsdaten der SSH-Verbindungen oder der genutzten **HostMode** (vgl. Abschnitte 4.3.3 und 4.4.2), um ihn im YARN-Modell und dem Treiber transparent zu machen. Die **ModelSettings** sind

damit zur Verwaltung des `HostModes` zuständig und dafür verantwortlich, immer die korrekten Pfade und Adressen für den genutzten `HostMode` dem Treiber bereit zu stellen. Dies betrifft z. B. den Pfad zum benötigten Setupscript (vgl. Abschnitt 4.4.3) oder die zur Nutzung der REST-API benötigten Adressen. Eine Besonderheit bildet hierbei die Eigenschaft `HttpUrl` der `YarnNodes`, welche beim Initialisieren des Modells durch die `ModelSettings` die zum `HostMode` passende Adresse erhält (vgl. Abschnitte 4.2.2 und 4.4.2).

4.2.2. Relevante YARN-Komponenten

Die vier implementierten, relevanten YARN-Komponenten sind die Anwendungen, ihre Attempts und Container sowie die Nodes des Clusters. Obwohl die Container in dieser Fallstudie nicht benötigt werden, waren sie für die in [36] beschriebene Fallstudie notwendig, welche ebenfalls mit dem hier beschriebenen Modell durchgeführt wurden.

Eine Übersicht über die Implementierung der YARN-Komponenten gibt folgendes Klassendiagramm:

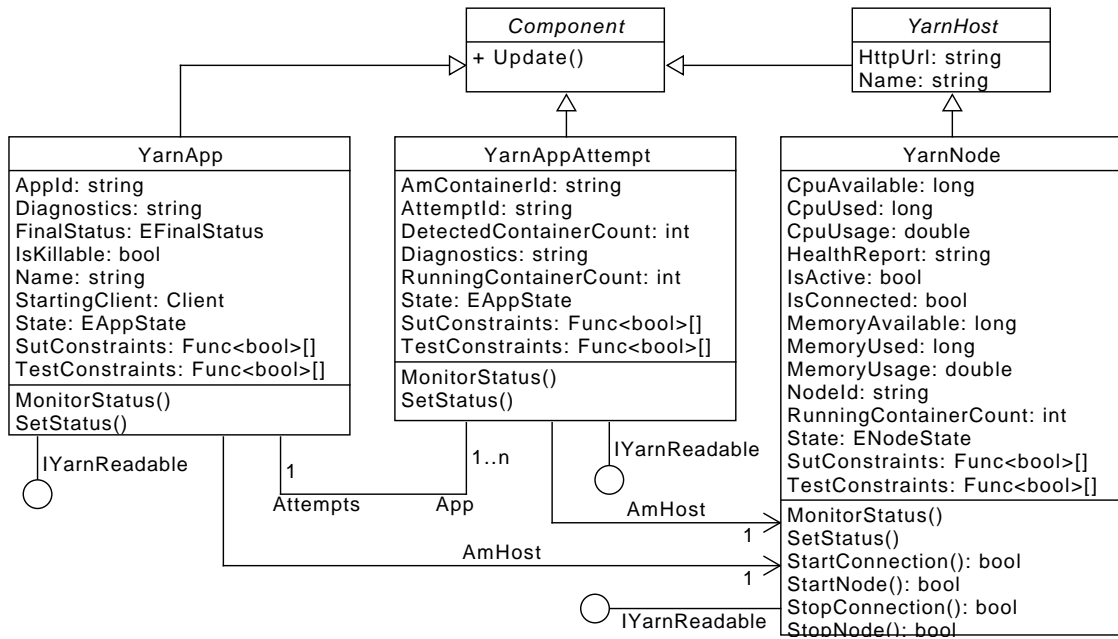


Abbildung 4.3.: Für die Fallstudie relevante, implementierte YARN-Komponenten, hier dargestellt mit den wichtigsten Eigenschaften und Methoden. Dies sind alle für die spätere Durchführung und zur Ausgabe des Zustandes (vgl. Abschnitt 3.3.3) wichtigen Eigenschaften und Methoden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die implementierten Komponentenfehler, einige der `IYarnReadable` bereitgestellten, relevanten Eigenschaften und Methoden, sowie die Klasse `YarnAppContainer` nicht aufgeführt.

Die Eigenschaft `AmHost` speichert den ausführenden Node des AppMstr der Anwendung bzw. des Attempts, die Eigenschaft `IsKillable` gibt an, ob eine Anwendung

derzeit ausgeführt ist und somit vorzeitig abgebrochen werden kann. Die Eigenschaften **Diagnostics** bzw. **HealthReport** stellen von Hadoop zur Verfügung gestellte weitere Informationen bei Fehlern dar. Die **State**-Eigenschaften bzw. **FinalState** speichern die von Hadoop angegebenen Zustände der YARN-Komponenten. Hierfür wurden entsprechende Auflistungen basierend auf den in [19] angegebenen möglichen Werten für die jeweiligen Zustände im Modell implementiert.

Da für diese Fallstudie die Daten der Container selbst nicht relevant sind, wird im hier verwendeten Modell nur gespeichert, wie viele Anwendungs-Container beim Monitoring im aktuellen Testfall (**RunningContainerCount**) bzw. für alle bisher ausgeführten Testfälle kumuliert (**DetectedContainerCount**) erkannt wurden. Für die Tests in [36] werden die Daten der Container genauso wie die der anderen YARN-Komponenten gespeichert. Hierfür enthalten die Klassen **YarnAppAttempt** und **YarnAppContainer** entsprechende Eigenschaften zur jeweiligen Zuordnung analog zu denen zwischen **YarnApp** und **YarnAppAttempt**. Analoge Zuordnungen bestehen auch zu den Clients bzw. den Anwendungs-Containern, sofern benötigt. Die Eigenschaft **AmContainerId** speichert zudem die Container-ID des AppMstr-Containers.

Die Eigenschaften mit dem Präfix **CPU** bzw. **Memory** in **YarnNode** dienen zur Speicherung der derzeitigen Auslastung der CPU-Kerne bzw. des Speichers eines Nodes. Benötigt werden diese Werte zur Berechnung, ob ein Komponentenfehler aktiviert oder deaktiviert wird. Die Eigenschaft durch die Basisklasse **YarnHost** bereitgestellte Eigenschaft **HttpUrl** beschreibt die für die Nutzung der REST-API benötigte Adresse des Nodes (vgl. Abschnitt 4.3.3). Da die Adresse vom **HostMode** abhängig ist, wird sie mithilfe der **ModelSettings** beim initialisieren des Modells entsprechend festgelegt (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.4.2).

Die Eigenschaften **SutConstraints** und **TestConstraints** sowie die Methoden **MonitorStatus()** und **SetStatus()** werden von **IYarnReadable** bereitgestellt und speichern die Constraints bzw. dienen zur Durchführung des Monitorings der implementierten Komponenten. Die Start- und Stop-Methoden sowie die Eigenschaften **IsActive** und **IsConnected** in **YarnNode** dienen zur Identifikation und Injizierung bzw. Reparieren der Komponentenfehlern. Diese Eigenschaften und Methoden werden daher auf den folgenden Seiten näher beschrieben.

Neben den dargestellten, relevanten Eigenschaften und Methoden wurden zahlreiche weitere implementiert, welche einerseits zur Vollständigkeit der implementierten Komponenten für die Tests in [36], andererseits auch zur Ausführung mithilfe des S#-Frameworks benötigt werden. Letztere sind z. B. zur Speicherung von Strings notwendig, welche aufgrund der Einschränkungen von S# (vgl. Abschnitt 2.1) nicht jederzeit frei genutzt werden können. Strings sind im YARN-Modell daher zur Speicherung immer als **char**-Arrays implementiert, werden jedoch zur einfacheren Nutzung im Modell in Strings konvertiert:

```
1 public char[] AppIdActual { get; }
```

```

2
3 [NonSerializable]
4 public string AppId
5 {
6     get { return ModelUtilities.GetCharArrayAsString(AppIdActual); }
7     set { ModelUtilities.SetCharArrayOnString(AppIdActual, value); }
8 }

```

Listing 4.1: Implementierung der Eigenschaft `AppId`. Die beiden Methoden `GetCharArrayAsString` und `SetCharArrayOnString` führen die Konvertierung in den `char`-Array bzw. des `char`-Arrays in einen String durch.

Die `Update()`-Methoden starten bei allen vier implementierten YARN-Komponenten die jeweiligen Monitoring-Funktionen, bei `YarnNode` werden zudem `StartNode()` und `StartConnection()` ausgeführt um mögliche zuvor injizierte Komponentenfehler im realen Cluster zu reparieren.

Da bei der Ausführung des Modells durch `S#` keine neuen Instanzen erzeugt werden können (vgl. Abschnitt 2.1), dienen die jeweiligen IDs der Komponenten auch als Indikator, ob die jeweilige Komponenten-Instanz derzeit benötigt wird und somit Daten gespeichert werden sollen. Daher wird das Monitoring auch nur dann ausgeführt, wenn der Instanz eine nicht leere ID z. B. in Form der `AppId` zugewiesen wurde.

4.2.3. Implementierung der Komponentenfehler

Die im YARN-Modell implementierten Komponentenfehler wurden direkt in den entsprechenden YARN-Komponenten implementiert. Implementiert wurden hierbei mit `NodeDeadFault` und `NodeConnectionErrorFault` zwei jeweils als `TransientFault` definierte Komponentenfehler für die durch `YarnNode` repräsentierten Nodes. Während durch `NodeDeadFault` der komplette Node beendet wird, trennt `NodeConnectionErrorFault` nur die Verbindung des Nodes zum Cluster. Die dazugehörigen Effekt-Klassen der Komponentenfehler sind jeweils als innere Klassen in `YarnNode` implementiert.

Die Injizierung und das Reparieren der beiden Fehler geschieht mithilfe der vier Stop- bzw. Start-Methoden wie z. B. `StopNode()`, die bereits im Klassendiagramm in Abb. 4.3 zu sehen sind. Wenn ein Komponentenfehler durch das Framework aktiviert wird, wird durch die Effekt-Klasse die jeweilige Stop-Methode aufgerufen und so der Fehler injiziert:

```

1 public class YarnNode : YarnHost, IYarnReadable
2 {
3     [NodeFault]
4     public readonly Fault NodeDeadFault = new TransientFault();
5     public IHadoopConnector FaultConnector { get; set; }
6
7     public bool StopNode(bool retry = true)
8     {

```

```

9      if(IsActive)
10     {
11         var isStopped = FaultConnector.StopNode(Name);
12         if(isStopped)
13             IsActive = false;
14         else if(retry)
15             StopNode(false); // try again once
16     }
17     return !IsActive;
18 }
19
20 [FaultEffect(Fault = nameof(NodeDeadFault))]
21 public class NodeDeadEffect : YarnNode
22 {
23     public override void Update()
24     {
25         StopNode();
26     }
27 }
28 }
29
30 public class CmdConnector : IHadoopConnector
31 {
32     private SshConnection Faulting { get; }
33
34     public bool StopNode(string nodeName)
35     {
36         var id = DriverUtilities.ParseInt(nodeName);
37         Faulting.Run($"{Model.HadoopSetupScript} hadoop stop {id}",
38             IsConsoleOut);
39         return !CheckNodeRunning(id);
40     }
41 }

```

Listing 4.2: Injizierung des Komponentenfehlers `NodeDeadFault` (gekürzt). Sollte der Node nicht beendet werden, wird die Injizierung einmalig erneut versucht. `CmdConnector.Faulting` stellt die zur Injizierung verwendete SSH-Verbindung dar.

Das Reparieren von Komponentenfehlern geschieht analog hierzu. Hierfür werden in der `Update()`-Methode die beiden Start-Methoden aufgerufen, die einen fehlerhaften Node reparieren. Eine Besonderheit bildet hierbei die Reparatur des Komponentenfehlers `NodeConnectionErrorFault`, bei der der Node komplett neu gestartet wird, da es sonst passieren kann, dass der wieder ans Netzwerk angebundene Node sich nicht mit dem RM verbindet.

Da beide Fehler zudem auch gleichzeitig aktiviert werden können, wurde dem Komponentenfehler `NodeDeadFault` mithilfe entsprechender S#-Funktionen eine höhere Priorität vergeben, wodurch dieser Vorrang vor dem anderen Komponentenfehler erhält.

Dadurch wird in solchen Fällen der Node beendet und nicht zunächst noch zusätzlich auch vom Netzwerk getrennt.

Zur einfachen Identifikation der aktiven Komponentenfehler innerhalb des YARN-Modells dienen die beiden Eigenschaften `IsActive` und `IsConnected`. In Listing 4.2 wird bereits die Auswirkung der beiden Eigenschaft gezeigt, indem verhindert wird, dass ein möglicherweise bereits injizierter bzw. reparierter Komponentenfehler erneut injiziert bzw. repariert wird. Sie dienen aber auch zur Validierung der Constraints, bei denen mithilfe der beiden Eigenschaften geprüft wird, ob ein Node korrekt als aktiv bzw. defekt erkannt wurde.

4.2.4. Aktivierung von Komponentenfehler

Ob ein Komponentenfehler in einem Testfall aktiviert wird, ist Abhängig von folgenden Parametern:

- Auslastung des Nodes im vorhergehenden Testfall
- Generellen Wahrscheinlichkeit zur Fehleraktivierung
- Einer Zufallszahl

Der hierfür benötigte Zufallsgenerator wird mithilfe des in Abschnitt 3.3.2 spezifizierten Basisseeds initialisiert. Da der Zufallsgenerator ein statischer Generator ist, werden über einen Test bei der gleichen Anzahl an möglichen Komponentenfehler immer die gleichen Werte zurückgegeben, nicht jedoch zwingend für einen bestimmten Komponentenfehler eines Nodes.

Um zu bestimmen, ob ein Komponentenfehler aktiviert wird, sind alle Komponentenfehler mit dem Attribut `NodeFault` markiert. Mithilfe dieses Attributes wird bei der Ausführung eines Testfalls folgendermaßen berechnet, ob der Komponentenfehler aktiviert wird:

```
1 var node = AllNodes.First(n => n.Name == nodeName);
2 var nodeUsage = (node.MemoryUsage + node.CpuUsage) / 2;
3
4 if(nodeUsage < 0.1) nodeUsage = 0.1;
5 else if(nodeUsage > 0.9) nodeUsage = 0.9;
6
7 NodeUsageOnActivation = nodeUsage; // for using on repairing
8
9 var faultUsage = nodeUsage * ActivationProbability * 2;
10
11 var probability = 1 - faultUsage;
12 var randomValue = RandomGen.NextDouble();
13 Logger.Info($"Activation probability: {probability} < {randomValue}");
14 return probability < randomValue;
```

Listing 4.3: Berechnung der Aktivierung von Komponentenfehlern (zusammengefasst).

Die Entscheidung zur Deaktivierung eines Komponentenfehlers verhält sich analog. Anstatt der generellen Aktivierungswahrscheinlichkeit wird hierbei die generelle Wahrscheinlichkeit zur Deaktivierung der Komponentenfehler genutzt. Außerdem spielt bei der Deaktivierung die Auslastung des Nodes zum Zeitpunkt der Aktivierung eine Rolle, welche hierzu in der Eigenschaft `NodeUsageOnActivation` des Attributs entsprechend gespeichert und zur Deaktivierung genutzt wird.

4.2.5. Interface `IYarnReadable` und Monitoring

Das Interface `IYarnReadable` ist das zentrale Erkennungsmerkmal der im Modell abgebildeten und implementierten YARN-Komponenten. Es dient zum einen zur Identifikation aller implementierten YARN-Komponenten, andererseits stellt es auch Eigenschaften und Methoden bereit, welche einerseits dem Testen in `S#` dienen, primär aber dem Ermitteln der Daten aus dem realen Cluster:

- `GetId()`
- `StatusAsString()`
- `Parser`
- `IsSelfMonitoring`
- `MonitorStatus()`
- `SetStatus()`
- `PreviousParsedComponent`
- `CurrentParsedComponent`
- `SutConstraints`
- `TestConstraints`

Die beiden erstgenannten Methoden dienen primär zu Debugging-Zwecken und zur Rückgabe der ID beim Zugriff auf die jeweiligen Komponenten mithilfe des Interfaces bzw. der Werte aller Eigenschaften der Komponente als ein String.

Die nachfolgenden vier Eigenschaften und Methoden dienen zum Monitoring der entsprechenden YARN-Komponenten. Während die Eigenschaft `Parser` den zu verwendenden Parser (vgl. Abschnitt 4.3.2) speichert, dient die Eigenschaft `IsSelfMonitoring` zur Unterscheidung, ob die Daten einer Komponente von dieser selbst ermittelt werden oder dies die übergeordnete Komponente durchführt. Diese Unterscheidung ist nötig, da YARN zwei unterschiedliche Schnittstellen bietet, die Rückgabe der Daten durch die CLI oder mithilfe der REST-API. Ausführlichere Informationen zu den beiden Varianten sind in Abschnitt 4.3 zu finden. Bei der Nutzung der CLI zur Ermittlung der Daten eignet sich daher die Selbstermittlung der Daten besser, während bei der Nutzung der Rest-API die Ermittlung der Daten durch die übergeordnete Komponente geeigneter ist. Aus diesem Grund ist auch die Methode `SetStatus()` definiert, da hier unabhängig von der Datenermittlung der aktuelle Status der Komponente abgespeichert

werden kann. Die Durchführung des Monitoring findet in beiden Fällen jedoch mithilfe der Methode `MonitorStatus()` statt:

```
1 public void MonitorStatus()
2 {
3     if(IsSelfMonitoring)
4     {
5         var parsed = Parser.ParseAppDetails(AppId);
6         if(parsed != null)
7             SetStatus(parsed);
8     }
9
10    var parsedAttempts = Parser.ParseAppAttemptList(AppId);
11    foreach(var parsed in parsedAttempts)
12    {
13        // search attempt with this id or an free attempt
14        attempt.IsSelfMonitoring = IsSelfMonitoring;
15        if(IsSelfMonitoring)
16            attempt.AttemptId = parsed.AttemptId;
17        else
18        {
19            attempt.SetStatus(parsed);
20            attempt.MonitorStatus();
21        }
22    }
23 }
```

Listing 4.4: Implementierung der Methode `MonitorStatus()` in der Klasse `YarnApp` (gekürzt). Das Monitoring der anderen Komponenten erfolgt analog hierzu.

Beim Monitoring der untergeordneten Komponenten wird zunächst immer geprüft, ob bereits eine Instanz mit der ID der Komponente vorhanden ist. Wenn dies der Fall ist, werden die vom realen Cluster ermittelten Daten weiterhin in der bereits bestehenden Instanz gespeichert, ansonsten wird eine leere Instanz genutzt um die Daten der Subkomponente zu speichern. Wenn keine freie Instanz mehr nötig ist, wird eine entsprechende `OutOfMemoryException` ausgelöst, damit die Ausführung des Modells abgebrochen werden kann.

Eine Besonderheit bildet das Monitoring der Anwendungs=Container. Da eine Anwendung sehr schnell eine sehr hohe Anzahl an Container allokiert und jede Container-Instanz im Modell Speicherplatz benötigt, werden nur die Daten der während des Monitoring ausgeführten Container ermittelt. Bei Anwendungen und Attempts werden dagegen auch die Daten von bereits beendeten Anwendungen bzw. Attempts gespeichert.

Die vier restlichen Eigenschaften und Methoden des Interfaces dienen zur Auswertung der Komponente durch `S#`. Die beiden Eigenschaften `SutConstraints` und `TestConstraints` dienen zur Implementierung der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen in Form von Constraints.

4.2.6. Constraints der YARN-Komponenten

Einige der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen an das SuT und gesamte Testsystem sind auch für die YARN-Komponenten relevant. Die relevanten Bestandteile der Anforderungen für die jeweiligen Komponenten sind mithilfe der beiden in `IYarnReadable` definierten Eigenschaften `SutConstraints` und `TestConstraints` implementiert. Realisiert sind die beiden Eigenschaften für die Constraints jeweils als `Func<bool>[]`:

```

1 public Func<bool>[] SutConstraints => new Func<bool>[]
2 {
3     // task will be completed if not canceled
4     () =>
5     {
6         if(FinalStatus != EFinalStatus.FAILED)
7             return true;
8         if(!String.IsNullOrEmpty(Name) &&
9             Name.ToLower().Contains("fail job"))
10            return true;
11        return false;
12    },
13    // configuration will be updated
14 };
15
16 public Func<bool>[] TestConstraints => new Func<bool>[]
17 {
18     // current state is detected and saved
19     () =>
20     {
21         var prev = PreviousParsedComponent as IApplicationResult;
22         var curr = CurrentParsedComponent as IApplicationResult;
23         // compare prev, curr and this and return the result
24         // or otherwise
25         return false;
26     },
27 };

```

Listing 4.5: Definition der Constraints in `YarnApp` (gekürzt)

Die Constraints werden im Anschluss an das Monitoring vom Oracle validiert, was in Abschnitt 4.2.9 beschrieben wird. Die Constraints sind so definiert, dass im Falle einer erfolgreichen Validierung `true` zurückgegeben wird, in allen anderen Fällen die Rückgabe `false` dagegen eine nicht erfolgreiche Validierung anzeigt.

Wenn die ID der Komponenten-Instanzen leer ist, und die jeweilige Instanz somit derzeit nicht im Modell zum Speichern der Daten des realen Clusters benötigt wird, werden die Constraints immer erfolgreich validiert.

4.2.7. Implementierung des Clients

Der Client im YARN-Modell simuliert einen Client und dient somit zum Starten der Benchmarks in dieser Fallstudie. Die Auswahl des zu startenden Benchmarks erfolgt durch den Benchmark-Controller, welcher in Abschnitt 5.3 erläutert wird. Jeder Client besitzt hierzu einen eigenen Benchmark-Controller, womit die auszuführenden Benchmarks für jeden Client unabhängig von anderen Clients ausgewählt werden. Ein Client kann jedoch nur eine Anwendung gleichzeitig starten und muss eine zuvor gestartete Anwendung beenden, bevor er eine neue starten kann. Dies wird jedoch nur durchgeführt, wenn sich der auszuführende Benchmark geändert hat:

```
1 public void UpdateBenchmark()
2 {
3     var benchChanged = BenchController.ChangeBenchmark();
4
5     if(benchChanged)
6     {
7         StopCurrentBenchmark();
8         StartBenchmark(BenchController.CurrentBenchmark);
9     }
10 }
11
12 public void StartBenchmark(Benchmark benchmark)
13 {
14     if(benchmark.HasOutputDir)
15         SubmittingConnector.RemoveHdfsDir(benchmark.GetOutputDir(ClientDir));
16     var appId = SubmittingConnector.StartApplicationAsyncTillId(
17         benchmark.GetStartCmd(ClientDir));
18     // save application id
```

Listing 4.6: Auswahl und Start des nachfolgenden Benchmarks (gekürzt). Die Methode `ChangeBenchmark()` des Benchmark-Controllers wird in Abschnitt 5.3.2 erläutert.

Da die auf dem Cluster ausgeführten Anwendungen u. U. nicht gestartet werden, wenn im HDFS das Ausgabeverzeichnis bereits vorhanden ist, muss dieses beim Starten eines Benchmarks zunächst gelöscht werden. Um mehrere Clients unabhängig voneinander nutzen zu können, besitzt jeder Client zudem ein spezifisches Verzeichnis, das seiner eigenen Client-ID entspricht. Die Ein- und Ausgabedaten werden dadurch nur im Verzeichnis des jeweiligen Clients gespeichert.

Wenn eine Anwendung gestartet wurde, wird diese zunächst synchron ausgeführt, bis von der gestarteten Anwendung ihre vom Cluster zugewiesene ID zurückgegeben wird. Diese ID wird vom Client abgespeichert und wird dafür benötigt, um in späteren Testfällen die Anwendung wieder beenden zu können. Zudem wird auch eine noch leere `YarnApp`-Instanz ermittelt und dieser die ID ebenfalls zugewiesen, um diese analog

zu den anderen YARN-Komponenten zum Speichern der Daten der Anwendung zu nutzen. Der Unterschied hierbei ist jedoch, dass immer eine neue Instanz genutzt wird, da eine neue Anwendung automatisch immer eine ID erhält, welche im Cluster noch nicht existiert. Wenn keine leere `YarnApp`-Instanz mehr verfügbar ist, wird analog zum Monitoring ebenfalls eine `OutOfMemoryException` ausgelöst.

4.2.8. Implementierung des Controllers

Der Controller repräsentiert zum einen den RM des Hadoop-Clusters, weshalb er auch von `YarnHost` erbt, genauso wie die Klasse der Nodes des YARN-Modells. Seine Hauptaufgabe besteht jedoch darin, als Controller zum Testen mit S# zu dienen (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Der Controller steuert einen Großteil der Ausführung eines einzelnen Testfalls und ist die einzige Komponente des YARN-Modells, welche direkt mit dem Oracle interagiert:

```
1 public override void Update()  
2 {  
3     MonitorMarp();  
4  
5     foreach(var client in ConnectedClients)  
6         client.UpdateBenchmark();  
7  
8     // optional, to allocate at least the AM container  
9     ModelUtilities.Sleep(5);  
10  
11     MonitorAll();  
12  
13     Oracle.ValidateConstraints(EConstraintType.Sut);  
14     Oracle.IsReconfPossible();  
15     Oracle.ValidateConstraints(EConstraintType.Test);  
16 }
```

Listing 4.7: `Update()`-Methode des Controllers (gekürzt). Eine ausführliche Beschreibung des Ablaufs der Ausführung eines Testfalls findet sich in Abschnitt 6.1.4.

Nach einem ersten Monitoring des MARP-Wertes wird durch den Controller sichergestellt, dass jeder simulierte Client eine Anwendung startet, sofern vom Benchmark-Controller hierbei eine neue Anwendung ausgewählt wird (vgl. Abschnitt 4.2.7 und Abschnitt 5.3).

Vor dem Monitoring wird zunächst fünf Sekunden gewartet, damit die gestarteten Anwendungen auf dem Cluster die benötigten Ressourcen erhalten können, wodurch die Auslastung des Clusters besser ermittelt werden kann. Zum Monitoring nutzt der Controller die von `IYarnReadable` bereitgestellte Eigenschaft um das Selbstmonitoring der einzelnen YARN-Komponenten zu deaktivieren und führt dabei das Monitoring der Nodes und Anwendungen aus. Er startet zudem bei jeder Anwendung auch das

Monitoring der jeweiligen Attempts bzw. dadurch auch das der Anwendungs-Container, sofern benötigt. Dabei wird der MARP-Wert hier erneut ausgelesen, da er sich abhängig von den ausgeführten Anwendungen jederzeit verändern kann. Abschließend startet der Controller die Validierung der Constraints durch das Oracle sowie die Prüfung, ob eine weitere Rekonfiguration des Clusters möglich ist.

