Praxis 2: Statische DHT

Fachgruppe Telekommunikationsnetze (TKN)

4. Dezember 2023

Formalitäten

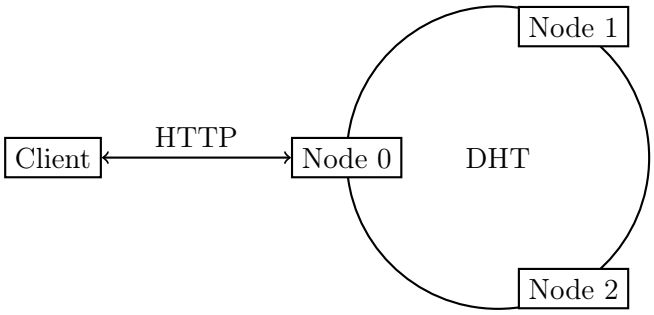
Diese Aufgabenstellung ist Teil der Portfolioprüfung. Beachten Sie für Ihre Abgaben unbedingt die entsprechenden Modalitäten (siehe Anhang A).

In dieser Abgabe erweitern wir unseren Webserver aus der letzten Aufgabenstellung. Dieser hat Resourcen bisher einfach im Speicher vorgehalten, dies wollen wir nun durch ein (statische) Distributed Hash Table (DHT)-Backend ersetzen (siehe **??**).

Eine DHT ist eine verteilte Datenstruktur die key-value-Tupel speichert. DHTs sind P2P Systeme und damit selbstorganisierend. Dadurch können Funktionen bereitgestellt werden die sich dynamisch skalieren lassen, ohne explizites oder zentrales Management. Im Detail wurden DHTs in der Vorlesung am Beispiel von Chord besprochen. Auf diesem Protokoll basiert auch diese Aufgabenstellung. Unsere DHT erlaubt Zugriff auf die gespeicherten Daten via HTTP, welches in der vorigen Aufgabenstellung implementiert wurde. Sie können also Ihre bisherige Implementierung weiter verwenden und erweitern. Sollten Sie die vorige Aufgabe nicht vollständig gelöst haben, stellen wir eine Vorlage bereit, die sie stattdessen verwenden können.

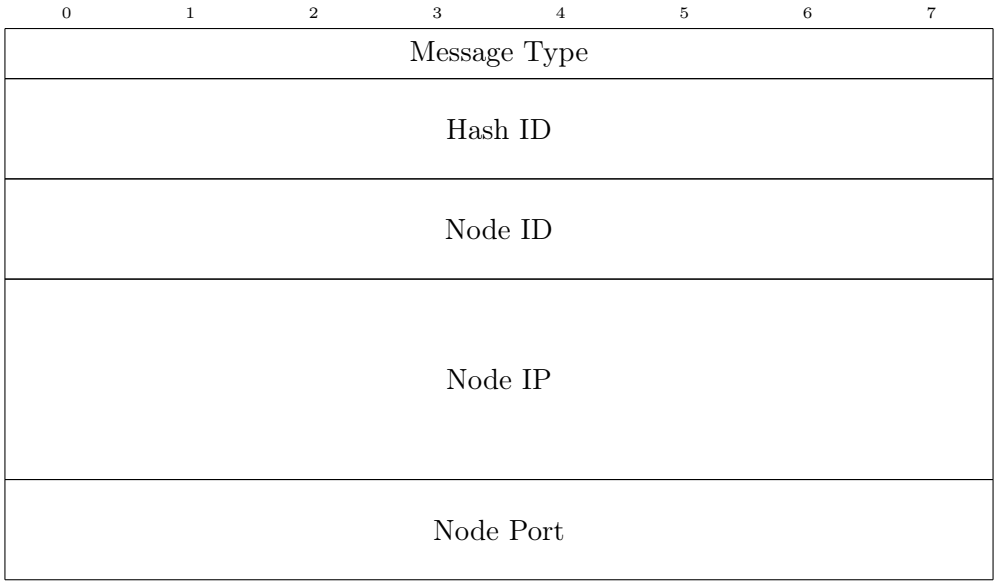
Diese DHT speichert die Resourcen des Webservers, entsprechend sind Keys Hashes der Pfade und Werte der jeweilige Inhalt. Im Detail kann die Aufgabenstellung jedoch alle relevanten Details vor und ist bei widersprüchlichen Definitionen für die Lösung zu beachten.

Wir beschränken uns in dieser Aufgabenstellung zunächst auf eine auf eine statische DHT. Die Struktur der DHT verändert sich also nicht, weder treten Nodes dem Netzwerk



bei, noch verlassen sie es. Die einzelnen Nodes bekommen Ihre jeweiligen Nachbarschaft beim Start übergeben.

Innerhalb der DHT kommunizieren die Nodes miteinander um zu herauszufinden, welche konkrete Node für eine angefragte Resource verantwortlich ist und verweisen den Client an diesen. Dafür verwenden Sie das Chord-Protokoll, welches hier via User Datagram Protocol (UDP) Nachrichten mit dem folgenden Format austauscht:



Der Message Type nimmt für die verschiedenen Nachrichtentypen verschiedene Werte an, und bestimmt so wie die weiteren Daten interpretiert werden. Beispielsweise entspricht 1 einem Reply. Details zu den konkreten Nachrichtentypen werden im Folgenden an den relevanten Stellen erläutert. Alle Werte werden stets in Network Byte Order kodiert.

1. Tests

Die im folgenden beschriebenen Tests dienen sowohl als Leitfaden zur Implementierung, als auch zur Bewertung. Beachten Sie hierzu insbesondere auch die Hinweise in Anhang B.

Jeder einzelne Test kann als Teilaufgabe verstanden werden. In Summe führen die Tests zu einer vollständigen Implementierung der Aufgabe. Teilweise werden spätere Tests den vorigen widersprechen, da sich die Aufgabenstellung im Verlauf weiter konkretisiert. Die Tests sind daher so geschrieben, dass diese auch die weitere Entwicklung Ihrer Lösung als korrekt akzeptieren. Für das Debugging Ihres Programms empfehlen wir zusätzlich zu einem Debugger (z.B. `gdb`) auch `wireshark` zu verwenden.

1.1. UDP Socket

Innerhalb der DHT tauschen die Peers Nachrichten aus, um deren Funktion bereitzustellen. Während HTTP auf TCP setzt um eine zuverlässige Verbindung zwischen zwei

Kommunikationspartnern herzustellen, verwendet die DHT UDP. UDP ist nicht verbindungsorientiert und erlaubt daher, einzelne Nachrichten (Datagramme) mit beliebigen Peers der DHT über einen Socket auszutauschen. Im Detail wird UDP im Verlauf der Vorlesung besprochen.

Um per UDP zu kommunizieren, soll Ihr Programm nun einen UDP-Socket öffnen und auf ankommende Daten warten. Dabei soll der gleiche Port sowohl für TCP, als auch UDP verwendet werden. Beispielsweise soll beim folgenden Aufruf Port 1234 sowohl für den TCP-Socket, als auch für den UPD-Socket verwendet werden:

```
#./build/webserver <IP> <Port>
./build/webserver 127.0.0.1 1234
```

Öffnen Sie zusätzlich zum TCP-Socket einen UDP-Socket auf dem gleichen Port.

1.2. Hashing

In einer DHT bestimmt der Hash der Daten die Node auf der diese gespeichert sind. Ein Hash ist ein aus einer beliebigen Datenmenge abgeleiteter Wert, der häufig verwendet wird ein Datum zu indentifizieren, oder diese auf Veränderungen zu testen. Typische Hashes haben eine Länge von 256 B, für unsere Zwecke ist ein deutlich kleinerer Namensraum von 16 bit ausreichend.

Da unsere DHT HTTP-Resourcen speichert, verwenden wir hierfür den Hash des Pfads der Resource. Diese beschreiben die Identität einer Resource, unabhängig von ihrem Inhalt. Konkret verwenden wir die ersten zwei Byte des SHA256 Hashs (Dies ist für `/hashhash` beispielsweise 29 380/`0x72c4`[1]). Um diesen zu berechnen bietet es sich an, OpenSSL zu verwenden. Diese Bibliothek ist auf quasi jedem Rechner vorhanden und implementiert diverse Crypto-Primitve, insbesondere auch Hash Funktionen. Anhang C beschreibt die Verwendung in mehr Detail.

Berechnen Sie den Hash der angefragten Resource bei jeder Anfrage.

Nun wollen wir unsere Implementierung so ändern, dass jede Node basierend auf diesem Hash entscheidet, ob sie für eine Resource verantwortlich ist, oder nicht. Wir erinnern uns, dass Nodes in Chord für alle Keys verantwortlich sind, die zwischen ihrer ID, und der ihres Nachfolgers liegen. Entsprechend müssen Nodes ihren Nachfolger kennen um dies entscheiden zu können. Um die zukünftige Implementierung zu vereinfachen, sollen Nodes auch ihren Vorgänger kennen. Diese „Nachbarschaftsbeschreibung“ soll jeder Node unserer statischen DHT beim Start via Umgebungsvariablen übergeben werden. Darüber hinaus soll ein dritter Kommandozeilenparameter einer Node ihre ID übergeben. Die folgenden Aufrufe beispielsweise starten eine DHT, die aus zwei Nodes besteht:

```
PRED_ID=49152 PRED_IP=127.0.0.1 PRED_PORT=2002 SUCC_ID=49152 SUCC_IP=127.0.0.1
    SUCC_PORT=2002 ./build/webserver 127.0.0.1 2001 16384
```

[1] `echo -n '/hashhash' | sha256sum | head -c4`

```
PRED_ID=16384 PRED_IP=127.0.0.1 PRED_PORT=2001 SUCC_ID=16384 SUCC_IP=127.0.0.1
    SUCC_PORT=2001 ./build/webserver 127.0.0.1 2002 49152
```

> **i** Da der Namensraum einer DHT einen Kreis bildet sind die beiden Nodes in einer DHT mit zwei Mitgliedern ihre jeweiligen Vorgänger *und* Nachfolger.