Für den Controller selbst sind ebenfalls einige der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen relevant. Die hierbei relevanten Anforderungen sind ebenfalls direkt im Controller implementiert und werden durch das Oracle validiert.

4.2.9. Implementierung des Oracles

Das Oracle dient zur Validierung der in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen automatisiert durch das Testsystem. Hierzu validiert es die Constraints aller YARN-Komponenten und des Controllers, jeweils getrennt nach Constraints für das SuT und das gesamte Testsystem, und prüft, ob eine Rekonfiguration des Clusters möglich ist. Da die beiden von `IYarnReadable` bereitgestellten Eigenschaften zum Speichern der Constraints vom Typ `Func<bool>[]` sind, können so jeweils alle implementierten Constraints nacheinander validiert werden:

```
1 public static bool ValidateConstraints(string componentId,
2     Func<bool>[] constraints, EConstraintType constraintType)
3 {
4     var isComponentValid = true;
5     for(var i = 0; i < constraints.Length; i++)
6     {
7         var constraint = constraints[i];
8         bool isValid;
9         try
10        {
11            isValid = constraint();
12        }
13        catch
14        {
15            isValid = false;
16        }
17
18        CountCheck(constraintType, isValid);
19        if(!isValid)
20        {
21            Logger.Error($"YARN component not valid: " +
22                "Constraint {i} in {componentId}");
23            if(isComponentValid)
24                isComponentValid = false;
25        }
26    }
27 }
```

```
28     return isComponentenValid;  
29 }
```

Listing 4.8: Validieren der Constraints durch das Oracle. Die zu validierenden Constraints werden im Parameter `constraints` übergeben, der Parameter `constraintType` dient zu statistischen Zwecken in `CountCheck()`.

Das Oracle prüft auch ob eine weitere Rekonfiguration möglich ist. Sind dagegen alle Nodes im Cluster defekt bzw. wurde dies beim Monitoring des realen Clusters erkannt, wird die Ausführung gemäß Abschnitt 3.2.2 abgebrochen. Dazu wird eine `Exception` ausgelöst, welche zum Abbruch der Ausführung dient:

```
1 public bool IsReconfPossible()  
2 {  
3     var isReconfPossible = ConnectedNodes  
4         .Any(n => n.State == ENodeState.RUNNING);  
5     if(!isReconfPossible)  
6     {  
7         Logger.Error("No reconfiguration possible!");  
8         throw new Exception("No reconfiguration possible!");  
9     }  
10    return true;  
11 }
```

Listing 4.9: Prüfung nach der Möglichkeit weiterer Rekonfigurationen

Die bereits in Listing 4.8 genutzte Methode `CountCheck()` dient zu statistischen Zwecken. Hierbei wird getrennt nach Constraint-Typ (für das SuT oder für das Testsystem) gezählt, wie viele Constraints insgesamt validiert wurden und wie viele verletzt wurden. Die jeweiligen Werte können beim Abschluss einer Ausführung des Modells entsprechend ausgegeben werden.

4.3. Entwicklung des Treibers

In Abschnitt 4.1 wurde bereits aufgezeigt, dass der Treiber zur Verbindung des YARN-Modells mit dem realen Cluster aus den drei Komponenten Parser, Connector und der SSH-Verbindung selbst besteht. Der Treiber ist im YARN-Modell mithilfe verschiedener Interfaces zur Nutzung des Parsers und Connectors eingebunden. Da YARN mithilfe von Befehlen für die CLI und einer REST-API zwei unterschiedliche Schnittstellen zum Auslesen der Daten der YARN-Komponenten für das Monitoring bereitstellt, wurden jeweils zwei entsprechende Parser und Connectoren hierfür entwickelt. Andere Befehle wie z. B. HDFS-Befehle können ebenfalls mithilfe des entwickelten CLI-Connectors ausgeführt werden, da Connectoren mithilfe von SSH-Verbindungen mit den Cluster-Hosts verbunden sind.

4.3.1. Grundlegender Aufbau und Integration im YARN-Modell

Zur Integration des Treibers im YARN-Modell stellt dieser mehrere Interfaces bereit. Dadurch sind einerseits der Treiber und das YARN-Modell strikt getrennt, andererseits wird es dadurch auch ermöglicht, in Zukunft andere Möglichkeiten als die hier Entwickelten zur Interaktion mit dem realen Cluster zu entwickeln und zu nutzen.

Zur Interaktion des YARN-Modells mit dem Treiber werden dem Modell folgende Interfaces zur Verfügung gestellt:

- `IHadoopParser` für Parser
- `IHadoopConnector` für Connectoren
- Von `IParsedComponent` abgeleitete Interfaces für geparte YARN-Komponenten:
 - `IApplicationResult` für Anwendungen
 - `IAppAttemptResult` für Attempts
 - `IContainerResult` für Anwendungs-Container
 - `INodeResult` für Nodes

Das Monitoring der Daten des realen Clusters wird mithilfe des Parsers durchgeführt. Das Interface `IHadoopParser` stellt hierfür entsprechende Parsing-Methoden für die vier implementierten YARN-Komponenten sowie der Übersichtslisten aller einer YARN-Komponente untergeordneten Subkomponenten. Zudem stellt das Parser-Interface eine Methode zum Auslesen des aktuellen MARP-Wertes des Schedulers bereit. Beim Monitoring werden immer die entsprechenden von `IParsedComponent` abgeleiteten Interfaces zur Rückgabe der ermittelten Daten genutzt. Hierfür stellen diese Interfaces entsprechende Eigenschaften bereit, um alle mithilfe der CLI oder der REST-API auslesbaren Daten an das YARN-Modell übergeben zu können.

Das Connector-Interface `IHadoopConnector` stellt alle zum Abrufen der Daten oder weiteren Interaktion wie das Injizieren von Komponentenfehlern oder Starten von Anwendungen benötigten Methoden und Befehle bereit. Hierbei wird für das Monitoring unterschieden, ob die Daten vom TLS oder vom RM von Hadoop abgerufen werden. Dies ist vor allem bei der Nutzung der REST-API wichtig, da sich hier die Adressen und Pfade unterscheiden, während bei der Benutzung der CLI die Befehle gleich sind. Der TLS wird zum Abrufen der Daten vor allem aus dem Grund genutzt, da hierbei zusätzliche Daten ermittelt werden können, die bei der reinen Nutzung der Schnittstellen des RM nicht zurückgegeben werden würden. Ausgenommen sind hiervon Anwendungen, bei denen die Nutzung des TLS keine weiteren Daten von Hadoop zurückgegeben werden[16, 18–20]. Aus diesem Grund ist die Nutzung des TLS zum Monitoring von Anwendungen mithilfe des Connector-Interfaces nicht möglich.

Die Implementierten Parser und Connectoren sind jeweils als Singleton realisiert und sind von der Serialisierung des YARN-Modells durch `S#` ausgenommen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass dadurch Speicher eingespart wird, der dadurch für

andere YARN-Komponenten zur Verfügung steht. Aber auch weitere Einschränkungen durch `S#` spielten eine Rolle (vgl. Abschnitt 2.1). Ein weiterer Vorteil liegt zudem darin, dass für unterschiedliche Einsatzzwecke der gleiche Connector genutzt werden kann, und somit auch die einzelnen vom Connector benötigten SSH-Verbindungen für unterschiedliche Einsatzzwecke wiederverwendet werden können. Die Initialisierung der Parser und Connectoren erfolgt jeweils beim ersten Aufruf der Singletons. Dies geschieht innerhalb des Testsystems üblicherweise entweder beim Initialisieren des Tests (beschrieben in Abschnitt 6.4) oder beim Initialisieren des YARN-Modells selbst durch die Klasse `Model`. Die Initialisierung des Modells stellt zudem den einzigen Zeitpunkt dar, bei dem im YARN-Modell direkt mit den implementierten Parsern und Connectoren interagiert wird, jede andere Interaktion findet stattdessen gekapselt mithilfe der Interfaces statt.

Die drei Komponenten des Treibers sind zudem untereinander voneinander gekapselt. Bei der Ausführung des Parsers wird daher analog nur zur Initialisierung mit dem konkreten Connector interagiert, während das Connector-Interface zum Monitoring als einzige Schnittstelle dient. Da für die SSH-Verbindung kein eigenes Interface zur Kapselung existiert, ist die Kapselung der Connectoren und der bereitstellenden Klasse der SSH-Verbindung nicht so streng wie zwischen anderen Komponenten. Dennoch werden Befehle auf den Cluster-Hosts ausschließlich mithilfe des Connectors durchgeführt.

4.3.2. Entwicklung der Parser

Der Parser dient dazu, die von Hadoop zurückgegebenen Daten der YARN-Komponenten einzulesen und dem Modell zu übergeben. Zur Datenhaltung innerhalb der Parser-Komponente des Treibers wurden hierfür entsprechende Klassen entwickelt, welche die von `IParsedComponent` abgeleiteten Interfaces implementieren. Dadurch sind die Datenhaltungs-Klassen auch direkt dafür geeignet, die Daten an das Modell zu übergeben. Eine Besonderheit bilden hierbei die ausführenden Nodes der Container bzw. `AppMstr`-Container. Während bei den anderen YARN-Komponenten nur ihre ID zurückgegeben wird, werden bei den ausführenden Nodes direkt ihre korrespondierenden Instanzen im Modell zurückgegeben.

Der grundlegende Ablauf der Initialisierung und dem Abrufen und Konvertieren der Daten ist bei beiden implementierten Parser gleich. Beim Initialisieren des Parsers wird zunächst der benötigte, passende Connector initialisiert. Beim Abrufen und Konvertieren der Daten werden zunächst, sofern benötigt, die IDs von weiteren benötigten YARN-Komponenten ermittelt, bevor die Rohdaten durch den Connector ermittelt werden. Die Rohdaten werden anschließend konvertiert und in der entsprechenden Datenhaltungs-Klasse gespeichert, welche mithilfe der entsprechenden von `IParsedComponent` abgeleiteten Interfaces zurückgegeben.

Da Hadoop zwei Schnittstellen in Form der CLI und der REST-API bereit stellt, wurden hierfür entsprechend zwei Parser entwickelt, um die jeweiligen Daten einzulesen.

Implementierung des CmdParsers

Der erste der beiden entwickelten Parser ist der `CmdParser` zum Monitoring mithilfe von Befehlen auf der CLI. Zum Auslesen der Daten selbst nutzt der `CmdParser` den dazugehörigen `CmdConnector` (vgl. Abschnitt 4.3.3), mit dem zum Auslesen der Daten die entsprechenden CLI-Befehle ausgeführt werden. Die hierbei zurückgegebenen Daten sind im Vergleich zu den von der REST-API zurückgegebenen im Umfang deutlich reduziert, in den jeweiligen Übersichten der Subkomponenten zudem auf das notwendige beschränkt. Im Gegenzug zur REST-API werden hier die Daten des RM und TLS kombiniert ausgegeben. Eine kurze Übersicht über die Befehle und deren Ausgaben ist im Anhang A zu finden.

Ausgewertet werden die von Hadoop zurückgegebenen Daten mithilfe von Regular Expressions (Regex). Da das Ausgabeformat jeweils in Listenform oder als ausführlicher Report immer das gleiche Format aufweist, wurden hierfür zwei generische Regex-Pattern entwickelt, welche zur Auswertung fast aller Daten ausreichend sind:

```
1 Regex _GenericListRegex = new Regex(@"\s*([^\t]+)");
2 Regex _GenericDetailsRegex = new Regex(@"\t(.+)\s:\s([^\t]*)[\n\r]",
    RegexOptions.Multiline);
```

Listing 4.10: Implementierte Regex-Pattern im `CmdParser`

Bei zurückgegebenen Listen müssen diese zur Auswertung zunächst zeilenweise getrennt werden, bevor das Regex-Pattern genutzt werden kann. Anschließend können durch die Reihenfolge der jeweiligen Regex-Matchgruppen die jeweiligen Daten der Komponente den entsprechenden Eigenschaften der Datenhaltungsklassen zugeordnet werden.

Eine Besonderheit bilden Zeitstempel. Diese werden von Hadoop bei der Nutzung der CLI meist in Form des Java-Timestamps in Millisekunden seit dem 1. Januar 1970 00:00:00 Uhr, in der Liste der ausgeführten Container eines Attempts stattdessen im Format `ddd MMM dd HH:mm:ss zz00 yyyy`. Dies entspricht z. B. dem Zeitstempel `Fri Jan 05 11:08:16 +0000 2018`. Weiterführende Informationen zur Formatierung von Zeitstempeln in .NET finden sich in [38]. Der von Hadoop zurückgegebene Zeitstempel muss in beiden Fällen zunächst in ein .NET-kompatibles Format umgewandelt werden. Dies geschieht mithilfe der Methode `ParseJavaTimestamp()`, für die mehrere Überladungen implementiert wurden:

```
1 public static DateTime ParseJavaTimestamp(long javaMillis)
2 {
3     if(javaMillis < 1)
4         return DateTime.MinValue;
```



```
5  var javaTimeUtc = new DateTime(1970, 1, 1, 0, 0, 0,
6      DateTimeKind.Utc).AddMilliseconds(javaMillis);
7  return javaTimeUtc.ToLocalTime();
8  }
9
10 public static DateTime ParseJavaTimestamp(string value,
11     string format, CultureInfo culture = null)
12 {
13     culture = culture ?? new CultureInfo("en-US");
14     DateTime time;
15     DateTime.TryParseExact(value, format, culture,
16         DateTimeStyles.AssumeUniversal, out time);
17     return time;
18 }
```

Listing 4.11: Überladungen der Methode `ParseJavaTimestamp()`. Es steht zudem eine weitere Überladung zur Verfügung, um den Timestamp in Form der Millisekunden seit 1970 als `string` zu übergeben. Dabei wird der `string` in einen `long` konvertiert und anschließend die erste hier gezeigte Überladung aufgerufen.

Die hierbei zurückgegebenen `DateTime`-Instanzen werden anschließend zum Speichern der Zeitstempel genutzt.

Die Speicherung und Übergabe der ausführenden Nodes des AppMstr oder der Container an das Modell geschieht direkt als entsprechende Node-Instanz innerhalb des Modells. Hierfür wird die ID bzw. die URL des Nodes genutzt, um die korrespondierende Instanz im YARN-Modell zu ermitteln und zu speichern.

Implementierung des RestParsers

Der zweite entwickelte Parser ist der `RestParser`. Er dient dazu, die mithilfe der REST-API ermittelten Daten auszuwerten und an das YARN-Modell zu übergeben. Zum Auslesen der Daten aus dem Cluster wurde hierfür der `RestConnector` entwickelt (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die REST-API besitzt, auch im Vergleich zur CLI-Schnittstelle, einige Besonderheiten, auf die bei der Implementierung geachtet werden musste [16, 18–20]:

- Die zurückgegebenen Daten sind deutlich umfangreicher als bei der CLI-Schnittstelle
- Die Daten können im XML- oder JSON-Format zurückgegeben werden
- Attempts können nur als Liste aller Attempts einer Anwendung zurückgegeben werden
- Daten zu Containern können nur durch die NM der ausführenden Nodes ermittelt werden
- Die Adressen und Pfade von RM, NM und TLS unterscheiden sich
- Die Daten von RM und NM sind immer umfangreicher als die des TLS

- Der TLS enthält für Attempts und Anwendungs-Container jedoch zusätzliche Daten
- Es werden bei Listen und Reports immer die gleichen Objekte der YARN-Komponenten zurückgegeben

Da die REST-API die Rückgabe der Daten in zwei Formaten ermöglicht, wurde der `RestParser` aufgrund der kleineren Datenmengen und übersichtlicheren Datenformats zur Nutzung des JSON-Formats entwickelt. Einige Beispiele für die entsprechenden Pfade der REST-API sowie deren Ausgaben im JSON-Format sind in Anhang B zu finden.

Die Auswertung der Daten geschieht beim `RestParser` zudem nicht mit Regex, sondern mithilfe des *Json.NET*-Frameworks² (Version 11.0.2). Hierfür wurden neben den bestehenden Datenhaltungsklassen noch weitere Hilfsklassen entwickelt, welche das Ausgabeformat der REST-API nachbilden. Mit deren Hilfe ist es möglich, alle Daten automatisch mithilfe von *Json.NET* aus den JSON-Daten deserialisieren zu können.

Analog zum `CmdParser` müssen auch bei der Nutzung der REST-API die Zeitstempel gesondert betrachtet werden. Damit die Konvertierung der Java-Zeitstempel in Millisekunden seit dem 1. Januar 1970 00:00:00 Uhr gemeinsam mit den anderen Daten durch das *Json.NET*-Framework durchgeführt werden kann, musste hierfür ein gesonderter Konverter entwickelt werden. Der Konverter nutzt ebenfalls die in Listing 4.11 gezeigte `ParseJavaTimestamp()` zum Konvertieren der Daten:

```
1 public class JsonJavaEpochConverter : DateTimeConverterBase
2 {
3     private static readonly DateTime _Epoch = new DateTime(1970, 1, 1,
4         0, 0, 0, DateTimeKind.Utc);
5
6     public override void WriteJson(JsonWriter writer, object value,
7         JsonSerializer serializer)
8     {
9         writer.WriteRawValue(((DateTime)value - _Epoch).TotalMilliseconds.
10             ToString());
11     }
12
13     public override object ReadJson(JsonReader reader, Type objectType,
14         object existingValue, JsonSerializer serializer)
15     {
16         return DriverUtilities.ParseJavaTimestamp((long)reader.Value);
17     }
18 }
```

Listing 4.12: Entwickelter Konverter für Java-Zeitstempel zur Nutzung mit *Json.NET*. Dieser erbt dafür von `DateTimeConverterBase` des *Json.NET*-Frameworks, damit der `JsonJavaEpochConverter` auch zur Deserialisierung genutzt werden kann.

²<https://www.newtonsoft.com/json>

Da der TLS bei der Ausgabe der Daten zu Attempts und Containern zusätzliche Informationen enthält, werden hier nicht nur die Daten mithilfe des RM bzw. der NM der ausführenden Nodes, sondern auch mithilfe des TLS. Hierzu werden zunächst die Daten des RM bzw. der NM ermittelt und mit die zusätzlichen Informationen des TLS ergänzt, sofern hier Daten verfügbar sind. Aufgrund der Besonderheiten der REST-API im Bezug auf Attempts und Container, werden bei diesen beiden YARN-Komponenten zunächst immer die Daten aller Attempts einer Anwendung bzw. aller Container eines Attempts ermittelt und konvertiert. Sollten jedoch nur die Daten jeweils eines Attempts bzw. Containers benötigt werden, werden diese Listen entsprechend gefiltert:

```
1 public IContainerResult ParseContainerDetails(string containerId)
2 {
3     var attemptId = DriverUtilities.ConvertId(containerId, EConvertType.
        Attempt);
4     var allContainers = ParseContainerList(attemptId);
5     return allContainers.FirstOrDefault(c => c.ContainerId ==
        containerId);
6 }
```

Listing 4.13: Konvertierung und Rückgabe der Daten eines durch den `RestParser`. Hierbei muss für den hier gezeigten, einzelnen Container zunächst ID des übergeordneten Attempts ermittelt werden, bevor aus der Liste aller Container die Daten des gesuchten Containers zurückgegeben werden können. Bei Attempts ist dieses Vorgehen analog.

Aufgrund dieser Besonderheiten eignet sich auch das in Abschnitt 4.2.5 beschriebene Monitoring durch die übergeordnete Komponente bei der Nutzung der REST-API besser als das Selbstmonitoring.

4.3.3. Entwicklung der Connectoren

Der Connector dient zur Abstrahierung der SSH-Verbindung (vgl. Abschnitt 4.3.4), damit diese in höheren Schichten einfach genutzt werden kann. Dazu beinhaltet der Connector die jeweiligen Befehle, die auf dem Cluster-Host ausgeführt werden. Das Interface `IHadoopConnector` stellt Befehle für folgende Anwendungszwecke bereit:

- Monitoring aller YARN-Komponenten vom RM, NM oder TLS
- Starten und Beenden von Nodes bzw. derer Netzwerkverbindungen
- Starten und Beenden von Anwendungen
- Prüfen und Löschen von Daten auf dem HDFS
- Starten und Beenden des gesamten Clusters
- Monitoring des MARP-Wertes

Die implementierten Connectoren selbst bauen hierzu eine oder mehrere SSH-Verbindungen auf, von denen jede Verbindung nur für einen bestimmten Typ an Befehlen

genutzt wird. Je nach Fähigkeiten des Connectors und Bedarf werden dadurch einzelne Verbindungen zum Monitoring, zum Injizieren und Reparieren von Komponentenfehlern oder zum Starten von Anwendungen aufgebaut. Wenn das Cluster auf mehreren Hosts ausgeführt wird, werden zu jedem Host die entsprechend benötigten Verbindungen aufgebaut. Um die SSH-Verbindungen aufbauen zu können, nutzt der Connector die in `ModelSettings` gespeicherten Zugangsdaten der Hosts.

Das Initialisieren und Ausführen von Befehlen auf dem Cluster-Host erfolgt ähnlich wie bei den Parsern immer nach dem gleichen Schema. Zunächst werden beim Initialisieren des Connectors alle für seine Aufgaben benötigten SSH-Verbindungen initialisiert und aufgebaut. Die hierfür notwendigen Zugangsdaten werden durch den Connector aus den `ModelSettings` den Verbindungen zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.3.4). Wenn anschließend ein Befehl auf dem Cluster-Host ausgeführt werden soll, wird zunächst geprüft, ob der Connector diesen Befehl unterstützt bzw. die dafür benötigte Verbindungen initialisiert wurden. Ist das nicht der Fall, wird eine `PlatformNotSupportedException` ausgelöst, wenn der Connector den Befehl nicht unterstützt, bzw. eine `InvalidOperationException` ausgelöst, wenn die benötigten Verbindungen nicht initialisiert wurden. Anschließend werden die benötigten Parameter des auszuführenden Befehls ermittelt, zu denen auch die Auswahl des Hosts dazu gehört, auf dem der Befehl ausgeführt werden soll. Nach der im Anschluss folgenden Ausführung des Befehls auf dem Host des Clusters werden die zurückgegebenen Daten bei Monitoring-Befehlen im Rohformat an die anfragende Komponente weitergegeben und bei anderen Befehlen zunächst einer einfachen Auswertung unterzogen, damit das Ergebnis des Befehls durch die anfragende Komponente verarbeitet werden kann. Aus diesem Grund werden die Befehle synchron ausgeführt, was bedeutet, dass bei der Ausführung eines Befehls immer bis zu seinem Ende gewartet wird. Eine Ausnahme bildet hierbei das Starten von Anwendungen, was auch teilweise asynchron und vollständig asynchron durchgeführt werden kann. Teilweise Asynchron bedeutet hier, dass die auf dem Cluster zu startende Anwendung nur solange synchron ausgeführt wird, bis der Anwendung eine ID zugewiesen wurde, welche zurückgegeben wird. Diese Funktion wird daher zum Starten der Anwendungen durch den Client genutzt, da dieser die Anwendungs-ID abspeichert (vgl. Abschnitt 4.2.7).

Da die beiden implementierten Parser unterschiedliche Befehle zum Abrufen der Daten benötigen, wurden hierfür zwei entsprechende Connectoren entwickelt. Die Connectoren führen dabei nicht nur Befehle zum Monitoring aus, sondern alle die für ihre Schnittstellen verfügbaren und benötigten Befehle.

Implementierung des `CmdConnectors`

Der erste der beiden implementierten Connectoren ist der `CmdConnector`. Er dient zum Ausführen von allen CLI-Befehlen, die im Rahmen der Fallstudie benötigt werden. Dabei

wird nicht immer direkt mit Hadoop oder den Anwendungen interagiert, sondern immer mithilfe eines entsprechenden Setup- oder Startscriptes (vgl. Abschnitt 4.4.3), welches vom Connector hierzu aufgerufen wird. Das konkret genutzte Setupscript ist hierbei abhängig vom **HostMode**. Da die Verwaltung des genutzten **HostModes** vollständig durch die **ModelSettings** durchgeführt wird, kann der Connector unabhängig hiervon genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Notwendig ist hierfür jedoch, dass die Scripte immer die in Anhang C gezeigten Befehle enthalten.

Da das Starten der Anwendungen die einzige asynchrone Operation darstellt, die der Connector durchführen muss, werden hierfür die meisten SSH-Verbindungen aufgebaut. Wenn eine Anwendung gestartet werden soll, wird immer eine freie SSH-Verbindung ausgewählt und die Anwendung mithilfe dieser gestartet. Die Verbindung wird dabei solange zum Starten von anderen Anwendungen gesperrt, solange der ausführende Befehl, also die gestartete Anwendung, nicht beendet wurde (vgl. Abschnitt 4.3). Sind dadurch alle Submitter belegt und eine weitere Anwendung soll gestartet werden, wird nach einer gewissen Zeit eine **TimeoutException** ausgelöst. Die Befehlsparameter zum Starten der Anwendungen wird von den jeweiligen Benchmarks zur Verfügung gestellt, sodass der Connector nur das Benchmark-Script mit den bereitgestellten Befehlsparametern ausführen muss (vgl. Abschnitte 4.4.3 und 5.3.1).

Implementierung des RestConnectors

Der zweite implementierte Connector, der **RestConnector** dient vor allem dem Monitoring mithilfe der REST-API. Aus diesem Grund lösen alle Methoden, die nicht dem Monitoring durch die REST-API dienen, eine entsprechende **PlatformNotSupportedException** aus.

Zum Abrufen der Daten dienen ebenfalls SSH-Verbindungen, jedoch ist hier eine pro Host, auf dem das Cluster ausgeführt wird, ausreichend. Auf dem Host wird zum Abrufen der Daten das Tool `curl`³ (Version 7.47) genutzt, wobei die Daten immer explizit im JSON-Format angefragt werden.

Da die Daten von Anwendungs-Containern immer durch die NM der ausführenden Nodes zurückgegeben werden, kann es hier passieren, dass der entsprechende Node aufgrund eines Komponentenfehlers beendet oder nicht erreichbar ist. Wenn daher statt den Container-Daten eine Fehlermeldung zurückgegeben wird, werden in so einem Fall keine Rohdaten vom Connector zurückgegeben, sondern **String.Empty**.

Auch die Funktionen des **RestConnectors** können unabhängig vom genutzten **Host Mode** genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.4.2). Die Verwaltung der korrekten Adressen von RM und TLS erfolgt analog zum benötigten Setupscript zum **CmdConnector** durch die **ModelSettings**-Klasse. Ein Unterschied besteht jedoch bei den Adressen der NM zum Monitoring der Container. Da die Adressen der jeweiligen Nodes in der von

³<https://curl.haxx.se/>

`YarnHost` vererbten Eigenschaft `HttpUrl` gespeichert sind, werden die Adressen auch vom Connector genutzt, um mithilfe der REST-API die Daten der auf einem Node ausgeführten Container zu abzurufen. Daher wird die vom `HostMode` abhängige Adresse der Nodes beim Initialisieren des Modells entsprechend im Modell gespeichert (vgl. Abschnitt 4.2.1).

4.3.4. Implementierung der SSH-Verbindung

Die SSH-Verbindung zum Host des realen Clusters wird mithilfe des Frameworks `SSH.NET`⁴ (Version 2016.1.0) aufgebaut. Verwaltet wird die Verbindung mithilfe der Verbindungsklasse `SshConnection`. Die Verbindung ist zudem der einzige Bestandteil des Treibers, welcher kein entsprechendes Interface bereitstellt, da die SSH-Verbindungen ausschließlich durch die implementierten Connectoren genutzt werden.

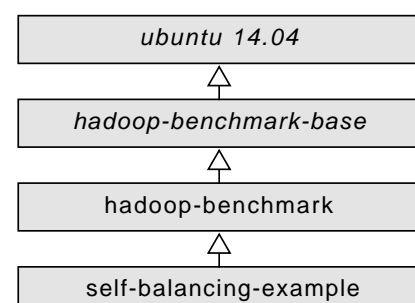
Die zum Aufbau der Verbindung benötigten Zugangsdaten, die in `ModelSettings` gespeichert sind, müssen mithilfe des Connectors beim Initialisieren übergeben werden. Hierbei stellt die Verbindungsklasse selbst zwar die Möglichkeit bereit, ein Passwort zu nutzen, jedoch besteht in `ModelSettings` nur die Angabe eines SSH-Schlüssels zur Verfügung, was zudem die Sicherheit erhöht. Zudem besteht bei der Nutzung eines SSH-Schlüssels die Möglichkeit, die Verbindung jederzeit zu trennen und erneut aufzubauen, was im implementierten Modell jedoch nicht durchgeführt wird.

Die Verbindungsklasse ist auch dafür zuständig, die vom Connector erhaltenen auszuführenden Befehle an den Host zur Ausführung zu senden und auf die Rückgabe der Befehlsausgabe zu warten. Hierbei wird zudem jede Kommunikation zwischen dem Treiber und dem Cluster-Host in einer eigenen, von den Tests unabhängigen, Logdatei gespeichert, dem SSH-Log. Die Verbindungsklasse ist auch dafür zuständig, dass beim teilsynchronen Starten einer Anwendung die Anwendungs-ID ermittelt und die Anwendung anschließend asynchron ausgeführt wird (vgl. Abschnitte 4.2.7 und 4.3.3).

Pro SSH-Verbindung kann nur jeweils ein Befehl gleichzeitig auf dem Host ausgeführt werden. Daher muss die Verbindungsklasse sicherstellen, dass die Verbindung auch bei asynchron ausgeführten Befehlen solange als belegt markiert ist, solange der Befehl nicht beendet ist. Dies geschieht mithilfe einer entsprechenden Eigenschaft `InUse`, mit der freie und belegte Verbindungen voneinander getrennt werden können.

4.4. Umsetzung des realen Clusters

Das reale Cluster wurde mithilfe der Plattform Hadoop-Benchmark umgesetzt. Hierzu wurden speziell für diese Fallstudie verschiedene Szenarien



⁴<https://github.com/sshtnet/SSH.NET>

entwickelt, mithilfe denen das Cluster mit den benötigten Einstellungen bzw. den zu testenden Mutanten gestartet wurde. Um die Verwaltung des Clusters zu vereinfachen wurden zudem entsprechende Setup- und Startscripte entwickelt, die auch von den implementierten Connectoren genutzt wurden.

4.4.1. Grundlegender Aufbau

Da Docker (genutzt wird hier Version 18.03 CE) und Hadoop vor allem zum Einsatz in Linux-Umgebungen entwickelt wurden, werden für das reale Cluster bis zu zwei physische Linux-Hosts genutzt. Auf einem dieser beiden Hosts wird mithilfe von VirtualBox 5.2 eine VM mit Windows 10 Education Version 1803 ausgeführt, um die Tests mithilfe von S# auszuführen. Dies ist nötig, da S# mithilfe des .NET-Frameworks entwickelt wurde (vgl. Abschnitt 2.1), welches auf Linux zudem nur in einem verringertem Funktionsumfang verfügbar ist [39].

Die beiden Hosts sind jeweils mit einem Intel Core i5-4570 @ 3,2 GHz x 4, 16 GB Arbeitsspeicher sowie einer SSD ausgestattet, auf der Ubuntu 16.04 LTS als Betriebssystem installiert ist.

Insgesamt wurden für diese Fallstudie die 6 in Abb. 4.4 gelb bzw. orange hinterlegten Szenarien mit den entsprechenden Docker-Images entwickelt. Das zentrale Image in dieser Fallstudie ist das gelb hinterlegte **self-balancing-mt**, in dem alle benötigten angepassten Einstellungen enthalten sind. Dies betrifft z. B. die Anpassung der Zeitabstände zur Erkennung von defekten Nodes oder das Starten des TLS, welcher in den Standard-Szenarien der Plattform nicht gestartet wird. Die orange hinterlegten Images dienen zur Ausführung der Mutationstests. Die Images enthalten daher nur die mutierte Selfbalancing-Komponente, welche dadurch die in **self-balancing-example** enthaltene überschreiben. Das Namenssuffix der Images bzw. Szenarien in Form der Nummern geben an, welche der in Abschnitt 6.2 generierten Mutationen enthalten sind.

4.4.2. HostMode des Clusters

Der bereits mehrfach erwähnte **HostMode** beschreibt den prinzipiellen Aufbau des gestarteten Clusters. Es ist hierbei möglich, das Cluster wie in Abschnitt 2.4 beschrieben mithilfe von Docker Machine zu starten, wodurch entsprechende VMs gestartet werden,

auf denen das Cluster auf Docker-Containern ausgeführt wird. Der größte Nachteil dieses **DockerMachine**-Modes ist, dass das Cluster nicht bzw. nur umständlich auf mehreren Hosts ausgeführt werden kann.

Um das Cluster auf beiden für diese Fallstudie genutzten Hosts auszuführen, wurde daher der **Multihost**-Mode entwickelt, bei dem die Docker-Container des Clusters direkt auf den jeweiligen Hosts ohne Docker Machine gestartet werden:

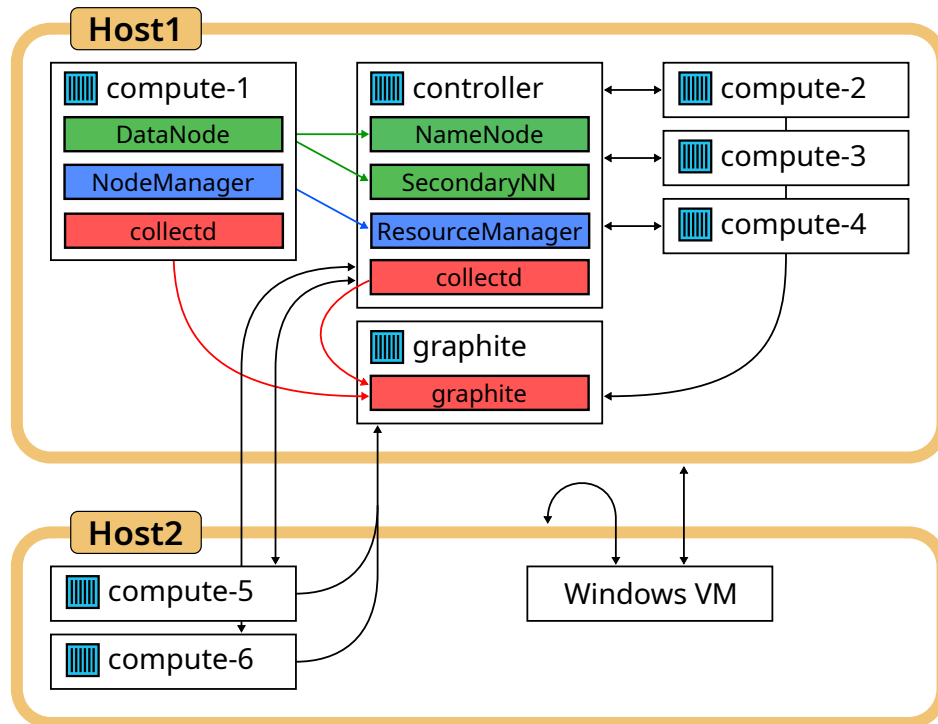


Abbildung 4.5.: Cluster-Setup bei der Nutzung des **Multihost**-Modes. Hier ist das konkrete, in dieser Fallstudie genutzte Setup gezeigt. Grün: HDFS, Blau: YARN, Rot: Graphite.

Die genaue Anzahl der zu nutzenden Hosts und der Hadoop-Nodes ist in beiden **HostModes** variabel, wodurch es auch möglich ist, das Cluster nur auf Host1 zu starten. Damit das Cluster jedoch auf beiden Hosts gestartet werden kann, ist es nötig, zuvor beide Hosts als Docker-Swarm miteinander zu verbinden. Außerdem können mithilfe des **Multihost**-Modes dem Hadoop-Cluster weitere, sonst für die Ausführung der VMs benötigte Ressourcen, zur Verfügung gestellt werden.

Je nach **HostMode** unterscheiden sich einzelne Pfade oder Adressen, z. B. die der REST-API. Auch aus diesem Grund wurde die bereits in Abschnitt 4.2.1 erläuterte Klasse **ModelSettings** entwickelt, welche die Verwaltung der entsprechenden Pfade und Adressen übernimmt.

4.4.3. Setup- und Startscripte

Die Plattform Hadoop-Benchmark enthält bereits zum Starten des Clusters ein Setup-Script und zum Ausführen der Benchmarks entsprechende Start-Scripte. Um die Interak-

tion aufgrund der beiden unterschiedlichen **HostModes** zu vereinfachen, wurde dennoch für jeden **HostMode** ein Setup-Script entwickelt, um die jeweils gleiche Befehlssyntax bereitstellen zu können. Die beiden entwickelten Setup-Skripte werden vom **CmdConnector** genutzt um die benötigten Aktionen auf dem Cluster auszuführen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die beiden Setup-Skripte abstrahieren somit die vom **HostMode** abhängigen, benötigten Befehle und sorgen dafür, dass der genutzte **HostMode** transparent ist, benötigen hierfür jedoch die gleiche, in Anhang C gezeigte, Befehlssyntax. Sie beinhalten entsprechende Befehle für folgende Aktionen:

- Starten und Beenden des gesamten Clusters
- Injizieren und Reparieren von Komponentenfehlern
- Ausführen von CLI-Befehlen von Hadoop

Zudem wird beim Starten des Clusters immer geprüft, ob sich die Dockerfiles geändert haben und entsprechend die Docker-Images aktualisiert, aus denen das Cluster gestartet wird. Die Setup-Skripte enthalten außerdem weitere, jeweils spezifische Befehle zum Umgang mit dem Cluster im entsprechenden **HostMode**.

Zum zentralen Starten der Benchmarks wurde ebenfalls ein zentrales Benchmark-Startscript entwickelt, welches die jeweiligen Start-Skripte der einzelnen Benchmarks ausführt. Dadurch kann analog zum Setup-Script unabhängig vom zu startenden Benchmark vom **CmdConnector** immer der gleiche Syntax genutzt werden. Das zentrale Benchmark-Startscript ermittelt basierend auf dem zu startenden Benchmark das jeweils benötigte Start-Script und übergibt die jeweils benötigten Parameter. Die vom **HostMode** abhängigen Parameter zum Starten der Benchmark-Container werden von den hierfür angepassten Start-Skripten der Benchmarks selbst ermittelt. Die jeweiligen Startparameter der Anwendungen selbst werden vom Benchmark-Controller (vgl. Abschnitt 5.3.1) bereitgestellt.

5. Implementierung der Benchmarks

Neben dem YARN-Modell selbst sind auch die während der Testausführung genutzten Anwendungen ein wichtiger Bestandteil des gesamten Testmodells. Da Hadoop selbst sowie die Plattform Hadoop-Benchmark bereits einige Anwendungen und Benchmarks enthalten, konnten diese auch im Rahmen dieser Fallstudie genutzt werden. Dazu wurde eine Auswahl an Anwendungen in einer Markow-Kette miteinander verbunden, mit dem die Ausführungsreihenfolge der einzelnen Anwendungen basierend auf Wahrscheinlichkeiten bestimmt wird. Verwaltet werden die implementierten Benchmarks mithilfe des Benchmark-Controllers.

5.1. Übersicht möglicher Anwendungen

Hadoop-Benchmark enthält bereits die Möglichkeit, unterschiedliche Benchmarks zu starten. Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, sind folgende Benchmarks in der Plattform bereits integriert:

- Hadoop Mapreduce Examples
- Intel HiBench
- SWIM

Jeder Benchmark enthält ein spezielles Start-Script, um die jeweiligen Benchmarks in einem Docker-Container zu starten. Dieser Container wird abhängig vom `HostMode` (vgl. Abschnitt 4.4.2) auf der VM des RM oder direkt auf dem Host gestartet. Da es in Docker-Umgebungen *best practice* ist, für jeden Einsatzzweck ein eigenes Image zu erstellen bzw. Container zu starten, werden für jede der drei Benchmark-Suites eigene Container ausgeführt. Um mehrere Benchmarks gleichzeitig starten und ausführen zu können, wurden die Startscripte der Benchmarks entsprechend angepasst.

5.1.1. Mapreduce Examples

Die Hadoop Mapreduce Examples sind unterschiedliche und meist voneinander unabhängige Anwendungen, die beispielhaft für die meisten Anwendungsfälle in einem produktiv genutzten Cluster sind. Die Examples sind Teil der Hadoop-Installation und daher standardmäßig in jedem Hadoop-Cluster verfügbar. Einige der Anwendungen der Examples sind:

- Generatoren für Text und Binärdaten, z. B. `randomtextwriter`
- Analysieren von Daten, z. B. `wordcount`

- Sortieren von Daten, z. B. `sort`
- Ausführen von komplexen Berechnungen, z. B. die Ausführung der *Bailey-Borwein-Plouffe-Formel* zur Berechnung einzelner Stellen von π

5.1.2. Intel HiBench

Intel HiBench¹ ist eine von Intel entwickelte Benchmark-Suite mit *Workloads* zu verschiedenen Anwendungszwecken mit jeweils unterschiedlichen einzelnen Anwendungen. Die in [40] entwickelte Suite enthielt anfangs nur wenige Anwendungen, wurde im Laufe der Zeit jedoch stetig um neue Anwendungen und auch Workloads erweitert. Das zeigt sich auch darin, dass in Hadoop-Benchmark die HiBench-Version 2.2 integriert ist, die einen noch deutlich geringeren Umfang an Workloads und Anwendungen besitzt, wie z. B. die aktuellere Version 7. Aus diesem Grund wurde vor der Analyse der Anwendungen der HiBench-Suite das Docker-Image entsprechend auf Version 7 aktualisiert, um hier entsprechend alle in der Zwischenzeit hinzugefügten Workloads und Anwendungen der Suite nutzen zu können. HiBench enthält damit folgende Workloads mit einer unterschiedlichen Anzahl an möglichen Anwendungen:

- Micro-Benchmarks (basierend auf den Mapreduce Examples und den Jobclient-Tests)
- Maschinelles Lernen
- SQL/Datenbanken
- Websuche
- Graphen
- Streaming

5.1.3. SWIM

SWIM² ist eine Benchmark-Suite, die aus 50 verschiedenen Workloads besteht. Das besondere an SWIM ist, dass die Suite im Rahmen der Studie [41] entwickelt wurde, und dadurch anhand mehrerer tausend real ausgeführten MR-Jobs entwickelt wurde. Die dabei enthaltenen Workloads stellen damit eine größere Vielfalt an ausgeführten Anwendungen und damit einen größeren Testumfang dar als vergleichbare Benchmarks[42].

Bei der Ausführung auf dem in dieser Fallstudie verwendeten Cluster wurden jedoch nicht alle Workloads fehlerfrei ausgeführt. Zudem wird in [43] explizit erwähnt, dass die Ausführung auf einem Cluster auf einem Host sehr zeitintensiv ist, sofern die Workloads überhaupt ausgeführt werden können. SWIM ist außerdem für Benchmarks eines Clusters mit mehreren physischen Nodes ausgelegt, weshalb die Ausführung in

¹<https://github.com/intel-hadoop/HiBench>

²<https://github.com/SWIMProjectUCB/SWIM>

dieser Fallstudie extrem viel Zeit benötigten würde. Daher wurde die Nutzung des SWIM-Benchmarks nicht weiter verfolgt.

5.1.4. Jobclient-Tests

Ebenfalls im Installationsumfang von Hadoop enthalten sind die hier aufgrund ihres Dateinamens als Jobclient-Tests bezeichneten Anwendungen. Hauptbestandteil dieser Tests sind vor allem weitere, den Mapreduce Examples ergänzende, Benchmarks, welche das gesamte Cluster oder einzelne Nodes testen. Der Fokus der Jobclient-Tests liegt im Gegensatz zu den Examples nicht auf dem MR- bzw. YARN-Framework, sondern beim HDFS. Da die Jobclient-Tests kein Teil von Hadoop-Benchmark sind, wurde zur Ausführung der Jobclient-Test zunächst ein eigenes Start-Script analog zur Ausführung der Mapreduce Examples erstellt, damit diese ebenfalls im Rahmen der Plattform Hadoop-Benchmark gestartet werden können. Die Jobclient-Tests enthalten u. A. folgende Arten an Anwendungen:

- HDFS-Systemtests, z. B. `SilveTest`
- Reine Lastgeneratoren, z. B. `NNloadGenerator`
- Eingabe/Ausgabe-Durchsatz-Tests, z. B. `TestDFSIO`
- DummyAnwendungen `sleep` und `fail`

5.2. Entwicklung des Transitionssystems

Damit die Fallstudie die Realität abbilden kann, wurden von allen verfügbaren Anwendungen einige ausgewählt und in ein Transitionssystem in Form einer Markow-Kette überführt. Diese Kette definiert die Ausführungsreihenfolge zwischen den einzelnen Anwendungen. Eine zufallsbasierte Markow-Kette wurde aus dem Grund verwendet, dass auch in der Realität Anwendungen nicht immer in der gleichen Reihenfolge ausgeführt werden und daher auch in der Fallstudie eine unterschiedliche Ausführungsreihenfolge der Anwendungen gewährleistet werden soll. Mithilfe der Festlegung eines bestimmten Seeds für den in der Fallstudie benötigten Pseudo-Zufallsgenerator besteht bei Bedarf dennoch die Möglichkeit, einen Test mit den gleichen Anwendungen wiederholen zu können.

5.2.1. Auswahl der Benchmarks

Einige der in Abschnitt 5.1 erwähnten Mapreduce Examples werden häufig als Benchmark verwendet. Einige Beispiele dafür sind die Anwendungen `sort` und `grep`, die bereits im Referenzpapier des MR-Frameworks zum Testen genutzt wurden [9]. Zum Testen des HDFS dient in [23] der DFSIO-Benchmark, um den Durchsatz beim Lesen und Schreiben einer großen Datenmenge auf dem HDFS zu messen. `terasort`

ist ebenfalls ein weit verbreiteter Benchmark, der die Hadoop-Implementierung der standardisierten *Sort Benchmarks*³ darstellt [44]. Ebenfalls als guter Benchmark dient die Anwendung `wordcount`, mit der ein großer Datensatz stark verkleinert bzw. zusammengefasst wird und dient daher als gute Repräsentation für Anwendungsarten, bei denen Daten extrahiert werden [40, 41].

Da in dieser Fallstudie ein realistisches Abbild der ausgeführten Anwendungen ausgeführt werden soll, ist es nicht sehr hilfreich, die einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten im Transitionssystem anzugleichen oder rein zufällig zu verteilen. Einen realistischen Einblick, welche Anwendungs- und Datentypen in produktiv genutzten Hadoop-Clustern genutzt werden, geben u. A. [41] und [45]. Auffällig ist hierbei, dass die meisten Anwendungen in einem Hadoop-Cluster innerhalb weniger Sekunden oder Minuten abgeschlossen sind und/oder Datensätze im Größenbereich von wenigen Kilobyte bis hin zu wenigen Megabyte verarbeiten. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Ren u. a. in [46] und folgerten daher, dass für kleine Jobs evtl. einfachere Frameworks abseits von Hadoop besser geeignet wären. Die Autoren der Studie in [45] bezeichneten Hadoop aufgrund ihrer Ergebnisse als „potentielle Technologie zum Verarbeiten aller Arten von Daten“, stellten aber eine ähnliche Vermutung an wie Ren u. a., dass Hadoop primär Daten nutze, die auch mit „traditionellen Plattformen“ verarbeitet werden könnten.

Basierend auf den Ergebnissen der Studien in [40, 41, 45, 46] und der in den Publikationen [9, 23, 44] verwendeten BenchmarkAnwendungen, wurden folgende Anwendungen der Mapreduce Examples und Jobclient-Tests in das Transitionssystem übernommen:

- Generieren von Eingabedaten für andere Anwendungen:
 - Textdateien:
 - * `randomtextwriter` (rtw): Generierung von zufälligen Zeichenfolgen
 - * `TestDFSIO -write` (dfw): Schreiben einer großen Datenmenge auf dem HDFS
 - Binärdateien:
 - * `randomwriter` (rw): Generierung von zufälligen Binärdaten
 - * `teragen` (tg): Generierung der Eingabedaten für den `terasort`-Benchmark
- Verarbeitung von Eingabedaten:
 - Auslesen bzw. Zusammenfassen:
 - * `wordcount` (wc): Auslesen einer Textdatei und Ermitteln der Anzahl der darin enthaltenen Wörter
 - * `TestDFSIO -read` (dfr): Auslesen einer großen Datenmenge auf dem HDFS
 - Transformieren:

³<https://sortbenchmark.org/>

- * **sort** (so): Sortieren von Daten, wird in dieser Fallstudie zum Sortieren von Textdaten genutzt
- * **terasort** (tsr): Sortieren von großen Binärdatenmengen
- Validierung der Transformationen:
 - * **testmapredsort** (tms): Validierung der von **sort** transformierten Daten
 - * **teravalidate** (tv): Validierung der vom **terasort** sortierten Binärdaten
- Ausführen von Berechnungen:
 - **pi**: Ausführung der Quasi-Monte-Carlo-Methode zur einfachen Berechnung von π . Die Monte-Carlo-Methode und die darauf basierende Quasi-Monte-Carlo-Methode sind stochastische Verfahren, um komplexe Probleme numerisch lösen zu können. Für weitere Informationen hierzu sei auf entsprechende Literatur wie z. B. [47, 48] verweisen.
 - **pentomino** (pt): Berechnung einer Lösung von Pentomino-Problemen. Hierbei soll eine Fläche mithilfe von zwölf *Bausteinen*, die aus fünf Quadraten bestehen, bedeckt werden, wobei jeder Baustein nur einmal genutzt werden darf. Weitere Informationen hierzu sind in entsprechender Literatur wie z. B. in [49] zu finden.
- Dummy-Anwendungen:
 - **sleep** (sl): Blockieren von Ressourcen
 - **fail** (fl): Fehlschlagen einer Anwendung

Der Grund für die Berücksichtigung von mehreren gleichen bzw. ähnlichen Anwendungen für einige Kategorien liegt darin, dass die unterschiedlichen Anwendungen eine unterschiedliche Ausführungsdauer bzw. Datenrepräsentation (Text und Binär) repräsentieren. So stehen die beiden **TestDFSIO**-Varianten für eine umfangreichere Datennutzung, während die jeweils anderen Anwendungen einen kleineren Umfang repräsentieren. Ähnlich verhält es sich bei den beiden Berechnungsanwendungen, bei denen die **pentomino**Anwendung die deutlich umfangreicheren Berechnungen durchführt. **TestDFSIO** enthält zudem die Möglichkeit, Daten zu generieren und zu lesen, weshalb dieser Benchmark in zwei Kategorien als Anwendung genutzt wird.

Eine Besonderheit bilden die beiden DummyAnwendungen. Beide werden bei der Ausführung dieser Fallstudie dafür genutzt, um zu simulieren, wenn nichts ausgeführt werden soll oder bei der Ausführung der Anwendungen ein Fehler auftritt.

Auf die Implementierung einer Anwendung der HiBench-Suite wurde verzichtet. Da beim Starten einer Anwendung durch den Client die vom Cluster zugewiesene ID benötigt wird, um die Anwendung in späteren Testfällen beenden zu können, kann der HiBench nicht sinnvoll im Testmodell genutzt werden. Der Grund hierfür ist, dass beim Starten einer Anwendung der HiBench-Suite die ID erst nach Abschluss der gesamten

Anwendung zurückgegeben wird, womit eine asynchrone Ausführung der Anwendung nicht mehr möglich wäre.

5.2.2. Entwicklung der Markow-Kette

Basierend auf den ausgewählten Anwendungen und der in den Studien genannten Anwendungstypen wurde das Transitionssystem in Form einer Markov-Kette entwickelt. Die Markov-Kette definiert die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die ausführenden Anwendungen bei der Ausführung eines Testfalls gewechselt werden. Damit die Übergänge nicht bei jedem Testfall stattfinden, sondern Anwendungen auch mehrere Testfälle lang ausgeführt werden können, wurden Selbst-Transitionen auf 60 Prozent definiert.

Für die beiden DummyAnwendungen gelten einige Besonderheiten. Zum einen können beide Anwendungen unabhängig von der derzeit ausgeführten Anwendung mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit als nachfolgende Anwendung ausgewählt werden. Für die Übergänge zu den DummyAnwendungen nachfolgende Anwendungen wurden nur Anwendungen definiert, die ihrerseits keine Eingabedaten benötigten bzw. diese für andere Anwendungen generieren:

- `TestDFSIO -write`
- `randomtextwriter`
- `teragen`
- `randomwriter`
- `pi`
- `pentomino`

Bei der Entwicklung der Markow-Kette des Transitionssystems wurde zudem berücksichtigt, welche Anwendungsdaten welche Art von Eingabedaten benötigen. Dadurch wird sichergestellt, dass benötigte Eingabedaten immer vorhanden sind, da diese ebenfalls im Rahmen der Ausführung der Benchmarks generiert werden. Anwendungen ohne Eingabedaten können dagegen fast jederzeit ausgeführt werden, wie die entwickelte Markov-Kette zeigt:

5.3. Entwicklung des Benchmark-Controllers

Die im YARN-Modell (vgl. Abschnitt 4.2) implementierten Benchmarks und das zur Auswahl der Benchmarks entwickelte Transitionssystem bilden zusammen den Benchmark-Controller. Der Benchmark-Controller wurde als eigene Klasse `BenchmarkController` im Modell implementiert und wird von den Clients genutzt, um die Auswahl der Benchmarks vorzunehmen. Der Benchmark-Controller verwaltet die implementierten Benchmarks und stellt diese den Clients zum Starten zur Verfügung (vgl. Abschnitt 4.2.7).

	<i>dfw</i>	<i>rtw</i>	<i>tg</i>	<i>dfr</i>	<i>wc</i>	<i>rw</i>	<i>so</i>	<i>tsr</i>	<i>pi</i>	<i>pt</i>	<i>tms</i>	<i>ttl</i>	<i>sl</i>	<i>fl</i>
<i>dfw</i>	.600	.073	0	.145	0	0	0	0	.073	.073	0	0	.018	.018
<i>rtw</i>	.036	.600	0	0	.145	.036	.109	0	.036	0	0	0	.019	.019
<i>tg</i>	0	.036	.600	0	0	0	0	.255	0	.073	0	0	.018	.018
<i>dfr</i>	0	.073	0	.600	0	.036	0	0	.145	.109	0	0	.018	.019
<i>wc</i>	.073	.109	0	0	.600	0	.073	0	.073	.036	0	0	.018	.018
<i>rw</i>	0	.073	.073	0	0	.600	0	0	.109	.109	0	0	.018	.018
<i>so</i>	0	.073	.036	0	.073	.036	.600	0	.073	0	.073	0	.018	.018
<i>tsr</i>	0	0	0	0	0	0	0	.600	.109	.073	0	.182	.018	.018
<i>pi</i>	.145	.109	0	0	0	0	0	0	.600	.109	0	0	.018	.019
<i>pt</i>	.109	.109	0	0	0	.073	0	0	.073	.600	0	0	.018	.018
<i>tms</i>	0	.145	0	0	0	.073	0	0	.036	.109	.600	0	.018	.019
<i>ttl</i>	.073	.109	0	0	0	0	0	0	.109	.073	0	.600	.018	.018
<i>sl</i>	.167	.167	.167	0	0	.167	0	0	.167	.167	0	0	0	0
<i>fl</i>	.167	.167	.167	0	0	.167	0	0	.167	.167	0	0	0	0

Tabelle 5.1.: Entwickelte Markov-Kette für die Anwendungs-Übergänge in Tabellenform

Damit die Clients unabhängig voneinander sind, wird für jeden Client ein eigener Benchmark-Controller instanziiert.

5.3.1. Implementierung von Benchmarks und Transitionssystem

Die Benchmarks wurden mithilfe der Klasse `Benchmark` implementiert. Sie enthält alle zur Ausführung der Benchmarks benötigten Informationen und stellt diese der `BenchmarkController`-Klasse bzw. dem Client bereit, um die Anwendung des Benchmarks zu starten. Da mehrere Clients unabhängig voneinander agieren können müssen, erhält jeder Client ein spezifisches Unterverzeichnis im HDFS, in dem sich die Ein- und Ausgabeverzeichnis für die von ihm gestarteten Anwendungen befinden. Das muss auch bei der Definition der Startbefehle der Anwendungen berücksichtigt werden, weshalb hierfür entsprechende Platzhalter ersetzt werden müssen, wenn mithilfe der Methode `GetStartCmd()` der Start-Befehl des Benchmarks zurückgegeben wird:

```

1 public class Benchmark
2 {
3     public Benchmark(int id, string name, string startCmd, string
        outputDir, string inputDir)
4     {
5         _StartCmd = startCmd;
6         _InDir = inputDir;
7         HasInputDir = true;
8     }
9
10    public string GetStartCmd(string clientDir = "")
11    {
12        var result = _StartCmd.Replace(OutDirHolder, GetOutputDir(
            clientDir)).Replace(InDirHolder, GetInputDir(clientDir));
13        if(result.Contains(BaseDirHolder))

```



```

14     result = ReplaceClientDir(result, clientDir);
15     return result;
16 }
17 }

```

Listing 5.1: Wesentliche Methoden der Klasse `Benchmark`

Alle im Modell enthaltenen Benchmarks sind als Array im `BenchmarkController` gespeichert. Hier werden auch die benötigten Befehle zum Starten der Anwendungen der Benchmarks definiert:

```

1 public Benchmark[] Benchmarks => new[]
2 {
3     new Benchmark(04, "wordcount", $"example wordcount {InDirHolder} {
4         OutDirHolder}", $"{BaseDirHolder}/wcout",

```

Listing 5.2: Definition der verfügbaren Benchmarks im `BenchmarkController` (gekürzt)

Der hierbei definierte und durch `GetStartCmd()` zurückgegebene vollständige Startbefehl wird beim Starten der Anwendungen vom Connector als Befehlsparameter dem Benchmark-Script angehängt (vgl. Abschnitt 4.3.3). Damit kann durch das Benchmark-Script die zu startende Anwendung identifiziert und das jeweilige Start-Script ausgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.4.3).

Das Transitionssystem selbst wurde im `BenchmarkController` als zweidimensionaler Array implementiert, auf das mithilfe von `Benchmark.ID` zugegriffen werden kann. Entsprechend wichtig ist hierbei die Reihenfolge der jeweiligen Werte innerhalb des Arrays, welche immer gleich sein muss mit den jeweiligen IDs:

```

1 public double[][] BenchTransitions => new[]
2 {
3     /* from / to ->    00    01    02    ...*/
4     /* from / to ->    dfw   rtw   tg   ...*/
5     new[] /* 00 */ { .600, .073, 000, ... ,
6     new[] /* 01 */ { .036, .600, 000, ... ,
7     new[] /* 02 */ { 000, .036, .600, ... ,
8 };

```

Listing 5.3: Implementierung des Transitionssystems im `BenchmarkController` (gekürzt)

5.3.2. Auswahl der nachfolgenden Benchmarks

Zur Auswahl der Nachfolgenden Anwendung dient die Methode `ChangeBenchmark()` des `BenchmarkControllers`. Hier wird mithilfe des Transitionssystems und unabhängig von anderen Clients bestimmt, welcher Benchmark ausgeführt werden soll und dieser in `CurrentBenchmark` gespeichert:

```
1 // get probabilities from current benchmark
2 var transitions = BenchTransitions[CurrentBenchmark.Id];
3
4 // calculate next benchmark
5 var ranNumber = RandomGen.NextDouble();
6 var cumulative = 0D;
7 for(int i = 0; i < transitions.Length; i++)
8 {
9     cumulative += transitions[i];
10    if(ranNumber >= cumulative)
11        continue;
12
13    // prevent saving current benchmark as previous
14    if(CurrentBenchmark == _BenchmarksInstance[i])
15        break;
16
17    // save benchmarks
18    PreviousBenchmark = CurrentBenchmark;
19    CurrentBenchmark = Benchmarks[i];
20    return true;
21 }
```

Listing 5.4: Auswahl des nachfolgenden Benchmarks (gekürzt). Dies stellt einen Ausschnitt der Methode `ChangeBenchmark()` dar, welche vom Client zur Bestimmung des nachfolgenden Benchmarks aufgerufen wird (vgl. Abschnitt 4.2.7).

Bevor auf die Daten des implementierten Transitionssystems zugegriffen wird, wird außerdem zunächst geprüft, ob die Markow-Kette alle möglichen Übergänge für den aktuellen Benchmark enthält. Ist das nicht der Fall, wird eine `InvalidOperationException` ausgelöst. Wenn die Auswahl des Benchmarks dagegen erfolgreich war, wird an den aufrufenden Client `true` zurückgegeben und der ausgewählte Benchmark kann gestartet werden (vgl. Abschnitt 4.2.7).

Der zur Auswahl des nachfolgenden Benchmarks benötigte Zufallsgenerator `Random Gen` wird bei der Initialisierung des Benchmark-Controllers basierend auf dem in Abschnitt 3.3.2 spezifizierten Basisseed initialisiert. Damit die Benchmark-Controller aller Clients nicht die gleichen Benchmarks auswählen, wird zum Basisseed die numerische ID des Clients addiert und der Zufallsgenerator mit diesem Wert initialisiert. Als initiale Anwendung wird zudem immer der `sleep`-Benchmark genutzt, womit als erste Anwendung immer eine Anwendung ohne benötigte Eingabedaten gestartet wird (vgl. Abschnitt 5.2.2).

5.3.3. Vorabgenerierung von Eingabedaten

Neben der Generierung der für einige Anwendungen benötigten Eingabedaten während der Testausführung gibt es auch die Möglichkeit, die Eingabedaten vorab zu generieren und anschließend immer diese zu nutzen. Um die vorab generierten Daten in einem Test zu nutzen, muss die entsprechende Eigenschaft `ModelSettings.IsPrecreateBenchInputs` auf `true` gesetzt werden. Dadurch werden auch direkt die Eingabedaten generiert.

Die Vorabgenerierung der Daten startet die Anwendungen, welche Eingabedaten für andere Anwendungen generieren und speichert diese in einem nur hierfür genutzten Verzeichnis im HDFS. Folgende fünf Anwendungen reichen aus, um für alle anderen Anwendungen Eingabedaten bereit zu stellen:

- `TestDFSIO -write`
- `randomtextwriter`
- `teragen`
- `sort`
- `terasort`

Gestartet werden kann die Vorabgenerierung mithilfe des Benchmark-Controllers. Hierbei werden die Anwendungen, sofern möglich, gleichzeitig ausgeführt und anschließend gewartet, bis alle fünf Anwendungen beendet sind. Hierbei wird standardmäßig die Generierung der Eingabedaten einer Anwendung übersprungen, wenn das entsprechende Ausgabeverzeichnis der Anwendung bereits existiert.

Es ist dabei jedoch möglich, die Verzeichnisse jeweils zu löschen, um somit die Daten vollständig neu zu generieren. Hierbei wird zudem ein HDFS-Filecheck ausgeführt, um fehlerhafte Daten zu finden und zu löschen. Fehlerhafte Daten können im HDFS z. B. dadurch entstehen, dass alle Nodes defekt sind, auf denen ein Block repliziert wurde, sich die Datei jedoch noch im Index des HDFS befindet (vgl. Abschnitt 2.2). Die vollständige Neugenerierung der Eingabedaten kann mithilfe der Eigenschaft `ModelSettings.IsPrecreateBenchInputsRecreate` gesteuert werden.

Um beim Starten der Anwendungen die vorab generierten Eingabedaten zu nutzen, wird beim Starten der Anwendungen das Verzeichnis der vorab generierten Daten als entsprechendes Client-Verzeichnis genutzt (vgl. Abschnitte 4.2.7 und 5.3.1).

6. Implementierung und Ausführung der Tests

Zur Ausführung der Tests wurde zunächst eine Simulation entwickelt, welche mithilfe des S#-Simulators ausgeführt werden kann. Alle hierfür relevanten Methoden wurden in der Klasse `SimulationTests` zusammengefasst, welche wiederum als Basis für die Ausführung der einzelnen Testkonfigurationen dient. Die Implementierung und Ausführung der Testkonfigurationen wird mithilfe der hierfür entwickelten Klasse `CaseStudyTests` durchgeführt.

6.1. Implementierung der Simulation

Für die Ausführung der Simulation wurden zwei grundlegende Tests implementiert. Das ist zum einen eine reine Simulation ohne die Aktivierung von Komponentengefehlern, sowie ein weiterer Test, bei dem Komponentengefehler aktiviert werden können. Ausgeführt werden können die Tests mithilfe des NUnit-Frameworks.

6.1.1. Grundlegender Aufbau

Da im realen Cluster Hadoop kontinuierlich Anpassungen durchführt und Tests in S# mit diskreten Schritten durchgeführt werden, muss beachtet werden, dass die Werte, die beim Test ermittelt werden, immer nur Momentaufnahmen darstellen. Ebenso muss beachtet werden, dass bei der Deaktivierung von einzelnen Nodes bzw. deren Netzwerkverbindungen diese nicht in Echtzeit, sondern um einige Zeit verzögert erkannt werden und erst nach einer gewissen Zeit aus der Konfiguration des Clusters entfernt werden. Genauso verhält es sich, wenn ein Node bzw. seine Verbindung wieder aktiviert wird, da dieser zunächst gestartet und die Verbindung mit den YARN-Controller wiederhergestellt werden muss. Außerdem werden die für die auf dem Cluster ausgeführten Anwendungen benötigten AppMstr und YARN-Container aufgrund der komplexen internen Prozesse von Hadoop nicht innerhalb weniger Millisekunden allokiert, sondern benötigen ebenfalls eine gewisse Zeit. Aus diesen Gründen muss ein Simulations-Schritt um eine gewisse Zeit verzögert werden, sodass alle Aktivitäten innerhalb von Hadoop genügend Zeit zur Ausführung erhalten.

Der grundlegende Ablauf einer Simulation sieht wie folgt aus:

```
1 private bool ExecuteSimulation()  
2 {  
3     var model = InitModel();
```

```
4  var isWithFaults = FaultActivationProbability > 0.000001; // prevent
    inaccuracy
5
6  var wasFatalError = false;
7  try
8  {
9      // init simulation
10     var simulator = new SafetySharpSimulator(model);
11     var simModel = (Model)simulator.Model;
12     var faults = CollectYarnNodeFaults(simModel);
13
14     SimulateBenchmarks();
15
16     // do simulation
17     for(var i = 0; i < StepCount; i++)
18     {
19         OutputUtilities.PrintStepStart();
20         var stepStartTime = DateTime.Now;
21
22         if(isWithFaults)
23             HandleFaults(faults);
24         simulator.SimulateStep();
25
26         var stepTime = DateTime.Now - stepStartTime;
27         OutputUtilities.PrintDuration(stepTime);
28         if(stepTime < ModelSettings.MinStepTime)
29             Thread.Sleep(ModelSettings.MinStepTime - stepTime);
30
31         OutputUtilities.PrintFullTrace(simModel.Controller);
32     }
33
34     // collect fault counts and check constraint
35 }
36 // catch/finally
37
38 return !wasFatalError;
39 }
```

Listing 6.1: Simulation in dieser Fallstudie (gekürzt).

Hierbei gibt es zwei Varianten zum Ausführen der Simulation, welche abhängig von der Aktivierung der Komponentenfehler ist. Sollen keine Komponentenfehler aktiviert bzw. deaktiviert werden, werden die entsprechenden Variablen zur Festlegung der generellen Wahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 6.1.2 entsprechend gesetzt und die Simulation ausgeführt. Da die einzelnen Schritte einer Simulation eine gewisse Mindestdauer haben, wird nach jedem Schritt geprüft, wie viel Zeit für die Ausführung des Schrittes benötigt wurde. Liegt die Zeit unterhalb der Mindestdauer für einen Schritt, wird die Ausführung

des nächsten Schrittes solange hinausgezögert, bis die Minstdauer des Schrittes erreicht wurde.

Wenn während der Simulation eine im Modell nicht behandelte **Exception** auftritt, wird diese außerhalb der Simulation abgefangen und entsprechend geloggt. Dadurch wird zudem die Simulation beim aktuellen Stand abgebrochen. Nach Abschluss der Simulation werden immer alle noch ausgeführten Anwendungen beendet und defekte Nodes neu gestartet, sofern nötig.

Für die Simulation selbst sind zudem ebenfalls Constraints definiert. Dies ist dadurch nötig, da die in Abschnitt 3.2.2 definierte Anforderung, dass Komponentenfehler injiziert bzw. repariert werden, nicht immer innerhalb eines Testfalls validiert werden können. Aus diesem Grund wird diese Anforderung in Form von Constraints nach Abschluss einer Simulation durch das Oracle geprüft.

6.1.2. Initialisierung des Modells

Bevor das Modell im Simulator ausgeführt werden kann, muss es initialisiert werden. Das folgende Listing 6.2 zeigt die Definition der Felder zur Modellinitialisierung sowie die entsprechenden Methoden, die in Listing 6.1 zur Initialisierung aufgerufen werden:

```
1 public TimeSpan MinStepTime { get; set; } = new TimeSpan(0, 0, 0, 25);
2 public int BenchmarkSeed { get; set; } = Environment.TickCount;
3 public int StepCount { get; set; } = 3;
4 public bool PrecreatedInputs { get; set; } = true;
5 public bool RecreatePreInputs { get; set; } = false;
6 public double FaultActivationProbability { get; set; } = 0.25;
7 public double FaultRepairProbability { get; set; } = 0.5;
8 public int HostsCount { get; set; } = 1;
9 public int NodeBaseCount { get; set; } = 4;
10 public int ClientCount { get; set; } = 2;
11
12 private Model InitModel()
13 {
14     ModelSettings.HostMode = ModelSettings.EHostMode.Multihost;
15     ModelSettings.HostsCount = HostsCount;
16     ModelSettings.NodeBaseCount = NodeBaseCount;
17     ModelSettings.IsPrecreateBenchInputsRecreate = RecreatePreInputs;
18     ModelSettings.IsPrecreateBenchInputs = PrecreatedInputs;
19     ModelSettings.RandomBaseSeed = BenchmarkSeed;
20
21     var model = Model.Instance;
22     model.InitModel(appCount: StepCount, clientCount: ClientCount);
23     model.Faults.SuppressActivations();
24
25     return model;
26 }
```

Listing 6.2: Initialisierung des Modells für die Simulation

Die einzelnen Eigenschaften für die Simulation werden vor dem Initialisieren des Modells in den `ModelSettings` gespeichert. Die dort gespeicherten Werte werden wiederum zum Initialisieren der Modell-Instanz bzw. während der Ausführung der Simulation genutzt.

Einige Eigenschaften haben lediglich einen Zweck, während andere umfangreichere Auswirkungen besitzen. Die einfachen Eigenschaften sind:

MinStepTime

Definiert die Mindestdauer eines Schrittes.

BenchmarkSeed

Gibt den Seed an, mit dem die Zufallsgeneratoren in den Klassen `BenchmarkController` und `NodeFaultAttribute` initialisiert werden. Dadurch wird es ermöglicht, einzelne Testfälle erneut ausführen zu können.

StepCount

Definiert die Anzahl der ausgeführten Schritte.

FaultActivationProbability

Definiert die generelle Häufigkeit zum Aktivieren von Komponentenfehlern. Ist dieser Wert 0,0, werden grundsätzlich keine Komponentenfehler aktiviert, bei einem Wert von 1,0 werden Komponentenfehler dagegen immer aktiviert.

FaultRepariProbability

Definiert die generelle Häufigkeit zum Deaktivieren von Komponentenfehlern. Die hier definierte Wahrscheinlichkeit verhält sich analog zu `_FaultActivationProbability`. Bei einem Wert von 0,0 werden Komponentenfehler niemals deaktiviert, während sie bei einem Wert von 1,0 im nachfolgenden Schritt immer deaktiviert werden.

HostsCount

Definiert die Anzahl der in der Simulation verwendeten Hosts. Benötigt wird dieser Wert, damit zu jedem verwendeten Host eine SSH-Verbindung aufgebaut werden kann.

NodeBaseCount

Definiert die Anzahl der Nodes auf Host1. Auf Host2 wird die Hälfte der Nodes verwendet. Benötigt wird dieser Wert, um mithilfe der REST-API auf die Hadoop-Nodes zugreifen zu können, um die Daten der YARN-Container zu ermitteln.

ClientCount

Definiert die Anzahl der zu simulierenden Clients. Da jeder Client gleichzeitig nur eine Anwendung startet, wird dadurch gleichzeitig definiert, wie viele Anwendungen gleichzeitig auf dem Cluster ausgeführt werden sollen.

Eine Besonderheit bildet die Eigenschaft **PrecreatedInputs**. Es definiert, ob die ausgeführten Anwendungen auf dem Cluster vorab generierte Eingabedaten nutzen oder alle Eingabedaten während der Ausführung selbst generieren. Der Unterschied zwischen beiden Varianten liegt darin, dass vorab generierte Eingabedaten in einem anderen Verzeichnis im HDFS gespeichert sind und während der Simulation die Eingabedaten aus diesem Verzeichnis gelesen werden. Wenn keine Eingabedaten vorab generiert werden, werden als Eingabeverzeichnisse für die Anwendungen die Ausgabeverzeichnisse der entsprechenden Benchmarks genutzt, die die dafür benötigten Daten generieren (vgl. Abschnitt 5.3.3). Die Eigenschaft **RecreatePreInputs** definiert hierfür, ob bereits bestehende Eingabedaten neu generiert werden, was standardmäßig nicht der Fall ist bzw. dieses Feld auf **false** gesetzt ist. Die Werte der beiden Eigenschaften werden daher entsprechend in ihren korrespondierenden Eigenschaften in **ModelSettings** gespeichert.

Weitere Informationen zum **HostMode** sind in den Abschnitten 4.2.1, 4.3.3 und 4.4.2 zu finden.

Die direkt im Anschluss an die Initialisierung des Simulators ausgerufene Methode **CollectYarnNodeFaults()** ermittelt alle im initialisierten Modell enthaltenen Komponentenfehler, die mit dem **NodeFaultAttribute** markiert sind (vgl. Abschnitt 4.2.3):

```

1 private FaultTuple[] CollectYarnNodeFaults(Model model)
2 {
3     return (from node in model.Nodes
4         from faultField in node.GetType().GetFields()
5         where typeof(Fault).IsAssignableFrom(faultField.FieldType)
6
7         let attribute = faultField.GetCustomAttribute<NodeFaultAttribute>()
8         where attribute != null
9
10        let fault = (Fault)faultField.GetValue(node)
11
12        select Tuple.Create(fault, attribute, node, new IntWrapper(0), new
13            IntWrapper(0))
14    ).ToArray();
15 }
```

Listing 6.3: Ermitteln der Komponentenfehler mit dem **NodeFaultAttribute**

Die gefundenen Komponentenfehler werden als Array aus Tupel, bestehend aus dem Komponentenfehler selbst, dem Attribut sowie dem dazugehörigen Node zurückgegeben. Zur Speicherung hierfür dient der Typ **FaultTuple**, welcher ein Alias für das hierfür

genutzte `Tuple<T>` darstellt. Die jeweiligen Instanzen der Attribute und Nodes werden für die in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Aktivierung der dazugehörigen Komponentenfehler benötigt. Die beiden im Tupel gespeicherten Instanzen des `IntWrapper` dienen zur Speicherung der Anzahl der Aktivierungen bzw. Deaktivierungen der Komponentenfehler. Da der Wert einer Struktur wie `int` nicht direkt in einem Tupel geändert werden kann, dient die Klasse `IntWrapper` hierfür als Adapter.

6.1.3. Weitere mit der Simulation zusammenhängende Methoden

Neben der Ausführung der Simulation mit und ohne der Möglichkeit zur Aktivierung der Komponentenfehler gibt es noch einige weitere Methoden, die mit der Simulation zusammenhängen. So kann z. B. die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Vorabgenerierung der Eingabedaten durch eine entsprechende Methode durchgeführt werden. Es ist aber auch möglich, die Simulation der durch den Benchmark-Controller ausgewählten Benchmarks die Ausführung der gesamten Simulation durchzuführen. Hierzu kann die bei der Ausführung der Simulation aufgerufene Methode `SimulateBenchmark()` als eigener Test durchgeführt werden:

```

1 [Test]
2 public void SimulateBenchmarks()
3 {
4     for(int i = 1; i <= _ClientCount; i++)
5     {
6         var seed = _BenchmarkSeed + i;
7         var benchController = new BenchmarkController(seed);
8         Logger.Info($"Simulating Benchmarks for Client {i} with Seed {seed}");
9         for(int j = 0; j < _StepCount; j++)
10        {
11            benchController.ChangeBenchmark();
12            Logger.Info($"Step {j}: {benchController.CurrentBenchmark.Name}");
13        }
14    }
15 }

```

Listing 6.4: Simulation der auszuführenden Benchmarks

6.1.4. Ablauf eines Tests und der Testfälle

Zu Beginn eines Tests werden zunächst die in Abschnitt 3.3.3 definierten, grundlegenden Daten des Tests im Programmlog gespeichert. Daneben werden aber auch noch weitere, den `HostMode` (vgl. Abschnitt 4.4.2) betreffende Daten im Programmlog abgespeichert:

- Verbundene SSH-Verbindungen mit ihrer ID zur besseren Zuordnung im SSH-Log

- Ausführung der Erstellung von vorab generierten Eingabedaten
- Vollständiger Pfad des verwendeten Setup-Scriptes
- Adresse des Controllers zur Nutzung der REST-API
- Simulation der auszuführenden Benchmarks (vgl. Abschnitt 6.1.3)

Im Anschluss werden das auszuführende YARN-Modell und der zur Ausführung des Tests genutzte Simulator initialisiert, bevor die Testfälle selbst ausgeführt werden.

Der Ablauf eines Testfalls lässt sich mehrere Abschnitte einteilen. Zunächst wird vom Simulator selbst mithilfe der in Abschnitt 4.2.3 den Komponentenfehlern zugewiesenen Attribute geprüft bzw. entschieden, ob ein Komponentenfehler aktiviert und im Cluster injiziert wird. Anschließend führt der Simulator einen Simulations-Schritt durch, führt also für alle Komponenten des Modells die `Update()`-Methode aus. Hierdurch werden deaktivierte Komponentenfehler auch im Cluster wieder repariert, da `YarnNode.Update()` die entsprechenden Start-Methoden aufruft (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Anschließend wird die in Abschnitt 4.2.8 erläuterte Routine des Controllers ausgeführt. Dabei wird zunächst der MARP-Wert aus dem Cluster ausgelesen, bevor die BenchmarkAnwendungen des Testfalls gestartet werden. Jeder Client nutzt dafür die in Abschnitt 4.2.7 beschriebene Routine, um zunächst durch den Benchmark-Controller die zu startende Anwendung auszuwählen (vgl. Abschnitt 5.3.2) und zu starten. Die dabei vom Cluster zugewiesene ID der Anwendung wird vom Client gespeichert, um die Anwendung in nachfolgenden Testfällen bei Bedarf abbrechen zu können, wenn eine neue Anwendung gestartet werden soll.

Sobald alle Anwendungen gestartet sind, wird vom Controller das Monitoring aller Nodes, Anwendungen und ihrer Attempts durchgeführt. Dabei wird auch der MARP-Wert ein zweites mal ausgelesen, da er sich durch die zuvor noch aktiven bzw. neu gestarteten Anwendungen unterschiedlich verändert haben könnte.

Den Abschluss eines Testfalls bildet die Validierung der Werte des Clusters, die beim Monitoring im YARN-Modell gespeichert wurden. Dazu werden für jede Komponente im Modell die jeweiligen auf den Anforderungen in Abschnitt 3.2 basierenden Constraints (vgl. Abschnitte 4.2.6 und 4.2.8) durch das Oracle geprüft (vgl. Abschnitt 4.2.9). Wenn ein Constraint nicht erfolgreich Validiert wurde, wird dies jeweils im Programmlog ausgegeben bzw. die Ausführung der Simulation abgebrochen, wenn sich das Cluster nicht mehr rekonfigurieren kann.

Nach Abschluss eines Testfalls werden durch den Simulator die in Abschnitt 3.3.3 geforderten Daten im Programmlog abgespeichert, die beim Monitoring erkannt wurden. Daneben werden bei der Ausführung eines Testfalls aber auch weitere Daten im Programmlog gespeichert wie z. B.:

- Ausführung von Komponentenfehlern
- Diagnostik-Daten der YARN-Komponenten
- Welche Constraints bei welchen Komponenten verletzt wurden

- Die Information, wenn eine Rekonfiguration nicht möglich ist

Zum Abschluss der Ausführung des Tests werden zudem die für die Simulation als gesamtes betreffende Constraints validiert, welche nicht im YARN-Modell selbst implementiert wurden (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Nach Abschluss des Tests in Form der Simulation wird ein erneutes Monitoring des gesamten Clusters durchgeführt und der hierbei ermittelte Status als finaler Clusterstatus im Programmlog gespeichert. Zudem werden einige statistische Kennzahlen zum Test im Programmlog gespeichert:

- Gesamtdauer der Simulation
- Anzahl erfolgreicher Schritte
- Anzahl der maximal möglichen, aktivierbaren Komponentenfehler
- Anzahl aktivierter und deaktivierter Komponentenfehler
- Letzter ermittelter MARP-Wert
- Anzahl aller ausgeführten, erfolgreicher, nicht erfolgreicher sowie abgebrochener Anwendungen
- Anzahl aller ausgeführten Attempts
- Anzahl aller während der Ausführung erkannten Container
- Anzahl aller validierten Constraints und fehlerhaften Constraints, getrennt nach SuT- und Testsystem-Constraints

Der auszugsweise Programmlog eines Tests, sowie das exakte Ausgabeformat für eine Ausführung eines Testfalls findet sich in Anhang D.

6.2. Generierung der Mutanten

Um das entwickelte Testsystem selbst zu validieren, wurden einige Mutationstests entwickelt. Mutationstests werden vor allem in der Forschung eingesetzt, um Fehler im SuT oder dem Testsystem selbst zu finden, in dem das SuT verändert wird. Ziel ist es, die im SuT implementierten Mutanten zu finden und dabei weitere mögliche Fehlerquellen zu ermitteln [50–53].

Da sich Mutationstests zu einem großen Forschungszweig entwickelt haben, gibt es hierfür entsprechend viele Tools, um solche Tests zu entwickeln [52, 53]. Einige Beispiele hierfür sind PIT¹ und Judy² für Java-Programme [54, 55], und Milu³ für in C entwickelte Programme [56].

Ein weiteres, sehr einfach zu nutzendes Tool zum erstellen von Mutationstests ist der in [53] vorgestellte Universalmutator⁴. Er kann zum Entwickeln von Mutationstests

¹<http://pitest.org/>

²<http://mutationtesting.org/>

³<https://github.com/yuejia/Milu>

⁴<https://github.com/agroce/universalmutator>

nicht nur innerhalb einer bestimmten Umgebung bzw. Programmiersprache, sondern prinzipiell für alle Programmiersprachen eingesetzt werden. Dies wird dadurch ermöglicht, dass die vom Universalmutator generierten Mutanten basierend auf einem oder mehreren Regex-basierten Regelsätzen durchgeführt werden und somit der Quellcode verändert wird. So kann vom Universalmutator Quellcode u. A. in den Sprachen Python, Java, C/C++, oder Swift mutiert werden [53].

Da bei der Ausführung des Universalmutators auch zahlreiche Mutanten erzeugt werden, die nicht kompiliert bzw. ausgeführt werden können, nutzt das Tool die Compiler der jeweiligen Sprache zur Validierung der generierten Mutationen. Ein validierter Mutant zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass dieser durch den Original-Compiler der jeweiligen Sprache kompiliert werden kann und die generierten Objektdateien bzw. Bytecode nicht dem nicht-mutierten Original oder anderen bereits generierten Mutationen entsprechen [53]. Diese Validierung kann mithilfe von entsprechenden Startparametern durch ein benutzerdefiniertes Programm durchgeführt werden oder alternativ nicht durchgeführt werden [53, 57].

Da in dieser Fallstudie nicht nur Hadoop bzw. die Selfbalancing-Komponente getestet werden soll, sondern vor allem das in den vorherigen Abschnitten und Kapiteln beschriebene Testsystem, wurden auch Mutationstests erstellt. Hierbei wurden mithilfe des Universalmutators insgesamt 431 valide Mutationen aus dem Quellcode der Selfbalancing-Komponente generiert. Von allen validen Mutationen wurden anschließend für jede der vier Klassen der Selfbalancing-Komponente jeweils ein Mutant zufällig ausgewählt, welche als Basis für die in dieser Fallstudie verwendeten Mutationstests dienen:

1. Zur Ermittlung der Veränderung des MARP-Wertes muss zunächst der jeweils aktuelle Arbeitsspeicher-Verbrauch im Cluster eingelesen werden. Dies geschieht im **Controller** mithilfe einer `for`-Schleife, mit der der Speicherverbrauch im Cluster nahezu sekundlich aus der `memLog`-Datei eingelesen wird. Der Mutant verändert die Schleifenbedingung, damit die Schleife kein einziges mal ausgeführt wird. Dadurch wird verhindert, dass der Speicherverbrauch des Cluster vom **Controller** eingelesen und verwendet werden kann. Dadurch ist der Speicherverbrauch des Clusters auch nicht für den in [26] vorgestellten Algorithmus der Selfbalancing-Komponente verfügbar.
2. Der **Effectuator** dient dazu, um die Veränderung des MARP-Wertes im Cluster zu speichern. Dazu wird das entsprechende Shell-Script mithilfe der *Bash*-Shell ausgeführt. Der Mutant sorgt dafür, dass anstatt des korrekten Dateipfades der Bash (`/bin/bash`) ein ungültiger Dateipfad (hier `%bin/bash`) aufgerufen wird und somit der neue MARP-Wert nicht in das Cluster übertragen werden kann.
3. Mithilfe des **ControlNodeMonitor** wird das Shell-Script zum Ermitteln der Anzahl der aktiven YARN-Jobs ausgeführt. Dies geschieht in einem eigenen Thread, der mithilfe einer `while`-Schleife, die solange aktiv ist, solange der Thread aktiv

ist. Hierbei wird das Script rund einmal pro Sekunde aufgerufen und danach ermittelt, ob bei der Ausführung des Shell-Scriptes Fehler aufgetreten sind. Dazu wird ein entsprechender `BufferedReader` geöffnet und der Error-Stream des Scriptes eingelesen und anschließend von der Selfbalancing-Komponente ausgegeben. Umgesetzt wird das mithilfe einer `while`-Schleife, die solange den Fehler ausgibt, solange die mithilfe von `BufferedReader.readLine()` ausgelesene Fehlermeldung nicht `null` ist, also noch weiteren Text enthält. Der Mutant ändert die Schleifenbedingung nun so ab, dass die Schleife durchlaufen wird, solange die Fehlermeldung keinen Text enthält, `readLine()` also `null` zurück gibt. Dadurch wird der `ControlNodeMonitor` in einer Dauerschleife gefangen und die Anzahl der aktiven YARN-Jobs wird einmalig direkt nach dem Start der Selfbalancing-Komponente ermittelt.

4. Die Klasse `MemUtilization` funktioniert analog wie die `ControlNodeMonitor`-Klasse, führt jedoch das Script zum Auslesen des Arbeitsspeicher-Verbrauches aus dem Cluster aus. Dieser Mutant verhindert hierbei die komplette Ausführung des entsprechenden Threads, indem die Bedingung der Schleife für den gesamten Thread so verändert wurde, dass diese nur dann ausgeführt wird, wenn der Thread nicht aktiv ist. Dadurch wird verhindert, dass das entsprechende Shell-Script überhaupt ausgeführt wird und der Speicherverbrauch somit nicht ausgelesen wird.

Aufgrund der verwendeten Mutationen erhält die Selfbalancing-Komponente bei jedem einzelnen Mutanten bereits nicht alle benötigten Informationen zur Anpassung des MARP-Wertes bzw. kann die Änderung des Wertes nicht in der Konfiguration des Clusters speichern.

Für jede Mutation wurde ein Mutationsszenario im Rahmen der Plattform Hadoop-Benchmark entwickelt, bei dem keine weitere Mutationen enthalten sind (vgl. Abschnitt 4.4). Zudem wurde ein weiteres Mutationsszenario entwickelt, bei dem alle vier Mutationen enthalten sind.

6.3. Auswahl der Testkonfigurationen

Die im in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Testkonfigurationen werden mithilfe verschiedener Variablen implementiert. Anhand dieser Konfiguration wurden dynamisch zur Laufzeit die entsprechenden Testfälle generiert, wobei jeder Simulations-Schritt des S#-Simulators einem Testfall entspricht.

Relevant für die Ausführung einer Konfigurationen sind folgende, bereits in Listing 6.2 gezeigte, Eigenschaften:

```

1 public int BenchmarkSeed { get; set; } = Environment.TickCount;
2 public double FaultActivationProbability { get; set; } = 0.25;

```

```

3 public double FaultRepairProbability { get; set; } = 0.5;
4 public int HostsCount { get; set; } = 1;
5 public int NodeBaseCount { get; set; } = 4;
6 public int ClientCount { get; set; } = 2;

```

Listing 6.5: Zur Definition einer Testkonfiguration relevante Felder

Da die jeweiligen Auswirkungen der Eigenschaften bereits in Abschnitt 6.1.2 erläutert wurden, wird an dieser Stelle hierauf verwiesen.

Zur Festlegung dieser Variablen und damit der Testkonfigurationen wurde zunächst eine Systematik entwickelt, nach welcher die Testfälle durchgeführt werden. Hierfür wurden mithilfe des folgenden Programmcodes zunächst zwei Seeds ermittelt:

```

1 public void GenerateCaseStudyBenchSeeds()
2 {
3     var ticks = Environment.TickCount;
4     var ran = new Random(ticks);
5     var s1 = ran.Next(0, int.MaxValue);
6     var s2 = ran.Next(0, int.MaxValue);
7     Console.WriteLine($"Ticks: 0x{ticks:X}");
8     Console.WriteLine($"s1: 0x{s1:X} | s2: 0x{s2:X}");
9     // Specific output for generating test case seeds:
10    // Ticks: 0x5829F2
11    // s1: 0xAB4FEDD | s2: 0x11399D3
12 }

```

Listing 6.6: Ermittlung der für die Testkonfigurationen genutzten Basisseeds

Die beiden ermittelten Seeds 0xAB4FEDD und 0x11399D3 wurden jeweils bei jeder Konfiguration zwischen den anderen Variablen genutzt.

Zur Festlegung der Werte zur generellen Wahrscheinlichkeiten zur Aktivierung bzw. Deaktivierung von Komponentenfehlern wurden zunächst über 20.000 mögliche Aktivierungen und Deaktivierungen mit verschiedenen generellen Wahrscheinlichkeiten und Auslastungsgraden der Nodes simuliert. Der dabei für alle Konfigurationen ausgewählte Wert von 0,3 stellt hierbei eine ausgewogene Aktivierung bzw. Deaktivierung der Komponentenfehler bei unterschiedlichen Auslastungsgraden der Nodes dar.

Die Anzahl der Hosts wurde bei einigen Konfigurationen auf 1 festgelegt, bei den meisten liegt diese jedoch bei 2. Die Node-Basisanzahl wurde auf 4 festgelegt, da hierbei das Cluster eine ausreichende Größe besitzt und jedem Node ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen, um Anwendungen auszuführen. Bei einer zu hohen Basisanzahl erhält jeder einzelne Node geringere Ressourcen, was vor allem die Ausführung bei ressourcenintensiven Anwendungen wie z. B. **pentomino** behindert, während bei einer zu geringen das Cluster sehr klein ist und daher keine ausreichende Evaluationsbasis bietet. Die Anzahl der Simulations-Schritte und damit der ausgeführten Testfälle selbst wurde variiert, wodurch in einigen Konfigurationen 5 und in anderen 10 Testfälle ausgeführt

werden. Ebenso variiert wurde die Anzahl der simulierten Clients, , die im Bereich von 2, 4 oder 6 Clients liegt.

Alle Konfigurationen wurden mindestens einmal jeweils mit der Selfbalancing-Komponente ohne Mutationen sowie in einem der in Abschnitt 6.2 erläuterten Mutationsszenarien ausgeführt. Von den hiermit möglichen 48 Testkonfigurationen wurden die möglichen Konfigurationen mit einem Host und sechs simulierten Clients sowie die möglichen Konfigurationen mit zwei simulierten Clients und zehn Testfällen nicht ausgeführt. Das ergibt für die Evaluation somit eine Datenbasis von 32 grundlegenden Testkonfigurationen. Eine Übersicht der genutzten Testkonfigurationen und der Dauer der jeweiligen Tests ist in Anhang E zu finden.

Bei der Ausführung der Tests zur Evaluation wurden Eingabedaten nicht vorab generiert, sondern während der Ausführung von den Anwendungen direkt generiert. Daher wurde die Minstdauer für einen Simulations-Schritt in allen Fällen auf 25 Sekunden festgelegt, da hierbei ein Großteil der ausgeführten Anwendungen auf dem Cluster erfolgreich beendet werden können. Eine Ausreichende Minstdauer ist vor allem für die Generierung der Eingabedaten für nachfolgende Anwendungen wichtig, da nicht vollständig generierte Daten von abgebrochenen Anwendungen nicht von nachfolgenden Anwendungen genutzt werden können. Zudem stellt dies eine ausreichende Zeitspanne zur Rekonfiguration von Hadoop dar.

6.4. Implementierung der Tests

Genauso wie die Simulation wurde zur Implementierung das NUnit-Framework sowie zur Ausführung der *ReSharper Unit Test Runner*⁵ (Version 2018.1) genutzt. Alle zur Ausführung der Testfälle der Fallstudie relevanten Methoden wurden zudem in der Klasse `CaseStudyTests` zusammengefasst, welche die bereits in Abschnitt 6.1 beschriebene Simulation nutzt. Zur Ausführung der Tests wurde folgende Methode entwickelt, bei der mithilfe von NUnit die Testfälle ermittelt werden:

```
1 [Test]
2 [TestCaseSource(nameof(GetTestCases))]
3 public void ExecuteCaseStudy(int benchmarkSeed, double
   faultProbability, int hostsCount, int clientCount, int stepCount,
   bool isMutated)
4 {
5     // write test case parameter to log
6
7     InitInstances();
8     var isFailed = false;
9     try
10    {
```

⁵<https://www.jetbrains.com/resharper/>

```

11     // Setup
12     StartCluster(hostsCount, isMutated);
13     Thread.Sleep(5000); // wait for startup
14
15     var simTest = new SimulationTests();
16     // save test case parameter to simTest
17
18     // Execution
19     simTest.SimulateHadoopFaults();
20 }
21 // catch exceptions and set isFailed=true
22 finally
23 {
24     // Teardown
25     StopCluster();
26     MoveCaseStudyLogs(/* test case parameter */);
27 }
28 Assert.False(isFailed);
29 }

```

Listing 6.7: Methode zur Ausführung der Testfälle (gekürzt)

Das Starten und Beenden des jeweiligen Cluster dient der automatisierten Ausführung aller Tests inkl. denen mit der mutierten Selfbalancing-Komponente. Dadurch ist es möglich, das Cluster neben dem normalen Szenario auch in einem Mutationsszenario zu starten. Durch das Beenden des Clusters im Finally-Block ist es möglich, bei einer abgebrochenen Simulation andere Testfälle regulär auszuführen, da dadurch das Cluster regulär beendet wird und die Daten des abgebrochenen Testfalls wie bei einem erfolgreichen Test gespeichert werden.

Da die verwendeten Connectoren bzw. SSH-Verbindungen prinzipiell nur einmal initialisiert werden müssen und anschließend für alle auszuführenden Testfälle verwendet werden können, werden diese einmalig in `InitInstances()` initialisiert und anschließend bei jedem weiteren ausgeführten Test wiederverwendet. Eine möglicherweise bereits zuvor verwendete Modell-Instanz wird hier jedoch in jedem Fall genauso wie einige statische Zählvariablen gelöscht bzw. zurückgesetzt.

Mithilfe der im `TestCaseSourceAttribute` referenzierten Methode `GetTestCases()` werden die implementierten Testkonfigurationen ermittelt:

```

1 public string MutationConfig { get; set; } = "mut1234";
2
3 public IEnumerable GetTestCases()
4 {
5     return from seed in GetSeeds()
6           from prob in GetFaultProbabilities()
7           from hosts in GetHostCounts()
8           from clients in GetClientCounts()

```



```

9      from steps in GetStepCounts()
10     from isMut in GetIsMutated()
11
12     where !(hosts == 1 && clients >= 6)
13     where !(clients <= 2 && steps >= 10)
14     select new TestCaseData(seed, prob, hosts, clients, steps,
15                               isMut);
16
17 private IEnumerable<int> GetSeeds()
18 {
19     yield return 0xAB4FEDD;
20     yield return 0x11399D3;
21 }

```

Listing 6.8: Implementierung der Testfälle (gekürzt). Die hier nicht gezeigten Methoden zur Rückgabe der implementierten Werte wie `GetFaultProbabilities()` sind nach dem gleichen Schema aufgebaut wie `GetSeeds()`. Mithilfe der Eigenschaft `MutationConfig` erfolgt die Auswahl des zu verwendeten Mutationsszenarios.

Hierbei werden nur Konfigurationen generiert, auf denen die in Abschnitt 6.3 genannten Bedingungen zutreffen, womit anstatt den möglichen 48 Testfällen nur die gewählten 32 generiert werden.

Damit die bei der Ausführung der Tests generierten Logs einfacher zur Evaluation genutzt werden können, werden die angefallenen Logdateien nach jeder Ausführung in ein entsprechendes Verzeichnis verschoben. Hierbei werden die Logdateien gemäß der Parameter der Testkonfiguration wie folgt umbenannt:

```

1 var todayStrShort = DateTime.Today.ToString("yyMMdd");
2 var mutated = isMutated ? "MT" : "MF";
3 var faultProbStr = faultProbability.ToString(CultureInfo.
4     InvariantCulture);
5 var baseFileName = $"0x{benchmarkSeed:X8}-{faultProbStr}F-{hostsCount:
6     D1}H-{clientCount:D1}C-{stepCount:D2}S-{mutated}-{todayStrShort}";

```

Listing 6.9: Bestimmung des Dateinamens zur Umbenennung der Logdateien

Da beim Monitoring immer die Daten aller auf dem Cluster ausgeführten Anwendungen übertragen und im SSH-Log gespeichert werden, hat das Neustarten des Clusters bei jedem Testfall zudem den Nebeneffekt, dass im SSH-Log keine Daten von ausgeführten Anwendungen eines anderen Testfalls enthalten sind.

7. Evaluation der Ergebnisse

In Abschnitt 6.3 wurden 32 Testkonfigurationen ermittelt, die mithilfe des in dieser Fallstudie entwickelten Testansatzes insgesamt 43 mal ausgeführt wurden. Die meisten Konfigurationen wurden hierbei jeweils einmal ausgeführt, 7 Konfigurationen wurden auch mehrmals ausgeführt. Die Gründe für eine mehrfache Ausführung einzelner Konfigurationen sind in diesem Kapitel im Rahmen der entsprechenden Auffälligkeiten bzw. Fehler beschrieben. Eine Übersicht aller genutzten Testkonfigurationen und deren Ausführungen findet sich in Anhang E.

Bei der Auswertung der Programmlogs der einzelnen Tests musste zudem beachtet werden, dass die jeweiligen Monitoring-Informationen nur Momentaufnahmen bilden. Vor allem bei längeren Schritten werden vom RM sehr viele Anpassungen vorgenommen, die aufgrund der in Abschnitt 6.1.4 implementierten Struktur eines Simulations-Schrittes bzw. Testfalls nicht erkannt werden können.

Zur Auswertung der Evaluation dienten vor allem die im YARN-Modell implementierten Constraints, die sich aus den in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen ergeben (vgl. Abschnitte 4.2.6, 4.2.8 und 6.1.1).

7.1. Statistische Kenndaten

Die Dauer aller Simulationen betrug ca. 4:16:44 Stunden, die gesamte Ausführungsdauer inkl. Starten und Beenden des Clusters bei jeder Konfiguration betrug ca. 5:19:57 Stunden. Von den 290 Testfällen, die ausgeführt werden hätten sollen, wurden nur 222 Testfälle (77 %) ausgeführt. Der Grund für den Abbruch von 14 Tests liegt zum Großteil im in Abschnitt 4.2.9 beschriebenen Abbruch der Simulation, wenn keine Rekonfiguration des Clusters mehr möglich ist, also bei allen Nodes des Clusters ein Komponentenfehler injiziert und dies beim Monitoring erkannt wurde. Ein Test wurde aufgrund der zu geringen Anzahl an Submittern abgebrochen, was in Abschnitt 7.7.3 genauer erläutert wird.

Insgesamt wurde bei allen Tests 439 Komponentenfehler aktiviert (14 % von 3100 möglichen), von denen jedoch nicht alle injiziert wurden, da bei einigen Testfällen beide Komponentenfehler der Nodes gleichzeitig aktiviert wurden. In diesen Fällen überwog gemäß Abschnitt 4.2.3 die Aktivierung es Komponentenfehlers, der den Node komplett beendet. Von allen aktivierten Komponentenfehlern wurden während der Simulationen 262 Komponentenfehler deaktiviert bzw. repariert, was eine Quote von 60 % ergibt. In 4 der ausgeführten Testfällen wurde jedoch kein einziger Komponentenfehler

deaktiviert, weshalb die Tests der Konfigurationen 4, 5.1, 5.2 und 6 entsprechend frühzeitig abgebrochen wurden (vgl. Abschnitt 7.5.1 und Abschnitt 7.6.1).

Bei den 43 Tests wurden 408 Anwendungen im Cluster gestartet, von denen mit 204 rund die Hälfte erfolgreich und damit vollständig ausgeführt wurden, aufgrund eines Fehlers vorzeitig beendet bzw. gefailt waren mit 110 etwas mehr als ein Viertel der gestarteten Anwendungen. Vorzeitig abgebrochen wurden bei den Tests 52 Anwendungen (13 %), was 42 Anwendungen macht, die zum Ende der Simulationen noch ausgeführt wurden. Nicht eingerechnet sind hier 29 nicht gestartete Anwendungen, die Gründe hierfür sind in Abschnitt 7.7.2 erläutert. Für die gestarteten Anwendungen wurden 555 Attempts gestartet, was im Schnitt 1,36 Attempts pro Anwendung ergibt. Auffällig ist hierbei, dass mit 214 Attempts 9 Attempts mehr aufgrund eines AppMstr-Timeouts abgebrochen wurde, als während der Simulation erfolgreich beendet wurden (203 Attempts). 32 weitere Attempts wurden aufgrund eines Fehlers im Map-Task abgebrochen, 12 weitere terminierten mit dem Exitcode -100, was ebenfalls auf Fehler hindeutet. Das ergibt dadurch eine Quote von 46,5 % aller gestarteten Attempts, die nicht erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Beim Monitoring wurden 3150 Anwendungs-Container erkannt, was im Schnitt 7,72 Container pro Anwendung bzw. 5,68 pro Attempt ergibt. Da bei den zu startenden Anwendungen einige kleine und einige sehr ressourcenintensive Anwendungen enthalten sind (vgl. Abschnitt 5.2.1), kann sich die Anzahl der Container zwischen den einzelnen Anwendungen sehr unterscheiden.

Vom Oracle wurden bei allen Tests zusammengezählt 78.825 Constraints validiert, von denen 573 vom Oracle als ungültig validiert wurden (0,73 %). Die meisten ungültigen Constraints hatten hierbei die Tests 31.2 und 32 mit 40 bzw. 42 Constraints (von jeweils 5140 geprüften), die höchste Quote Konfiguration 8 mit 1,97 % der Constraints (13 von 661). Der Hauptgrund für die teilweise sehr hohe Anzahl an ungültigen Constraints vor allem liegt darin, dass die Constraints für fehlerhaften Anwendungen auch in nachfolgenden Testfällen innerhalb einer Ausführung einer Testkonfiguration entsprechend erkannt werden (vgl. Abschnitt 7.7.1). Dies resultiert in bis zu 34 ungültigen Constraints für fehlerhafte Anwendungen bei den einzelnen Tests.

Zusammenfassung, hier erwähnen, dass MUT schneller und weniger failapps hatte?

7.2. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend basierend auf der vorhandenen Datenbasis der 43 ausgeführten Tests lässt sich sagen, dass sich das entwickelte Testsystem und das Hadoop-Cluster im Großen und Ganzen so verhält, wie es erwartet werden konnte. Dennoch wurden nicht alle der in Abschnitt 3.2.1 definierten funktionalen Anforderungen an das Cluster selbst und der in Abschnitt 3.2.2 definierten Anforderungen an das gesamte Testsystem vollständig erfüllt. Die meisten dieser Anforderungen wurden mithilfe der definierten Constraints

implementiert (vgl. Abschnitte 4.2.6, 4.2.8 und 6.1.1), wodurch die Anforderungen bei jedem Testfall automatisch validiert werden konnten.

Vor allem die Cluster-Anforderung, wonach alle Tasks vollständig ausgeführt werden, sofern sie nicht abgebrochen werden, wurde bei den 110 nicht erfolgreichen Anwendungen nicht erfüllt. Aber auch bei einigen vollständig ausgeführten Anwendungen wurde diese nicht komplett erfüllt, was die mit dem Exitcode -100 beendeten Attempts zeigen (vgl. Abschnitt 7.7.1). Bei Attempts mit dem Exitcode -100 wird zudem die Anforderung, dass kein Task an defekte Nodes gesendet wird, verletzt.

Bei der Validierung der Constraints ist es zudem vorgekommen, dass diejenigen für die Anforderungen, dass die Konfiguration aktualisiert sowie der Status des Clusters vom Testsystem erkannt und im Testmodell gespeichert wird, als ungültig validiert wurden. Dies waren nach einer genaueren Betrachtung der Gründe hierfür in Abschnitt 7.8.1 zum Teil jedoch falscher Alarm, wodurch diese Anforderungen zu großen Teilen als erfüllt angesehen werden können. Genauso verhält es sich bei den in Abschnitt 7.5.2 beschriebenen, nicht erkannten, injizierten und reparierten Komponentenfehlern, wonach die Anforderungen, dass defekte Nodes und Verbindungsabbrüche erkannt werden, bei der Betrachtung eines einzelnen Testfalls in 19 Fällen zwar nicht erfüllt, bei der Betrachtung der gesamten Tests jedoch als erfüllt angesehen werden können.

Auch die Anforderung, dass sich der MARP-Wert anhand der ausgeführten Anwendungen verändert, wurde nicht immer erfüllt. Die Betrachtung der Werte bei den einzelnen Tests in Abschnitt 7.3 ergab, dass es durchaus möglich ist, dass die bei einem Test ausgeführten Anwendungen nicht ausreichen, damit sich der Wert verändert. Dennoch war es anhand dieser Anforderung möglich, die in Abschnitt 6.2 implementierten Mutanten der Selfbalancing-Komponente, bis auf einige in Abschnitt 7.4 erläuterte Besonderheiten, in den ausgeführten Tests zu erkennen. Auch die Anforderung, dass die in Abschnitt 4.2.3 implementierten Komponentenfehler im realen Cluster injiziert und repariert werden, konnte aufgrund des in Abschnitt 7.6.3 erläuterten Falls nicht immer erfüllt werden. In diesem Kontext zeigte sich aber, dass immer erkannt werden konnte, wenn keine weitere Rekonfiguration des Clusters möglich ist und diese Anforderung somit erfüllt wird (vgl. Abschnitt 7.6). Zudem konnte in einigen der in Abschnitt 7.7.2 erläuterten Fällen die Anforderung, dass mehrere BenchmarkAnwendungen gleichzeitig gestartet und ausgeführt werden können, nicht erfüllt werden.

Zu einem großen Teil erfüllt werden konnte jedoch die Anforderung, dass ein Test vollautomatisch ausgeführt werden kann. Lediglich bei der Ausführung von mehreren Testfällen direkt hintereinander mithilfe der in Abschnitt 6.4 implementierten `CaseStudyTests`-Klasse kam es vor, dass genauso wie in Abschnitt 7.7.3 die vom Connector bereitgestellten Submitter zum Starten von Anwendungen nicht ausgereicht haben.

Die genauen Gründe für die verletzten Anforderungen und Constraints sind in den bereits verwiesenen, nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Die 43 ausgeführten Tests haben aber auch gezeigt, dass das Cluster ohne Auswirkung auf seine Funktionsweise auf einem oder mehreren Hosts ausgeführt werden kann. Auch zeigte sich bei den 7 Testkonfigurationen mit mehrmaligen Ausführungen, dass die Tests und seine Testfälle im Grunde mehrmals ausgeführt werden können. Die einzigen Unterschiede bei den jeweiligen Ausführungen waren ausschließlich durch die Verteilung der Last innerhalb des Clusters bedingt, was sich vor allem in direkten Vergleichen zwischen korrespondierenden Tests wie z. B. in Abschnitt 7.6.3 zeigt.

7.3. Betrachtung der MARP-Werte

Bei der Betrachtung der MARP-Werte lässt sich generell sagen, dass die Selfbalancing-Komponente den MARP-Wert entsprechend der Auslastung des Clusters anpasst. Während bei allen Testkonfigurationen, bei denen Mutationen aktiv waren, der MARP-Wert unverändert blieb (vgl. Abschnitt 7.4), wurde er bei 17 von 21 Ausführungen der 16 Konfigurationen ohne Mutationen verändert:

Konf.	1.1	1.2	3	5.1	5.2	7.1	7.2
Wert	0,100	0,100	0,474	0,242	0,100	0,100	1,000

Konf.	9.1	9.2	11	13	15	17	19
Wert	0,269	0,175	0,539	0,356	0,368	0,731	0,430

Konf.	21	23	25	27	29	31.1	31.2
Wert	0,335	0,498	0,521	,0819	0,273	0,488	0,333

Tabelle 7.1.: Finale MARP-Werte der Testkonfigurationen ohne Mutanten. Die Übersicht der Tests findet sich in Anhang E.

Da er in den Konfigurationen 1 und 7 bei der jeweils ersten Ausführung nicht verändert wurde, wurden beide Konfigurationen erneut ausgeführt, wobei der MARP-Wert bei letzterem mehrmals erhöht wurde, bevor er im finalen Clusterstatus auf 1 gesetzt wurde. Bei der Konfiguration 1 wurde der Wert dagegen bei keiner der beiden Ausführungen verändert.

Die nicht durchgeführte Änderung des MARP-Wertes in Konfiguration 1 liegt sehr wahrscheinlich daran, dass in hier nur im ersten der fünf Testfälle zwei Anwendungen gleichzeitig gestartet werden. Dadurch wurden in allen 10 Testfällen zusammen nur 8 Anwendungen gestartet, die Hälfte davon jeweils beim ersten Testfall. Da zudem 4 der 8 Anwendungen nur kleine Anwendungen (`randomtextwriter` und `pi`) sind, und diese entsprechend schnell beendet werden können, steht den wesentlich ressourcenintensiveren Anwendungen `TestDFSIO -write` und `TestDFSIO -read` das gesamte Cluster nahezu exklusiv zur Verfügung. Daher stehen in diesen Tests allen Anwendungen ausreichend Ressourcen zur Verfügung, was eine Anpassung des MARP-Wertes unnötig erscheinen lässt und daher durch die Selfbalancing-Komponente nicht durchgeführt wird.

Bei der Testkonfiguration 7 ist dies ähnlich, wobei die gesamte Last auf mehr Nodes verteilt werden kann. Der Test 7.2 und der hier deutlich veränderte MARP-Wert im Vergleich zu Test 7.1 ohne Anpassung zeigt jedoch auch, dass es stark abhängig davon ist, wie die Last im Cluster verteilt wird. Bestätigt wird dies durch die Tests 9.1 und 9.2, da bei letzterem weniger Komponentenfehler injiziert wurden und sich die Last entsprechend auf mehr aktive Nodes verteilen konnte. Dadurch war im Test 9.2 ein um rund 0,1 niedrigerer MARP-Wert als im Test 9.1 nötig.

Auffällig war zudem, dass der MARP-Wert in den Testausführungen 7.2, 9.1 und 23 nicht direkt im ersten Testfall verändert wurde, sondern erst bei der Ausführung von Testfällen im späteren Verlauf der jeweiligen Tests. Als Resultat wurde daher in 9 der 15 Testfälle der drei Testausführungen zunächst das hierfür genutzte Constraint als ungültig validiert.

7.4. Erkennung der Mutanten

Da die Selfbalancing-Komponente den MARP-Wert basierend auf der aktuellen Auslastung des Clusters anpasst, konnte anhand der Betrachtung der MARP-Werte auch geprüft werden, ob die implementierten Mutationen vom Testsystem erkannt wurden. Um das zu bewerkstelligen wurden von den 16 Testkonfigurationen mit einem Mutationsszenario 22 Testausführungen durchgeführt (vgl. Anhang E).

Zunächst wurde das Mutationsszenario genutzt, in dem alle vier Mutationen enthalten sind (vgl. Abschnitt 6.2). Bei jeder der 17 Testausführungen mit allen Mutanten wurden diese basierend auf dem Constraint zur Erkennung des MARP-Wertes erkannt. Eine Besonderheit bildet hier jedoch der Test 2, der den korrespondierenden Mutationstest zur Konfiguration 1 darstellt, bei der bei beiden Ausführungen der MARP-Wert nicht verändert wurde. Bei Test 2 kann daher nicht eindeutig festgestellt werden, ob der Mutant erkannt wurde, oder ob aufgrund der gestarteten Anwendungen der MARP-Wert nicht verändert wurde (vgl. Vermutungen zu Testkonfiguration 1 in Abschnitt 7.3).

Anders ist dies im Vergleich der Ausführungen der Testkonfigurationen 7 und 8. Durch die massive Veränderung des MARP-Wertes im Test 7.2 auf den finalen Wert von 1 kann davon ausgegangen werden, dass die Mutanten der Konfiguration 8 erkannt wurden. Dies wird dadurch gestützt, dass bei Konfiguration 8 im Gegensatz zur korrespondierenden Testkonfiguration 3 der 4 gestarteten Anwendungen gefault sind. Zudem stellt das ein Indiz dafür dar, dass der Mutant in Konfiguration 2 erkannt worden sein könnte.

Während bei jeder Konfiguration ein Mutationsszenario mit jeweils allen vier Mutanten genutzt wurde, wurde die Testkonfiguration 10 zusätzlich mit jeweils einem Mutanten ausgeführt. Ziel hierbei war es zu validieren, ob einzelne Mutanten ebenfalls vom Testsystem erkannt werden oder zur Erkennung der Mutanten vom Testsystem eine Kombination aus mehreren Mutanten nötig ist. Hierzu wurde die Testkonfiguration 10 mit unterschiedlichen Mutationsszenarien der Plattform Hadoop-Benchmark ausgeführt,

bei denen jeweils einer der in Abschnitt 6.2 definierten Mutanten aktiv ist. Die Auswahl dieser Testkonfiguration hierfür liegt darin begründet, dass hier das Cluster auf beiden Hosts mit zusammen sechs Nodes gestartet wird, auf denen bis zu vier Anwendungen gleichzeitig gestartet werden. Zudem wurde bei den Tests 9.1 und 9.2 festgestellt, dass sich der MARP-Wert nicht direkt im ersten, sondern auch in später ausgeführten Testfällen ändern kann, er aber während der Ausführung wirklich geändert wird (vgl. Abschnitt 7.3).

Einige Ergebnisse der hierfür 5 ausgeführten Tests sind sehr unterschiedlich. So variiert die Anzahl der aktivierten und deaktivierten Komponentenfehler zwischen 7 und 11 bzw. 5 und 9, sowie die Anzahl der gefailten Anwendungen zwischen 1 und 3. Gemein haben alle Tests jedoch, dass der MARP-Wert bei allen 5 Tests nicht verändert wurde, womit alle Mutationen erkannt wurden. Damit kann festgestellt werden, dass jeder der vier in Abschnitt 6.2 beschriebenen Mutanten durch das entwickelte Testsystem erkannt wird.

7.5. Betrachtung der Komponentenfehler

Die Aktivierung und Deaktivierung der Komponentenfehler in einem Testfall hängt neben dem zur Berechnung benötigtem Basisseed vor allem von den zuvor ausgeführten Testfällen bzw. der Lastverteilung bei den zuvor ausgeführten Testfällen eines Tests ab (vgl. Abschnitt 4.2.4). Daher wurden abhängig von der Lastverteilung im Cluster auch bei einer mehrmaligen Ausführung der gleichen Konfiguration bei einigen Testausführungen unterschiedliche Komponentenfehler aktiviert.

Unterschieden werden muss hierbei zudem zwischen aktivierten und injizierten Komponentenfehlern. Während beide implementierten Komponentenfehler für einen Node in einem Testfall auch gleichzeitig aktiviert werden konnten, wurde gemäß Abschnitt 4.2.3 in so einem Fall jedoch nur der `NodeDead`-Fehler im Cluster injiziert. Die Deaktivierung bzw. das Reparieren der Komponentenfehler verhält sich analog hierzu.

Im Folgenden wird nun ein Überblick über die bei den Tests aktivierten bzw. deaktivierten und nicht injizierten Komponentenfehler bzw. erkannten Injektionen und Reparaturen der Komponentenfehler gegeben.

7.5.1. Aktivierte und deaktivierte Komponentenfehler

Die Aktivierung und Deaktivierung der Komponentenfehler hing manchmal stark, manchmal weniger stark von der ausgeführten Testkonfiguration ab (die Übersicht der Testkonfigurationen findet sich in Anhang E). Im Vergleich zwischen korrespondierenden Konfigurationen, die sich nur in der Nutzung des Mutationsszenarios unterschieden, wurde nur 5 mal bei allen Tests die gleiche Anzahl an Komponentenfehler aktiviert, bei der Deaktivierung der Komponentenfehler besitzen nur 4 korrespondierende Konfigura-

tionen die gleiche Anzahl bei allen Tests. Die Anzahl der aktivierten und deaktivierten Komponentenfehler unterschied sich dagegen in 8 bzw. 7 korrespondierenden Testkonfigurationen um einen einen Komponentenfehler in allen Testausführungen. Bei den anderen korrespondierenden Konfigurationen unterschied sich die Anzahl bei allen jeweiligen Tests um mehr als einen Komponentenfehler. Mit jeweils 20 aktivierten Komponentenfehlern wurden bei den Tests 28.1, 31.1 und 32 die meisten aktiviert, die meisten Komponentenfehler deaktiviert wurden bei den Tests der Konfigurationen 11 und 12 mit jeweils 15 Stück. Nur im Test zur Konfiguration 2 wurden mit 3 Stück alle aktivierten Komponentenfehler während der Simulation auch wieder deaktiviert. In den Tests 4, 5.1, 5.2 und 6 wurden jeweils 6 oder 7 Komponentenfehler aktiviert, jedoch keine deaktiviert, weshalb diese Tests bereits beim 3. ausgeführten Testfall gemäß Abschnitt 4.2.9 abgebrochen wurden (vgl. Abschnitt 7.6.1).

Im Vergleich zwischen den Tests von korrespondierenden Testkonfigurationen sind die Tests der Konfigurationen 1 und 2 auffällig. Während beim Test 1.1 mit 5 Komponentenfehlern bzw. beim Test 1.2 mit 7 Komponentenfehlern jeweils rund jeder achte mögliche Komponentenfehler aktiviert wurde, wurden beim Test 2 lediglich 3 Komponentenfehler für 4 Nodes in 5 Testfällen (insgesamt also 40 mögliche Komponentenfehler) aktiviert. Eine geringere Quote weist lediglich Test 9.2 auf, bei dem mit 4 von 60 möglichen Komponentenfehler nur 7 % aktiviert wurden. Die Testkonfiguration 9 ist darüber hinaus auch deshalb auffällig, da im Test 9.1 fast dreimal so viele Komponentenfehler, also 11 Stück, aktiviert wurden. Auch in den korrespondierenden Tests der Konfiguration 10 liegt die Anzahl der aktivierten Komponentenfehler mit 7 bis 11 jeweils mehr als doppelt so hoch wie in Test 9.2.

Auffällig ist zudem, dass bei korrespondierenden Testkonfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an aktivierten Komponentenfehlern die niedrigere Anzahl meist diejenigen mit Mutationen aufweisen. Nur bei den Konfigurationen 9 und 10, 13 und 14, 27 und 28 und 31 und 32 weisen einige Tests ohne Mutationen eine geringere Anzahl an aktivierten Komponentenfehler auf als Tests mit Mutationen. Dies liegt wohl auch darin begründet, dass durch den veränderten MARP-Wert die verfügbaren Ressourcen besser an die Anwendungen verteilt werden konnten und bestätigt damit die Funktionalität der von Zhang u. a. entwickelten Komponente.

Weitere Auffälligkeiten ergeben sich zudem beim Vergleich der Ausführungszeiten der Simulationen. Die Tests 9.2, 15, 31.1 sowie 31.2 stellen die einzigen Test ohne Mutationen dar, bei denen die Simulation schneller abgeschlossen wurde als in den korrespondierenden Tests mit Mutationsszenario. Da sich das mit der generellen Aussage beim Vergleich der aktivierten Komponentenfehler deckt, kann davon ausgegangen werden, dass die geringere Anzahl an Komponentenfehler zudem die Auswirkung hat, dass Anwendungen schneller gestartet werden können. Der Grund hierfür könnte darin liegen, dass bei weniger injizierten Komponentenfehler auch entsprechend weniger Verwaltungsaufwand für bereits ausgeführte Anwendungen nötig ist, wodurch neu

gestartete Anwendungen ebenfalls schneller durch das Cluster verarbeitet werden können. Um hier jedoch eine fundierte Aussage treffen zu können, wären weitere vergleichende Tests nötig (vgl.

auf Diskussion dazu, evtl. auch mit diskussion zu selfbalancing-komponente verbinden

)

7.5.2. Nicht erkannte, injizierte bzw. reparierte Komponentenfehler

Bei 18 aller ausgeführten Tests kam es vor, dass ein injizierter bzw. reparierter Komponentenfehler zunächst nicht vom Testsystem erkannt wurde. Das betraf konkret drei mal das Injizieren eines Komponentenfehlers sowie 16 mal das Reparieren eines Komponentenfehlers:

Test	Testfall	Art	Node
1.1	5	Node beenden	4
2	5	Node starten	2
7.1	2	Node beenden	5
7.1	5	Node starten	5
7.2	5	Node starten	5
11	6	Node trennen	6
17-28.2	2	Node verbinden	4

Tabelle 7.2.: Übersicht der nicht erkannten, injizierten bzw. reparierten Komponentenfehler. Die Übersicht der Tests findet sich in Anhang E.

Bei den aufgetretenen als ungültig validierten Constraints fällt auf, dass die betroffenen Nodes im jeweils nachfolgenden Testfall mit ihrem jeweils korrekten Status erkannt wurden. Die 19 als ungültig markierten Constraints zu den Anforderungen aus Abschnitt 3.2, dass defekte Nodes und Verbindungsabbrüche erkannt werden, wurden somit korrekt, als auch inkorrekt, als ungültig validiert. Dies liegt daran, dass das Cluster bei defekten Nodes erst einige Zeit benötigt, um zu erkennen, dass ein Node ausgefallen ist. Auch wenn ein Node nicht mehr defekt ist, benötigt dieser bzw. der RM erst einige Zeit, bis erkannt wird, dass der Node wieder aktiv ist. Dies liegt einerseits daran, dass Hadoop bzw. der RM nicht kontinuierlich, sondern periodisch nach einer bestimmten Zeitspanne den Status der Nodes prüft und bei nicht erreichbaren Nodes zunächst solange wartet, bis die Abfrage durch einen *Timeout* beendet wird. Zwar wurden beide Zeitspannen im getesteten Cluster auf jeweils 10 Sekunden festgelegt, jedoch reichte diese Zeitspanne wohl nicht immer aus, um den Status rechtzeitig zu erkennen. Beim Starten bzw. Wiederverbinden eines Nodes sieht dies analog dazu aus, wobei Hadoop auf dem jeweiligen Node hier zunächst gestartet werden muss, bevor es sich dann selbstständig mit dem RM verbindet, was ebenfalls eine gewisse Zeit benötigt. Dies wird

auch dadurch bestätigt, dass für die betroffenen Nodes in den jeweils nachfolgenden Testfällen bzw. dem finalen Clusterstatus oder in korrespondierenden Tests der Status korrekt erkannt wurde, den die Nodes gemäß aufgrund der Komponentenfehler besitzen sollten.

Eine Besonderheit bilden hierbei zunächst die beiden Tests zur Konfiguration 7. Im Test 7.1 wurde der gleiche Node zunächst nicht als defekt erkannt bevor er im letzten Testfall noch als defekt erkannt wurde, obwohl er bereits wieder gestartet wurde. Dazwischen wurde der betroffene Node 5 zunächst im Testfall 3 wieder gestartet, bevor er im Testfall 4 wieder beendet wurde, von denen beide Aktionen korrekt erkannt wurden. Im Unterschied zum ersten Test der Konfiguration wurde im Test 7.2 nur das Starten des Nodes nicht korrekt erkannt, während das beenden des Nodes 5 im 2. Testfall erkannt wurde. Im finalen Clusterstatus ist der Node jedoch wie im Test 7.1 korrekt als aktiv markiert.

Die zweite Besonderheit bilden die Tests der Konfigurationen 17 bis 28. Hier wurde in allen Tests der Node 4 im jeweils ersten Testfall direkt vom Cluster getrennt, was noch korrekt erkannt wurde. In den Testkonfigurationen 25 bis 28 wurde im nachfolgenden dritten Testfall jedoch der Node direkt wieder vom Netzwerk getrennt, weshalb hier nur vermutet werden kann, dass der Node im zweiten Testfall korrekt mit dem Cluster verbunden wurde. Davon kann jedoch ausgegangen werden, da in den sechs Tests auf einem Host (Tests 17 bis 22) der Node im nachfolgenden, dritten Testfall nicht verändert wird und auch als aktiv erkannt wurde. Auch in den Tests 29 bis 32 wurde alles korrekt erkannt, da hier der Node im ersten Testfall ebenfalls getrennt, im zweiten wieder verbunden, und im dritten Testfall zudem erneut vom Cluster getrennt wird. In den Tests 23 bis 28.2 wird der Node dagegen zwar ebenfalls im dritten Testfall wieder vom Cluster getrennt, jedoch wird dies hier auch wieder korrekt erkannt.

7.6. Rekonfiguration des Clusters nicht möglich

Insgesamt 13 der 42 ausgeführten Tests wurden vorzeitig abgebrochen, da eine Rekonfiguration des Clusters nicht möglich war. Dies entspricht dem in Abschnitt 3.2.2 geforderten und in Abschnitt 4.2.9 implementierten Verhalten, wenn alle Node im Cluster defekt sind. Im Folgenden wird für die betroffenen Testkonfigurationen und Tests (vgl. Anhang E) betrachtet, weshalb es dazu kam.

7.6.1. Testkonfigurationen 3 bis 6

Erstmalig ist ein Abbruch im Test 4 aufgetreten, auch die weiteren korrespondierende Tests der Konfigurationen 5 und 6 wurden abgebrochen. Hier waren bereits beim 3. Testfall alle verfügbaren Nodes beendet, was auffällig ist, vor allem da damit die Hälfte der Tests mit dem ersten Seed und dem Cluster auf einem Host vorzeitig abgebrochen

wurden. Das liegt einerseits daran, dass im Gegensatz zu den beiden Konfigurationen mit nur zwei Clients hier bis zu vier Anwendungen gleichzeitig gestartet werden, was die Last auf den Nodes deutlich erhöht. In Test 3, welcher somit theoretisch ebenfalls abgebrochen werden hätte müssen, wurden 11 Anwendungen im Cluster gestartet. Dies liegt an der geringeren Auslastung eines einzelnen Nodes im Gegensatz zu den anderen Tests. In den abgebrochenen Tests hatte Node 4 im ersten Testfall eine hohe bzw. sehr hohe Auslastung, im Test 3 jedoch nur eine mittlere. Diese mittlere Auslastung reichte jedoch aus, um den Node im ausgeführten 3. Testfall gemäß Abschnitt 4.2.4 wieder zu aktivieren, während die anderen noch aktiven Nodes spätestens in diesem Testfall aufgrund der hohen Last einen Komponentenfehler injiziert bekamen. Durch diesen einen nun weiterhin ausgeführten Node ist es dem Cluster daher möglich gewesen, sich im Test 3 zu rekonfigurieren.

7.6.2. Testkonfigurationen 15 und 16

Die Ausführung der Tests 13 bzw. 14 und 15 bzw. 16 unterscheidet sich nur in der Anzahl der Testfälle der jeweiligen Testkonfiguration. Dementsprechend wurden die äquivalenten Tests 13 und 14 im Gegensatz zu den beiden anderen vollständig ausgeführt, da der Abbruch der Tests 15 und 16 im sechsten ausgeführten Testfall stattfand. Die Nodes hatten im fünften Testfall der vier Tests folgende Auslastung:

Test	13	14	15	16
Fehlerhafte Nodes	2	2	3	1
Auslastung in Prozent	47	97	96	98

Tabelle 7.3.: Status der Nodes im fünften Testfall der Tests 13 bis 16. Der Wert der Auslastung ist die kumulierte Auslastung aller noch aktiven Nodes.

Bei den beiden betroffenen Tests 15 und 16 sehr hohe Auslastung der noch aktiven Nodes im fünften Testfall führte im darauf folgenden Testfall dazu, dass bei allen noch aktiven Nodes ein Komponentenfehler aktiviert wurde. Daher wurden die beiden Tests im jeweils sechsten ausgeführten Testfall abgebrochen. Es ist auch davon auszugehen, dass der Test 14 aufgrund der ebenfalls sehr hohen Auslastung im sechsten Testfall wahrscheinlich ebenfalls abgebrochen worden wäre.

7.6.3. Testkonfigurationen 19 bis 22

Bei den Konfigurationen 19 bis 22 verhält es sich ähnlich wie bei den Konfigurationen 3 bis 6. Analog dazu wurde auch Test 19 nicht vorzeitig abgebrochen, die Tests 20 bis 22 im vierten Testfall dagegen schon.

Alle vier Tests haben gemeinsam, dass im jeweils dritten Testfall lediglich Node 1 inaktiv ist. Bei den beiden Tests ohne Mutationsszenario wurde hierbei jeweils die Verbindung zum Node im Testfall zuvor getrennt, bei den Mutationstests wurde der

Node durch einen Komponentenfehler beendet. Dies liegt in der Historie des Nodes innerhalb des Tests begründet:

Test	19	20	21	22
Testfall 1	Ausl.: 93 %	Ausl.: 0 %	Ausl.: 100 %	Ausl.: 0 %
Testfall 2	Injiziert: Verbindung getrennt	Ausl.: 100 %	Injiziert: Verbindung getrennt	Ausl.: 93 %
Testfall 3	-	Injiziert: Node beendet	-	Injiziert: Node beendet
Testfall 4	Repariert: Verbunden Ausl.: 93 %	-	<i>Repariert: Verbunden</i>	-

Tabelle 7.4.: Auslastungen und Komponentenfehler in Node 1 der Tests 19 bis 22

Die Aktivierung und Deaktivierung der Komponentenfehler in den anderen Nodes ist in allen Tests gleich und daher zur Ermittlung der Gründe des Abbruchs der Testausführung nicht relevant. Durch die unterschiedliche Auslastungen im ersten Testfall der Tests zwischen Tests ohne Mutationen (19 und 21) und mit Mutationen (20 und 22) wurden unterschiedliche Komponentenfehler aktiviert. Dies führte dazu, dass der relevante Node 1 bei den Mutationstests nicht gestartet wurde, während die anderen Nodes beendet wurden wie in den Tests 19 und 21.

Eine Besonderheit bildet hier zudem Test 21, bei dem der Komponentenfehler vom Testsystem deaktiviert wurde, jedoch nicht repariert werden konnte. Dies liegt darin, dass der Docker-Container nicht mit dem Docker-Netzwerk verbunden werden konnte. Aus diesem Grund wurde vom Oracle bei der Prüfung der Rekonfigurierbarkeit des Clusters der Test entsprechend beendet, da der Node nicht verbunden war. Zwar wurde der Fehler von Docker nicht absichtlich oder durch das Testsystem herbeigeführt, hat jedoch eine positive, als auch eine negative Seite. So wurde auch ein externer, nicht direkt durch die Anforderungen in Abschnitt 3.2.2 abgedeckter Fehler erkannt, jedoch auf Kosten der Anforderung, dass im Modell implementierte Komponentenfehler im realen Cluster repariert werden.

7.6.4. Testkonfigurationen 27 und 28

In den beiden Tests 28.1 und 28.2 wird der Test im 8. Testfall abgebrochen, während Test 27 nach allen 10 Testfällen regulär beendet wird. Das liegt daran, dass im 8. Testfall bei den beiden Mutationstests in fünf der sechs Nodes ein Komponentenfehler injiziert wird, von Node 1 wird die Verbindung getrennt, die Nodes 3 bis 6 komplett beendet. Im Test 27 ohne Mutationsszenario wird dagegen zwar auch die Verbindung von Node 1 getrennt, aber zusätzlich nur Node 3 beendet, sodass die Nodes 4 bis 6

weiterhin aktiv sind. Node 2 wird in allen drei Tests bereits im dritten Testfall beendet, da die Auslastung des Nodes im zweiten Testfall bei jeweils über 90 Prozent liegt. Die übrigen der 19 bzw. 20 aktivierten und zwischen 10 und 13 wieder deaktivierten Komponentenfehlern unterschieden sich in den drei Tests bis auf einzelne, hier nicht relevante, Ausnahmen nicht.

kürzen und die genaue erklärung auf entsprechende abschnitte verweisen

Der Grund für die Injizierung von Komponentenfehlern bei noch allen aktiven Nodes im achten Testfall liegt in der Auslastung der Nodes im siebten Testfall. Diese beträgt im Test 27 ohne Mutationen bei den beiden betroffenen Nodes jeweils 100 Prozent, bei den übrigen Nodes ist jedoch keine bzw. eine geringe Auslastung vorhanden. In den beiden Tests der Konfiguration 28 ist das Cluster jeweils vollständig ausgelastet, wodurch die Wahrscheinlichkeit zur Aktivierung der Komponentenfehler im folgenden Testfall stark ansteigt. Dadurch war es möglich, dass alle noch aktiven Nodes vom Cluster getrennt bzw. beendet wurden und der Test aufgrund fehlender Rekonfigurationsmöglichkeiten abgebrochen wurde.

7.6.5. Testkonfigurationen 31 und 32

Die Tests der Konfigurationen 31 und 32 verliefen ähnlich zueinander. Die hohe Anzahl der 19 bzw. 20 aktivierten Komponentenfehler reichten bei jeweils 11 wieder deaktivierten Fehlern aus, um die Tests 31.2 und 32 im achten Testfall abzuberechnen. Der Test 31.1 verlief zwar ebenfalls ähnlich zu den beiden anderen Tests, wurde jedoch aufgrund fehlender, verfügbaren Submitter des Connectors beendet. Die Gründe dafür sind in Abschnitt 7.7.2 erläutert, weshalb der Test 31.1 hier nicht genauer betrachtet wird.

Bei den beiden Tests 31.2 und 32 fällt auf, dass es bei jeweils mehreren Testfällen vorgekommen ist, dass mehr als 3 Komponentenfehler aktiviert bzw. deaktiviert wurden. So kam es vor, dass z. B. in dritten ausgeführten Testfall bereits eine Rekonfiguration nur deshalb möglich war, weil der zuvor vom Cluster getrennte Node 1 wieder mit dem Cluster verbunden wurde, während die Nodes 2 und 4 bis 6 anderen Nodes getrennt oder beendet wurden, während Node 3 bereits im Testfall zuvor beendet wurde. Ebenso verlief der dritte Testfall auch in den beiden Tests der Konfigurationen 29 und 30, bei denen nur fünf Testfälle ausgeführt wurden.

Bis auf den beendeten Node 2 wurden spätestens im sechsten ausgeführten Testfall die im dritten Testfall injizierten Komponentenfehler wieder repariert. Zwar wurde im siebten Testfall je ein Komponentenfehler repariert, jedoch im Test ohne Mutationen auch ein weiterer injiziert. In Kombination mit den drei bzw. vier aktivierten Komponentenfehlern im achten Testfall führte das daher dazu, dass kein aktiver Node im Cluster mehr vorhanden war und der Test entsprechend abgebrochen wurde.

7.7. Betrachtung der Anwendungen

Bei der Betrachtung der auf dem Cluster auszuführenden Anwendungen sind vor allem zwei Punkte aufgefallen: Viele Anwendungen wurden aufgrund von Fehlern beendet und einige Anwendungen, vor allem bei den Tests der Konfigurationen 17 bis 32 (vgl. Anhang E), konnten nicht gestartet werden. Dies widerspricht zum Teil den in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen, hat aber mehrere Gründe, die im Folgenden erläutert werden.

7.7.1. Aufgrund von Fehlern abgebrochene Anwendungen

Wie bereits erwähnt, sind etwas mehr als ein viertel aller gestarteten Anwendungen gefailt, was im Schnitt 2,6 gefailte Anwendungen pro ausgeführten Test ergibt. Die meisten gefailten Anwendungen sind hierbei mit 9 bzw. 8 bei den Tests der Konfigurationen 31 und 32 zu finden. Auffällig ist zudem der Vergleich zwischen den Tests 19 und 20. Während bei der Ausführung der Testkonfiguration 19 ganze 5 Anwendungen gefailt sind, ist bei der Ausführung des Tests 20 keine einzige gefailt. Ebenfalls auffallend ist, dass bei Konfigurationen mit Mutationsszenario fast immer weniger oder gleich viele Anwendungen gefailt sind als bei den korrespondierenden Konfigurationen ohne Mutationsszenario. Eine Ausnahme bildet der Test 8, bei dem 3 Anwendungen gefailt sind, während bei den Tests 7.1 und 7.2 jeweils keine Anwendung gefailt ist. Eine weitere Ausnahme bildet der Test 9.2, bei dem eine Anwendung mehr gefailt ist als im Test 10.3, die restlichen Tests der Konfigurationen 9 und 10 verhalten sich jedoch wie andere korrespondierende Testkonfigurationen.

Bei der Betrachtung der Constraints, welche die in Abschnitt 3.2.1 definierte Anforderung umsetzen, dass Anwendungen vollständig ausgeführt werden, solange sie nicht manuell bzw. durch das Testsystem vorzeitig abgebrochen werden, fällt auf, dass die Anzahl der ungültigen Validierungen durch das Oracle mit kumuliert 343 ungültigen Constraints mehr als die Hälfte aller ungültigen Constraints ausmacht (59,9 %). Im Schnitt ergibt das somit rund 8 ungültige Constraints pro Test bzw. ca. 1,8 ungültige Constraints pro durch das Oracle überprüften Testfall. Die auf den ersten Blick sehr hohe Anzahl an ungültigen Constraints resultiert daraus, dass eine gefailte Anwendung bei jedem nachfolgenden Testfall bei einer Testausführung erneut durch das Oracle entsprechend validiert wurde. Dadurch sind ein Großteil der als ungültig validierten Constraints ein falscher Alarm, da die entsprechende Anforderung pro Anwendung nur einmal nicht erfüllt werden kann. Aussagekräftiger ist daher die Anzahl von 110 nicht vollständig abgeschlossenen bzw. aufgrund eines Fehlers abgebrochenen Anwendungen.

Anhand der Datenbasis lassen sich vier Ursachen für nicht vollständig ausgeführte Anwendungen ausmachen:

- Der AppMstr ist nicht mehr erreichbar, da der auszuführende Node aufgrund eines Komponentenfehlers nicht mehr erreichbar ist. Dadurch wird der AppMstr nach einiger Zeit mit dem Fehler *AppMstr-Timeout* als abgebrochen markiert.
- Die den AppMstr zugewiesenen Nodes sind vollständig ausgelastet, wodurch dem AppMstr selbst die benötigten Ressourcen nicht allokiert bzw. der AppMstr nicht ausgeführt werden kann. Nach einiger Zeit wird der AppMstr daher mit dem Fehler *AppMstr-Timeout* abgebrochen. Das beinhaltet auch Timeouts, wenn einem AppMstr nicht einmal ein ausführender Node zugewiesen werden kann.
- Während der Ausführung einer MRAnwendung wird ein Fehler im Map-Task festgestellt, der dazu führt, dass der Task abgebrochen wird. Dieser Fehler kam bei den hier ausgeführten Tests bei der Anwendung `TestDFSIO -read` vor, wenn die zuvor generierten Eingabedaten für diesen Benchmark aufgrund aktivierter Komponentenfehler nicht mehr im Cluster vorhanden waren. Zwar werden Dateien im HDFS immer auf mehr als einem Node gespeichert (vgl. Abschnitt 2.2), jedoch ist es möglich, dass die für die Anwendung benötigten Daten auf Nodes repliziert wurden, die alle beendet wurden. Dies führte dazu, dass die benötigten Daten nicht gefunden werden können bzw. bereits im HDFS als fehlerhaft markiert sind. Dadurch wird im Map-Task ein Fehler ausgelöst, der die gesamte Anwendung vorzeitig beendet. Aufgrund eines Fehlers im Map-Task wird auch die `fail`Anwendung beendet, jedoch ist das in diesem Fall das gewünschte Verhalten der Anwendung und zählt daher nicht als Fehler.
- Der AppMstr eines Attempts wird mit dem Exitcode -100 beendet. Dieser Fehler kommt dann vor, wenn versucht wird, einen Task eines Anwendungs-Containers der jeweiligen Anwendung bzw. Attempt auf einem defekten Node auszuführen und widerspricht somit zusätzlich der in Abschnitt 3.2.1 Anforderung, dass kein Task oder Anwendung an defekte Nodes gesendet wird. Dieser Fehler trat nur dann auf, wenn im ausführenden Node des betroffenen AppMstr im gleichen Testfall ein Komponentenfehler injiziert wurde und der Node dadurch ausfiel. Aufgrund der mit dem Fehler verbundene Fehlermeldung „*Container released on a *lost* node*“ liegt die Vermutung nahe, dass Anwendungs-Container, hier wahrscheinlich der AppMstr, zum Zeitpunkt der Fehlerinjizierung bereits abgeschlossen waren und das Cluster die benötigten Ressourcen zu dem Zeitpunkt freigegeben hat. Da dies jedoch nicht möglich war, wurde der AppMstr mit dem entsprechenden Fehler beendet.

Hierbei werden aufgrund eines AppMstr-Timeouts zunächst nur die Attempts mit dem entsprechenden Fehler abgebrochen, nicht jedoch die Anwendung selbst. Die Anwendung selbst wird in so einem Fall erst dann als gefailt abgebrochen, sobald zwei Attempts aufgrund eines Timeouts abgebrochen werden mussten. Wenn ein Attempt mit dem Exitcode -100 terminiert, wird unabhängig von zuvor ausgeführten Attempts ein erneuter

Attempt mit entsprechendem AppMstr gestartet, wodurch hier die Anforderung, dass ein Task vollständig ausgeführt werden muss, teilweise erfüllt werden kann.

Bei einigen der AppMstr-Timeouts aufgrund der Aktivierung von Komponentenfehler lässt sich zudem ein spezielles Muster erkennen. Hierbei wurde in einem zuvor ausgeführten Testfall auf einem Node ein AppMstr einer Anwendung ohne Fehler allokiert. Nun kann es passieren, dass für diesen Node ein Komponentenfehler injiziert wird, was dazu führt, dass der Node nicht mehr erreichbar ist und der AppMstr aufgrund eines Timeouts als beendet markiert wird. Hierbei wird direkt im Anschluss ein neuer AppMstr allokiert, was auch dazu führt, dass die Anwendung nun einen zweiten Attempt besitzt, nachdem der erste aufgrund des Timeouts abgebrochen wurde. Dabei ist es nun möglich, dass dies noch während der Aktivierung von Komponentenfehlern innerhalb des Testfalls geschieht (vgl. Abschnitt 6.1.4), wodurch es möglich ist, dass der auszuführende Node des zweiten AppMstr ebenfalls aufgrund eines im gleichen Testfall injizierten Komponentenfehlers nicht mehr erreichbar ist. Dadurch wird der zweite AppMstr bzw. Attempt aufgrund des Timeouts vorzeitig als abgebrochen markiert und die gesamte Anwendung dadurch abgebrochen.

7.7.2. Nicht gestartete Anwendungen

Bei den Tests 19, 25 und 27 bis 32 kam es vor, dass insgesamt 29 Anwendungen nicht gestartet werden konnten. Meistens war die Anwendung `terasort` davon betroffen, einige male die Anwendung `teravalidate`. Ursächlich dafür ist die jeweils hohe Auslastung des Clusters in den Testfällen zuvor, bei denen den benötigten AppMstr der `teragen`Anwendungen keine Ressourcen auf den ausführenden Nodes allokiert werden konnte und diese daher mit einem AppMstr-Timeout beendet wurden (vgl. Abschnitt 7.7.1). Da in Abschnitt 6.3 definiert wurde, dass benötigte Eingabedaten für Anwendungen während der Ausführung der Tests generiert werden, konnten so die benötigten Eingabedaten für die Anwendung `terasort` nicht generiert werden (vgl. Abschnitt 5.2.1). Aufgrund der fehlenden Daten wurde daher die Anwendung direkt wieder abgebrochen, wodurch in 42 Testfällen nicht jeder Client eine Anwendung ausgeführt hat. In diesen Fällen wurde als Resultat zudem das Constraint der Anforderung aus Abschnitt 3.2.2, wonach mehrere BenchmarkAnwendungen gleichzeitig gestartet und ausgeführt werden können, aufgrund der Implementation (vgl. Abschnitt 4.2.3 durch das Oracle als ungültig validiert. Analog dazu verhält es sich bei der Anwendung `teravalidate`, welche wiederum die `terasort`-Ausgabedaten als Eingabedaten benötigt (vgl. Abschnitt 5.2.1).

7.7.3. Nicht ausreichend Submitter

Ein unerwarteter Fehler trat bei der Ausführung des Testfalls 31.1 auf. Hierbei kam es vor, dass die für die anderen Tests genutzten acht Submitter des Connectors zum

Starten von Anwendungen nicht ausreichend waren. Der Test wurde hierbei im achten Testfall abgebrochen, weil keine weiteren freien Submitter zur Verfügung standen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Daher wurde der Test zur Konfiguration 31 mit zehn Submittern erneut ausgeführt, wodurch dieser wie in Abschnitt 7.6.5 erläutert im achten Testfall aufgrund fehlender Rekonfigurierbarkeit abgebrochen wurde. Die Gründe für den Abbruch des Tests 31.1 liegen darin, dass die Docker-Container der Benchmarks (vgl. Abschnitt 4.4) nicht korrekt beendet wurden und die Submitter daher auf weitere Ausgaben der gestarteten Anwendungen gewartet haben.

7.8. Nicht erkannte oder gespeicherte Daten des Clusters

Einige Daten des Clusters wurden nicht im Testsystem gespeichert bzw. im Programmlog ausgegeben. Dies verstößt damit gegen die in Abschnitt 3.2.2 definierte Anforderung an das Testsystem, dass der jeweils aktuelle Status des Clusters erkannt und im Modell gespeichert werden muss. Vorgekommen ist das auf zwei Arten, die im folgenden erläutert werden.

7.8.1. Nicht erkannte Nodes auf Host 2

Einer der beiden Fälle ist, dass ausführende Nodes von Anwendungen bzw. Attempts nicht erkannt bzw. ausgegeben wurden, wodurch vom Oracle auch Verletzungen gegen die in Abschnitt 3.2 definierten Anforderungen erkannt wurden, wonach die Konfiguration des Clusters aktualisiert, und der aktuelle Status im Cluster erkannt und im Testmodell gespeichert werden muss. Hier geht es jedoch nicht um Anwendungen bzw. Attempts, die zwar bereits gestartet wurden, für die aber noch kein AppMstr allokiert werden konnte. In diesen Fällen ist es daher das normale Verhalten von Hadoop, keinen ausführenden Node anzugeben, da keiner vorhanden ist. Wenn dieser Status zu lange anhält, wurden die Attempts bzw. AppMstr durch Hadoop mit einem Timeout beendet (vgl. Abschnitt 7.7.1).

Anders sieht das jedoch in den sechs Tests 7.1, 8 und 23 bis 26 aus (vgl. Anhang E). In diesen Tests wurden zwar regulär die Daten der Nodes ermittelt und auch in den Logdateien ausgegeben, jedoch nicht alle ausführenden Nodes von Anwendungen und Attempts. Konkret betrifft das hier die beiden auf Host 2 ausgeführten Nodes der betroffenen AppMstr. In allen sechs betroffenen Tests wurden nur die vier auf Host 1 ausgeführten Nodes als ausführende Nodes der Attempts bzw. Anwendungen erkannt und auch in den Logdateien ausgegeben. Die auf Host 2 ausgeführten Nodes wurden gemäß des SSH-Logs allerdings ebenfalls übertragen, sofern den Attempts bzw. Anwendungen ein Node zugewiesen wurde, jedoch wurden diese nicht im Programmlog

ausgegeben. Zwar tritt hierbei ein gewisses Muster auf (pro Seed die jeweils zuerst ausgeführten Tests mit Nodes auf beiden Hosts), allerdings konnte dieser Fehler nicht gezielt reproduziert werden. Bei der erneuten Ausführung der Testkonfiguration 7 (Test 7.2) wurden alle Nodes korrekt erkannt und vom Testsystem im Programmlog gespeichert. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann daher nicht gesagt werden, weshalb die ausführenden Nodes in den betroffenen Testfällen nicht immer gespeichert wurden. Es kann nur vermutet werden, dass während dem Parsen der übertragenen Daten mit diesen Daten die betroffenen Nodes im Modell nicht gefunden werden konnten (vgl. Abschnitt 4.3.2). Dennoch lässt sich sagen, dass die beiden verletzten Anforderungen nach einer genaueren Begutachtung der Gründe dafür ein falscher Alarm des Oracles war.

7.8.2. Diagnostic-Daten von Anwendungen

Bei allen Tests ist zudem aufgefallen, dass die Diagnostic-Daten von Anwendungen nicht im Programmlog enthalten sind. Genauso wie bei den nicht erkannten Nodes auf Host 2 (vgl. Abschnitt 7.8.1) wurden alle Diagnostic-Daten von Hadoop an das Testsystem übertragen, die der Anwendungen im Gegensatz zu denen der Attempts jedoch nicht gespeichert. Zur Auswertung der Daten im Rahmen der Evaluation ist dies zwar irrelevant, da dies auch aufgrund der Daten der Attempts geschehen konnte, allerdings wird dadurch die in Abschnitt 3.2.2 definierte Anforderung an das Testsystem nur teilweise erfüllt, wonach der jeweils aktuelle Status des Clusters erkannt und gespeichert wird.

Eine Analyse ergab, dass die Diagnostic-Daten der Anwendungen aufgrund eines falsch gesetzten Attributs in der `ApplicationResult`-Klasse des Parsers nicht im Testsystem gespeichert werden konnten.

Reflexion: Hätte bei vorabtests erkannt werden müssen!

Da die Diagnostic-Daten der Anwendungen eine Zusammenfassung der gesamten Anwendung darstellen, und alle Diagnostic-Daten bereits durch die der Attempts vorhanden waren, wurde hier auf erneute Testausführungen verzichtet.

8. Reflexion und Abschluss

Literatur

- [1] M. Polo u. a. „Test Automation“. In: *IEEE Software* 30.1 (Jan. 2013), S. 84–89. ISSN: 0740-7459. DOI: 10.1109/MS.2013.15.
- [2] Orna Grumberg, EM Clarke und DA Peled. „Model checking“. In: (1999).
- [3] A. Habermaier u. a. „Runtime Model-Based Safety Analysis of Self-Organizing Systems with S#“. In: *2015 IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops*. Sep. 2015, S. 128–133. DOI: 10.1109/SASOW.2015.26.
- [4] Axel Habermaier, Johannes Leupolz und Wolfgang Reif. „Unified Simulation, Visualization, and Formal Analysis of Safety-Critical Systems with S#“. In: *Critical Systems: Formal Methods and Automated Verification: Joint 21st International Workshop on Formal Methods for Industrial Critical Systems and 16th International Workshop on Automated Verification of Critical Systems, FMICS-AVoCS 2016, Pisa, Italy, September 26-28, 2016, Proceedings*. Hrsg. von Maurice H. ter Beek, Stefania Gnesi und Alexander Knapp. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 150–167. ISBN: 978-3-319-45943-1. DOI: 10.1007/978-3-319-45943-1_11. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45943-1_11.
- [5] Benedikt Eberhardinger u. a. „Back-to-Back Testing of Self-organization Mechanisms“. In: *Testing Software and Systems: 28th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2016, Graz, Austria, October 17-19, 2016, Proceedings*. Hrsg. von Franz Wotawa, Mihai Nica und Natalia Kushik. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 18–35. ISBN: 978-3-319-47443-4. DOI: 10.1007/978-3-319-47443-4_2. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47443-4_2.
- [6] Axel Habermaier. *Model Checking*. 10. Mai 2016. URL: <https://github.com/isse-augsburg/sssharp/wiki/Model-Checking> (besucht am 30.05.2018).
- [7] Apache Software Foundation. *Welcome to ApacheTMHadoop®!* 18. Dez. 2017. URL: <https://hadoop.apache.org/> (besucht am 27.12.2017).
- [8] zuletzt bearbeitet von XingWang. *Powered by Apache Hadoop*. 5. Apr. 2018. URL: <https://wiki.apache.org/hadoop/PoweredBy> (besucht am 24.06.2018).
- [9] Jeffrey Dean und Sanjay Ghemawat. „MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters“. In: *Proceedings of the 6th Conference on Symposium on Operating Systems Design & Implementation - Volume 6*. OSDI’04. San Francisco, CA: USENIX Association, 2004, S. 137–150. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1251254.1251264>.
- [10] Jeffrey Dean und Sanjay Ghemawat. „MapReduce: A Flexible Data Processing Tool“. In: *Commun. ACM* 53.1 (Jan. 2010), S. 72–77. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/1629175.1629198. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1629175.1629198>.
- [11] Apache Software Foundation. *MapReduce Tutorial*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-mapreduce-client/hadoop-mapreduce-client-core/MapReduceTutorial.html> (besucht am 02.01.2018).

- [12] Kyong-Ha Lee u. a. „Parallel Data Processing with MapReduce: A Survey“. In: *SIGMOD Rec.* 40.4 (Jan. 2012), S. 11–20. ISSN: 0163-5808. DOI: 10.1145/2094114.2094118. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2094114.2094118>.
- [13] Vinod Kumar Vavilapalli u. a. „Apache Hadoop YARN: Yet Another Resource Negotiator“. In: *Proceedings of the 4th Annual Symposium on Cloud Computing. SOCC '13*. Santa Clara, California: ACM, 2013, 5:1–5:16. ISBN: 978-1-4503-2428-1. DOI: 10.1145/2523616.2523633. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2523616.2523633>.
- [14] Apache Software Foundation. *Apache Hadoop NextGen MapReduce (YARN)*. 29. Juni 2015. URL: <https://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/YARN.html> (besucht am 27.12.2017).
- [15] Apache Software Foundation. *yarn-default.xml*. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-common/yarn-default.xml> (besucht am 04.07.2018).
- [16] Apache Software Foundation. *The YARN Timeline Server*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/TimelineServer.html> (besucht am 27.01.2018).
- [17] Apache Software Foundation. *Hadoop Cluster Setup*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-project-dist/hadoop-common/ClusterSetup.html> (besucht am 10.07.2018).
- [18] Apache Software Foundation. *YARN Commands*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/YarnCommands.html> (besucht am 08.02.2018).
- [19] Apache Software Foundation. *ResourceManager REST API's*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/ResourceManagerRest.html> (besucht am 08.02.2018).
- [20] Apache Software Foundation. *NodeManager REST API's*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/NodeManagerRest.html> (besucht am 08.02.2018).
- [21] Apache Software Foundation. *HDFS Architecture*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-project-dist/hadoop-hdfs/HdfsDesign.html> (besucht am 27.12.2017).
- [22] Apache Software Foundation. *HDFS Users Guide*. 29. Juni 2015. URL: http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-project-dist/hadoop-hdfs/HdfsUserGuide.html#Secondary_NameNode (besucht am 27.03.2018).
- [23] K. Shvachko u. a. „The Hadoop Distributed File System“. In: *2010 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies (MSST)*. Mai 2010, S. 1–10. DOI: 10.1109/MSST.2010.5496972.
- [24] Apache Software Foundation. *hdfs-default.xml*. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-project-dist/hadoop-hdfs/hdfs-default.xml> (besucht am 04.07.2018).
- [25] Apache Software Foundation. *Hadoop: Capacity Scheduler*. 29. Juni 2015. URL: <http://hadoop.apache.org/docs/r2.7.1/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/CapacityScheduler.html> (besucht am 21.01.2018).

- [26] Bo Zhang u. a. „Self-Balancing Job Parallelism and Throughput in Hadoop“. In: *16th IFIP WG 6.1 International Conference on Distributed Applications and Interoperable Systems (DAIS)*. Hrsg. von Márk Jelasity und Evangelia Kalyvianaki. Bd. LNCS-9687. Distributed Applications and Interoperable Systems. Heraklion, Crete, Greece: Springer, Juni 2016, S. 129–143. DOI: 10.1007/978-3-319-39577-7_11. URL: <https://hal.inria.fr/hal-01294834>.
- [27] Rudolph Emil Kálmán. „A new approach to linear filtering and prediction problems“. In: *Journal of basic Engineering* 82.1 (1960), S. 35–45.
- [28] Reiner Marchthaler und Sebastian Dingler. *Kalman-Filter*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 9783658167271.
- [29] Urs Strukov. „Anwendung des Kalman-Filters zur Komplexitätsreduktion im Controlling“. Diss. 2001.
- [30] Phil Kim. *Kalman-Filter für Einsteiger*. 1. Auflage. Wrocław: Amazon Fulfillment Poland Sp. z o.o, 2016. ISBN: 9781502723789.
- [31] Dan Simon. *Optimal state estimation*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006. ISBN: 9780471708582.
- [32] Lakhdar Aggoun und Robert J. Elliott. *Measure theory and filtering*. 1. publ. Cambridge series in statistical and probabilistic mathematics. Cambridge u.a.: Cambridge Univ. Press, 2004. ISBN: 9780521838030.
- [33] Filip Krikava. *Architecture*. 23. Jan. 2017. URL: <https://github.com/Spirals-Team/hadoop-benchmark/blob/b32711e3a724e7183e4f52ba76e34f2e587a523a/README.md> (besucht am 22.01.2018).
- [34] Docker Inc. *Get started with Docker Machine and a local VM*. URL: <https://docs.docker.com/machine/get-started/> (besucht am 19.05.2018).
- [35] Docker Inc. *Docker development best practices*. URL: <https://docs.docker.com/develop/dev-best-practices/> (besucht am 04.07.2018).
- [36] Benedikt Eberhardinger u. a. *Case Study: Adaptive Test Automation for Testing an Adaptive Hadoop Resource Manager*. Institute for Software & Systems Engineering, University of Augsburg, Apr. 2018.
- [37] Ron Petrusha, olprod und Saisang Cai. *Random Class*. URL: <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/api/system.random?view=netframework-4.7.2> (besucht am 13.07.2018).
- [38] Ron Petrusha, olprod und Saisang Cai. *Benutzerdefinierte Formatzeichenfolgen für Datum und Uhrzeit*. 30. März 2017. URL: <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/standard/base-types/custom-date-and-time-format-strings> (besucht am 10.07.2018).
- [39] Holger Schwichtenberg. *Kommentar: .NET Core 2.0 kann zwar mehr, aber es gibt immer noch gravierende Lücken*. 16. Aug. 2017. URL: <https://heise.de/-3803583> (besucht am 12.07.2018).
- [40] S. Huang u. a. „The HiBench benchmark suite: Characterization of the MapReduce-based data analysis“. In: *2010 IEEE 26th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW 2010)*. März 2010, S. 41–51. DOI: 10.1109/ICDEW.2010.5452747.

- [41] Yanpei Chen, Sara Alspaugh und Randy Katz. „Interactive Analytical Processing in Big Data Systems: A Cross-industry Study of MapReduce Workloads“. In: *Proc. VLDB Endow.* 5.12 (Aug. 2012), S. 1802–1813. ISSN: 2150-8097. DOI: 10.14778/2367502.2367519. URL: <http://dx.doi.org/10.14778/2367502.2367519>.
- [42] Yanpei Chen; Sara Alspaugh; Archana Ganapathi; Rean Griffith; Randy Katz. *SWIM Wiki: Home*. 12. Juni 2016. URL: <https://github.com/SWIMProjectUCB/SWIM/wiki> (besucht am 10.03.2018).
- [43] Bo Zhang. *Tutorial*. 10. März 2017. URL: <https://github.com/Spirals-Team/hadoop-benchmark/wiki/Tutorial> (besucht am 21.11.2017).
- [44] Thomas Graves. *GraySort and MinuteSort at Yahoo on Hadoop 0.23*. 2013. URL: <http://sortbenchmark.org/Yahoo2013Sort.pdf>.
- [45] BARC GmbH. *Transactional Data is the Most Commonly Used Data Type in Hadoop*. URL: <https://bi-survey.com/hadoop-data-types> (besucht am 11.04.2018).
- [46] Kai Ren u. a. „Hadoop’s Adolescence: An Analysis of Hadoop Usage in Scientific Workloads“. In: *Proc. VLDB Endow.* 6.10 (Aug. 2013), S. 853–864. ISSN: 2150-8097. DOI: 10.14778/2536206.2536213. URL: <http://dx.doi.org/10.14778/2536206.2536213>.
- [47] Ralf Korn. *Monte Carlo methods and models in finance and insurance*. Hrsg. von Elke Korn und Gerald Kroisandt. Chapman & Hall/CRC financial mathematics series. A Chapman & Hall book. Boca Raton [u.a.]: CRC Press, 2010, : graph. Darst. ISBN: 9781420076189.
- [48] Christiane Lemieux. *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling*. 1. Aufl. New York, NY: Springer-Verlag New York, 2009. ISBN: 9780387781655.
- [49] Solomon W. Golomb. *Polyominoes*. Rev. and expanded 2. ed. Princeton science library. Princeton, N. J.: Princeton Univ. Press, 1995. ISBN: 9780691024448.
- [50] R. A. DeMillo, R. J. Lipton und F. G. Sayward. „Hints on Test Data Selection: Help for the Practicing Programmer“. In: *Computer* 11.4 (Apr. 1978), S. 34–41. ISSN: 0018-9162. DOI: 10.1109/C-M.1978.218136.
- [51] R. G. Hamlet. „Testing Programs with the Aid of a Compiler“. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-3.4 (Juli 1977), S. 279–290. ISSN: 0098-5589. DOI: 10.1109/TSE.1977.231145.
- [52] Y. Jia und M. Harman. „An Analysis and Survey of the Development of Mutation Testing“. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 37.5 (Sep. 2011), S. 649–678. ISSN: 0098-5589. DOI: 10.1109/TSE.2010.62.
- [53] Alex Groce u. a. „An Extensible, Regular-Expression-Based Tool for Multi-Language Mutant Generation“. In: (Mai 2018).
- [54] Henry Coles u. a. „PIT: A Practical Mutation Testing Tool for Java (Demo)“. In: *Proceedings of the 25th International Symposium on Software Testing and Analysis*. ISSSTA 2016. Saarbrücken, Germany: ACM, 2016, S. 449–452. ISBN: 978-1-4503-4390-9. DOI: 10.1145/2931037.2948707. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2931037.2948707>.
- [55] L. Madeyski und N. Radyk. „Judy - a mutation testing tool for java“. In: *IET Software* 4.1 (Feb. 2010), S. 32–42. ISSN: 1751-8806. DOI: 10.1049/iet-sen.2008.0038.

-
- [56] Y. Jia und M. Harman. „MILU: A Customizable, Runtime-Optimized Higher Order Mutation Testing Tool for the Full C Language“. In: *Testing: Academic Industrial Conference - Practice and Research Techniques (taic part 2008)*. Aug. 2008, S. 94–98. DOI: 10.1109/TAIC-PART.2008.18.
 - [57] Charlie Poole und Rob Prouse. *universalmutator/genmutants.py*. 26. Mai 2018. URL: <https://github.com/agroce/universalmutator/blob/R0.8.13/universalmutator/genmutants.py> (besucht am 09.06.2018).

A. CLI-Befehle von Hadoop

Für jede der vier relevanten YARN-Komponenten können die Daten jeweils als Liste oder als ausführlicher Report ausgegeben werden. Im Folgenden sind beispielhaft die dafür notwendigen Befehle für Anwendungen aufgelistet, für Attempts, Container und Nodes sind analoge Befehle verfügbar. Neben den Monitoring-Befehlen sind auch einige weitere für diese Arbeit relevante Befehle mit ihren Ausgaben aufgelistet. Die Ausgaben zu den Befehlen sind hier zudem auf das wesentliche gekürzt, u. A. da Hadoop bei einigen Befehlen ausgibt, über welche Services (in Listing A.1 z. B. TLS, RM und *Application History Server*) die Daten ermittelt werden. Weiterführende Informationen zu den hier aufgeführten Befehlen sowie die vollständige Befehlsreferenz sind in der Dokumentation von Hadoop in [18] zu finden.

Listing A.1: CLI-Ausgabe der Anwendungsliste. Anwendungen können mithilfe der Optionen `--appTypes` und `--appStates` gefiltert werden.

```

1 $ yarn application --list --appStates ALL
2 18/02/08 15:37:51 INFO impl.TimelineClientImpl: Timeline service
   address: http://0.0.0.0:8188/ws/v1/timeline/
3 18/02/08 15:37:51 INFO client.RMProxy: Connecting to ResourceManager
   at controller/10.0.0.3:8032
4 18/02/08 15:37:51 INFO client.AHSPProxy: Connecting to Application
   History server at /0.0.0.0:10200
5 Total number of applications (application-types: [] and states: [NEW,
   NEW_SAVING, SUBMITTED, ACCEPTED, RUNNING, FINISHED, FAILED, KILLED
   ]):1
6 Application-Id    Application-Name    Application-Type    User    Queue
   State    Final-State Progress    Tracking-URL
7 application_1518100641776_0001    QuasiMonteCarlo    MAPREDUCE    root
   default    FINISHED    SUCCEEDED    100%    http://controller:19888/
   jobhistory/job/job_1518100641776_0001

```

Listing A.2: CLI-Ausgabe des Reports einer Anwendung

```

1 $ yarn application --status application_1518100641776_0001
2 ...
3 Application Report :
4   Application-Id : application_1518100641776_0001
5   Application-Name : QuasiMonteCarlo
6   Application-Type : MAPREDUCE
7   User : root
8   Queue : default
9   Start-Time : 1518103712160
10  Finish-Time : 1518103799743

```

```

11   Progress : 100%
12   State : FINISHED
13   Final-State : SUCCEEDED
14   Tracking-URL : http://controller:19888/jobhistory/job/
        job_1518100641776_0001
15   RPC Port : 41309
16   AM Host : compute-1
17   Aggregate Resource Allocation : 1075936 MB-seconds, 942 vcore-
        seconds
18   Diagnostics :

```

Listing A.3: Starten einer Anwendung in Hadoop-Benchmark. Hier mit dem Mapreduce Example pi und dem Abbruch der Anwendung durch den in Listing A.4 gezeigten Befehl. Die Anwendungs-ID `application_1520342317799_0002` ist hier in Zeile 13 enthalten.

```

1  $ hadoop-benchmark/benchmarks/hadoop-mapreduce-examples/run.sh pi 20
    1000
2  Number of Maps = 20
3  Samples per Map = 1000
4  Wrote input for Map #0
5  ...
6  Starting Job
7  18/03/14 13:06:26 INFO impl.TimelineClientImpl: Timeline service
    address: http://0.0.0.0:8188/ws/v1/timeline/
8  18/03/14 13:06:27 INFO client.RMPProxy: Connecting to ResourceManager
    at controller/10.0.0.3:8032
9  18/03/14 13:06:27 INFO client.AHSPProxy: Connecting to Application
    History server at /0.0.0.0:10200
10 18/03/14 13:06:27 INFO input.FileInputFormat: Total input paths to
    process : 20
11 18/03/14 13:06:27 INFO mapreduce.JobSubmitter: number of splits:20
12 18/03/14 13:06:27 INFO mapreduce.JobSubmitter: Submitting tokens for
    job: job_1520342317799_0002
13 18/03/14 13:06:28 INFO impl.YarnClientImpl: Submitted application
    application_1520342317799_0002
14 18/03/14 13:06:28 INFO mapreduce.Job: The url to track the job: http
    ://controller:8088/proxy/application_1520342317799_0002/
15 18/03/14 13:06:28 INFO mapreduce.Job: Running job:
    job_1520342317799_0002
16 18/03/14 13:06:34 INFO mapreduce.Job: Job job_1520342317799_0002
    running in uber mode : false
17 18/03/14 13:06:34 INFO mapreduce.Job:  map 0% reduce 0%
18 18/03/14 13:06:58 INFO mapreduce.Job:  map 20% reduce 0%
19 18/03/14 13:06:59 INFO mapreduce.Job:  map 60% reduce 0%
20 18/03/14 13:07:03 INFO mapreduce.Job:  map 0% reduce 0%
21 18/03/14 13:07:03 INFO mapreduce.Job: Job job_1520342317799_0002
    failed with state KILLED due to: Application killed by user.

```

```
22 18/03/14 13:07:03 INFO mapreduce.Job: Counters: 0
23 Job Finished in 37.53 seconds
```

Listing A.4: Vorzeitiges Beenden einer Anwendung. Hier wird die in Listing A.3 gestartete Anwendung vorzeitig beendet.

```
1 $ yarn application -kill application_1520342317799_0002
2 ...
3 Killing application application_1520342317799_0002
4 18/03/14 13:07:02 INFO impl.YarnClientImpl: Killed application
   application_1520342317799_0002
```

B. REST-API von Hadoop

Wie bei der Ausgabe der Daten der YARN-Komponenten mithilfe der CLI können auch bei der Ausgabe mithilfe der REST-API die Daten als Liste oder als einzelner Report ausgegeben werden. Der Unterschied zur CLI liegt jedoch darin, dass in Listenform und als einzelner Report immer die vollständigen Objekte der Komponenten zurückgegeben werden. Neben der hier gezeigten und auch in der Fallstudie genutzten Ausgabe im JSON-Format unterstützt Hadoop auch eine Ausgabe im XML-Format. Im Folgenden sind daher beispielhaft die Ausgaben im JSON-Format für die Anwendungsliste vom RM und für Ausführungen vom TLS aufgeführt. Im Rahmen dieser Masterarbeit sind die Rückgaben für Listen von Anwendungen, Attempts, Container und der Nodes vom RM und bzw. NM (Container) sowie des TLS (Attempts und Container) relevant. Weitere Informationen zur REST-API sowie hier nicht gezeigte Pfade für die YARN-Komponenten sind in der Dokumentation in [16, 19, 20] zu finden.

Listing B.1: REST-Ausgabe aller Anwendungen vom RM. Die Liste kann mithilfe verschiedener Query-Parameter gefiltert werden.

URL: `http://addr:port/ws/v1/cluster/apps`

```
1 {
2   "apps": {
3     "app": [
4       {
5         "id": "application_1518429920717_0001",
6         "user": "root",
7         "name": "QuasiMonteCarlo",
8         "queue": "default",
9         "state": "FINISHED",
10        "finalStatus": "SUCCEEDED",
11        "progress": 100,
12        "trackingUI": "History",
13        "trackingUrl": "http://controller:8088/proxy/
14          application_1518429920717_0001/",
15        "diagnostics": "",
16        "clusterId": 1518429920717,
17        "applicationType": "MAPREDUCE",
18        "applicationTags": "",
19        "startedTime": 1518430260179,
20        "finishedTime": 1518430404123,
21        "elapsedTime": 143944,
22        "amContainerLogs": "http://compute-2:8042/node/containerlogs/
23          container_1518429920717_0001_01_000001/root",
24        "amHostHttpAddress": "compute-2:8042",
```

```
23     "allocatedMB": -1,
24     "allocatedVCores": -1,
25     "runningContainers": -1,
26     "memorySeconds": 1756786,
27     "vcoreSeconds": 1546,
28     "preemptedResourceMB": 0,
29     "preemptedResourceVCores": 0,
30     "numNonAMContainerPreempted": 0,
31     "numAMContainerPreempted": 0
32   }
33 ]
34 }
35 }
```

Listing B.2: REST-Ausgabe aller Ausführungen einer Anwendung vom TLS.

URL: `http://addr:port/ws/v1/applicationhistory/apps/{appid}/appattempts`

```
1 {
2   "appAttempt": [
3     {
4       "appAttemptId": "appattempt_1518429920717_0001_000001",
5       "host": "compute-2",
6       "rpcPort": 46481,
7       "trackingUrl": "http://controller:8088/proxy/
8         application_1518429920717_0001/",
9       "originalTrackingUrl": "http://controller:19888/jobhistory/job/
10         job_1518429920717_0001",
11       "diagnosticsInfo": "",
12       "appAttemptState": "FINISHED",
13       "amContainerId": "container_1518429920717_0001_01_000001"
14     }
15   ]
16 }
```

C. Benötigte Befehle des Setup-Scriptes

Das Setupscript dient einerseits zur Trennung des genutzten **HostModes**, aber auch zur Vereinfachung der benötigten Befehle zur Steuerung des Clusters (vgl. Abschnitt 4.4). Zur Nutzung der implementierten Connectoren muss das genutzte Setupscript mindestens folgende Befehle beinhalten:

Listing C.1: Benötigte Befehle eines Setupscriptes. Das Setupscript für den **Multihost**-Mode bietet zum Teil andere Befehle an, besitzt jedoch entsprechende Befehle zur vollständigen Kompatibilität.

```
1  hadoop start [node-id]    starting hadoop or the given node
2  hadoop stop [node-id]    stopping hadoop or the given node
3  hadoop restart [node]    restarts hadoop or the given node
4  hadoop destroy           destroys hadoop
5  hadoop info [id] [form]  list running containers or node container
                             details
6                               and can use --format string
7
8  net start <node-id>      enables networking interfaces on the given
                             node
9  net stop <node-id>       disables networking interfaces on the given
                             node
10
11 cmd <cmd>                executes the given command on hadoop
                             controller
12 hdfs <cmd>                executes the hdfs command and prints the exit
                             code
13 marp                     Gets the current MARP value from hadoop config
```

D. Ausgabeformat des Programmlogs

Die in Abschnitt 3.3.3 und u. A. in Abschnitt 6.1.4 beschriebenen Ausgaben werden im nachfolgend dargestellten Format gespeichert. Es handelt sich hierbei um den gekürzten Programmlog der Ausführung des Testfalls #1 (vgl. Anhang E).

Listing D.1: Ausgaben einer Simulation im Programmlog (gekürzt)

```

1 Starting Case Study test
2 Parameter:
3   benchmarkSeed=      0x0AB4FEDD (179633885)
4   faultProbability= 0,3
5   hostsCount=         1
6   clientCount=        2
7   stepCount=          5
8   isMutated=          False
9 Start cluster on 1 hosts (mutated: False)
10 Is cluster started: True
11 Setting up test case
12 ===== START =====
13 Starting Simulation test
14 Base benchmark seed: 179633885
15 Min Step time:       00:00:25
16 Step count:         5
17 Fault probability:   0,3
18 Fault repair prob.: 0,3
19 Inputs precreated:  False
20 Host mode:          Multihost
21 Hosts count:        1
22 Node base count:    4
23 Full node count:    4
24 Setup script path:   ~/hadoop-benchmark/multihost.sh -q
25 Controller url:      http://localhost:8088
26 Simulating Benchmarks for Client 1 with Seed 179633886:
27 Step 0: dfsiowrite
28 Step 1: dfsiowrite
29 Step 2: dfsioread
30 Step 3: dfsioread
31 Step 4: dfsioread
32 Simulating Benchmarks for Client 2 with Seed 179633887:
33 Step 0: randomwriter
34 Step 1: randomwriter
35 Step 2: randomwriter
36 Step 3: pi
37 Step 4: pi
38 ===== Step: 0 =====

```

```

39 Fault NodeConnectionErrorFault@compute-1
40 Activation probability: 0,94 < 0,536382840264767
41 Fault NodeDeadFault@compute-1
42 Activation probability: 0,94 < 0,0263571413356611
43 Fault NodeConnectionErrorFault@compute-2
44 Activation probability: 0,94 < 0,0658538276636292
45 Fault NodeDeadFault@compute-2
46 Activation probability: 0,94 < 0,405010061992803
47 Fault NodeConnectionErrorFault@compute-3
48 Activation probability: 0,94 < 0,662199801608082
49 Fault NodeDeadFault@compute-3
50 Activation probability: 0,94 < 0,666254943546958
51 Fault NodeConnectionErrorFault@compute-4
52 Activation probability: 0,94 < 0,194108738188682
53 Fault NodeDeadFault@compute-4
54 Activation probability: 0,94 < 0,763726766111202
55 Selected Benchmark client1: dfsiowrite
56 Selected Benchmark client2: randomwriter
57 Checking SuT constraints.
58 Checking test constraints
59   YARN component not valid: Constraint 0 in Controller
60 Step Duration: 00:00:42.5186656
61 === Controller ===
62 MARP Value on start: 0,1
63 MARP value on end:   0,1
64 === Node compute-1:45454 ===
65     State:          RUNNING
66     IsActive:       True
67     IsConnected:    True
68     Container Cnt:  4
69     Mem used/free:  4096/4096 (0,500)
70     CPU used/free:  4/4 (0,500)
71     Health Report:
72 === Node compute-2:45454 ===
73     State:          RUNNING
74     IsActive:       True
75     IsConnected:    True
76     Container Cnt:  8
77     Mem used/free:  8192/0 (1,000)
78     CPU used/free:  8/0 (1,000)
79     Health Report:
80 === Node compute-3:45454 ===
81     State:          RUNNING
82     IsActive:       True
83     IsConnected:    True
84     Container Cnt:  2
85     Mem used/free:  4096/4096 (0,500)
86     CPU used/free:  2/6 (0,250)

```



```

87     Health Report:
88 === Node compute-4:45454 ===
89     State:          RUNNING
90     IsActive:       True
91     IsConnected:    True
92     Container Cnt:  0
93     Mem used/free:  0/8192 (0,000)
94     CPU used/free:  0/8 (0,000)
95     Health Report:
96 === Client client1 ===
97     Current executing bench:  dfsiowrite
98     Current executing app id: application_1529401644907_0001
99     === App application_1529401644907_0001 ===
100     Name:           hadoop-mapreduce-client-jobclient-2.7.1-tests.jar
101     State:          RUNNING
102     FinalStatus:    UNDEFINED
103     IsKillable:     True
104     AM Host:        compute-3:45454 (RUNNING)
105     Diagnostics:
106     === Attempt appattempt_1529401644907_0001_000001 ===
107     State:          None
108     AM Container:   container_1529401644907_0001_01_000001
109     AM Host:        compute-3:45454 (RUNNING)
110     Cont. Count:    13
111     Detected Cnt:   13
112     Diagnostics:
113 === Client client2 ===
114     Current executing bench:  randomwriter
115     Current executing app id: application_1529401644907_0002
116     === App application_1529401644907_0002 ===
117     Name:           random-writer
118     State:          RUNNING
119     FinalStatus:    UNDEFINED
120     IsKillable:     True
121     AM Host:        compute-3:45454 (RUNNING)
122     Diagnostics:
123     === Attempt appattempt_1529401644907_0002_000001 ===
124     State:          FINISHED
125     AM Container:   container_1529401644907_0002_01_000001
126     AM Host:        compute-3:45454 (RUNNING)
127     Cont. Count:    2
128     Detected Cnt:   2
129     Diagnostics:
130 ...
131 ===== Step: 2 =====
132 ...
133 Fault NodeConnectionErrorFault@compute-3
134 Activation probability: 0,8875 < 0,799780692346292

```

```
135 Fault NodeDeadFault@compute-3
136 Activation probability: 0,8875 < 0,962228187807942
137 ...
138 Stop node compute-3
139 Selected Benchmark client1: dfsioread
140 Selected Benchmark client2: randomwriter
141 Checking SuT constraints.
142 Checking test constraints
143   YARN component not valid: Constraint 0 in Controller
144 Step Duration: 00:00:42.7485612
145 ...
146 ===== Finish =====
147 Final status of the cluster:
148 ...
149 Finishing test.
150 Simulation Duration: 00:02:44.3497896
151 Successfull Steps:      5
152 Activated Faults:      5/40
153 Repaired Faults:       3
154 Last detected MARP:    0,1
155 Executed apps:         4
156 Succeeded apps:        3
157 Failed apps:           1
158 Killed apps:           0
159 Executed attempts:     5
160 Detected containers:   36
161 Checked Constraints:    270 SuT / 261 Test
162 Failed Constraints:     3 SuT / 6 Test
163 Killing running apps.
164 Stop cluster
165 Is cluster stopped: True
```

E. Übersicht der ausgeführten Tests

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die für diese Fallstudie ausgeführten Tests. Die Auswahl der Konfigurationen der Tests ist in Abschnitt 6.3 beschrieben.

Die Spalte *Mutanten* gibt an, welche der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Mutanten in der Selfbalancing-Komponente genutzt wurden. In den Spalten *Ausgeführte Testfälle* und *Dauer* ist angegeben, wie viele Testfälle bzw. Simulations-Schritte vollständig und erfolgreich ausgeführt wurden, bzw. wie lang die jeweiligen Simulationen in Minuten und Sekunden gedauert haben. Wenn nicht alle möglichen Testfälle ausgeführt wurden, war im darauf folgenden Testfall eine Rekonfiguration des Clusters nicht mehr möglich und die Simulation wurde, wie in Abschnitt 4.2.9 beschrieben, abgebrochen.

Die Nummerierung der Konfigurationen bzw. Ausführungen erfolgte basierend auf den grundlegenden Testkonfigurationen bestehend aus Seed, Anzahl der Hosts, Clients und ausgeführten Testfällen sowie der Angabe, ob ein Mutationsszenario verwendet wurde. Bei mehrmals ausgeführten Testkonfigurationen ist der Konfiguration eine entsprechende Ziffer angehängt, um die jeweilige Ausführung zu Kennzeichnen. Eine Besonderheit bildet hierbei die Testkonfiguration 10 mit insgesamt 6 Ausführungen, da diese Konfiguration mit verschiedenen Mutanten durchgeführt wurde.

#	Seed	Hosts	Clients	Testfälle	Mutanten	Ausgeführte Testfälle	Dauer
1.1	0xAB4FEDD	1	2	5	keine	5	2:44
1.2						5	2:56
2	0xAB4FEDD	1	2	5	1,2,3,4	5	2:34
3	0xAB4FEDD	1	4	5	keine	5	5:52
4	0xAB4FEDD	1	4	5	1,2,3,4	2	3:13
6	0xAB4FEDD	1	4	10	1,2,3,4	2	3:14
5.1	0xAB4FEDD	1	4	10	keine	2	3:35
5.2						2	3:23
7.1	0xAB4FEDD	2	2	5	keine	5	2:49
7.2						5	2:56
8	0xAB4FEDD	2	2	5	1,2,3,4	5	2:23
9.1	0xAB4FEDD	2	4	5	keine	5	07:13
9.2						5	4:49
10.1	0xAB4FEDD	2	4	5	1,2,3,4	5	7:42
10.2					1	5	6:17
10.3					2	5	6:04
10.4					3	5	6:37
10.5					3	5	6:21
10.6					4	5	6:26
11	0xAB4FEDD	2	4	10	keine	10	12:16
12	0xAB4FEDD	2	4	10	1,2,3,4	10	11:36
13	0xAB4FEDD	2	6	5	keine	5	8:02
14	0xAB4FEDD	2	6	5	1,2,3,4	5	6:24
15	0xAB4FEDD	2	6	10	keine	5	8:41
16	0xAB4FEDD	2	6	10	1,2,3,4	5	9:26
17	0x11399D3	1	2	5	keine	5	3:07
18	0x11399D3	1	2	5	1,2,3,4	5	3:02
19	0x11399D3	1	4	5	keine	5	5:25
20	0x11399D3	1	4	5	1,2,3,4	3	3:22
21	0x11399D3	1	4	10	keine	3	4:17
22	0x11399D3	1	4	10	1,2,3,4	3	2:50
23	0x11399D3	2	2	5	keine	5	4:25
24	0x11399D3	2	2	5	1,2,3,4	5	4:22
25	0x11399D3	2	4	5	keine	5	4:53
26	0x11399D3	2	4	5	1,2,3,4	5	5:47
27	0x11399D3	2	4	10	keine	10	10:30
28.1	0x11399D3	2	4	10	1,2,3,4	7	8:17
28.2						7	7:37
29	0x11399D3	2	6	5	keine	5	7:03
30	0x11399D3	2	6	5	1,2,3,4	5	6:02
31	0x11399D3	2	6	10	keine	7	10:21
31.1	0x11399D3	2	6	10	keine	7	10:41
31.2						7	10:21
32	0x11399D3	2	6	10	1,2,3,4	7	11:08

Tabelle E.1.: Übersicht der ausgeführten Testkonfigurationen