> **!** Entnehmen Sie den beim Aufruf übergebenen Umgebungsvariablen und Kommandozeilenparameter die Informationen über die Node selbst, sowie ihren Vorgänger und Nachfolger in der DHT.

In einer solchen, minimalen DHT bestehend aus zwei Nodes kann kann jede Node bestimmen, welche Node für ein angefragtes Datum verantwortlich ist: Wenn es sie selbst nicht ist, muss es die jeweils andere Node sein. Daher kann eine Node in diesem Fall Anfragen entweder selbst beantworten, oder auf die andere Node verweisen. HTTP sieht für solche Verweise Antworten mit Statuscodes 3XX vor, die das neue Ziel im `Location`-Header enthalten. Wir verwenden in diesem Fall `303: See Other`:

```
# curl -i localhost:2001/hashhash
HTTP/1.1 303 See Other
Location: http://127.0.0.1:2002/hashhash
Content-Length: 0
```

> **!** Beantworten Sie Anfragen wie bisher, wenn die angefragte Node für die Resource verantwortlich ist, andernfalls mit einer Weiterleitung.

> **i** HTTP-Weiterleitugen werden für verschiedene Zwecke eingesetzt, z.B. um sicherzustellen, dass Resourcen via `https` statt `http` angefragt werden. Clients folgen diesen Weiterleitungen typischerweise automatisch. `curl` hingegen tut dies nur, wenn das `-L`/`--location`-Flag gesetzt ist.

1.3. Senden eines Lookups

Im allgemeinen kann eine Node nicht direkt entscheiden, welche Node für ein Datum verantwortlich ist. In diesem Fall sendet sie eine `Lookup`-Anfrage in die DHT (d.h. ihren Nachfolger) um die verantwortliche Node zu erfahren. Diese Anfrage folgt dem oben beschriebenen Format, und enthält die folgenden Werte:

- Message Type: 0 (Lookup)
- Hash ID: Hash der angefragten Resource
- Node ID, IP, und Port: Beschreibung der anfragenden Node

> **!** Senden Sie ein `Lookup` an den Nachfolger, wenn die Node den Ort einer angefragten Resource nicht bestimmen kann.

Parallel zu diser Anfrage erwartet der Client natürlich eine Antwort. Um die Implementierung zu vereinfachen halten wir sie zustandslos: wir vertrösten den Client für den Moment, bis wir eine Antwort erhalten haben. Hierfür können wir eine `503: Service Unavailable`-Antwort mit einem `Retry-After`-Header senden:

```
# curl -i localhost:2002/path-with-unknown-hash
HTTP/1.1 503 Service Unavailable
Retry-After: 1
Content-Length: 0
```

Auf diese Weise müssen wir keine Verbindungen zu Clients offen halten und Antworten aus der DHT diesen zuordnen.

> **!** Beantworten Sie Anfragen mit einer `503`-Antwort und gesetztem `Retry-After`-Header, wenn die Node den Ort einer angefragten Resource nicht bestimmen kann.

1.4. Lookup Reply

Nun implementieren wir die Empfängerseite eines Lookups. Wir erweitern unsere Implementierung, sodass Sie Lookups beantwortet, wenn diese die Antwort kennt. Dafür überprüft die Node, ob sie selbst für den angefragten Pfad verantwortlich ist und sendet eine Antwort an den Anfragesteller, falls dies der Fall ist. Das Reply folgt dem eingangs beschriebenem Nachrichtenformat, mit den folgenden Werten:

- Message Type: 1 (Reply)
- Hash ID: ID des Vorgängers der antwortenden Node
- Node ID, IP, und Port: Beschreibung der verantwortlichen Node

> **!** Senden Sie ein `Reply` an die anfragende Node, wenn ein Lookup empfangen wird und die empfangende Node verantwortlich ist.

1.5. Weiterleiten eines Lookups

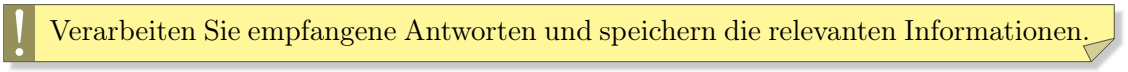
Wenn wir ein Lookup entfangen, das wir nicht beantworten können, muss die entsprechende Node „hinter“ uns in der DHT liegen. Entsprechend leiten wir dieses unverändert an unseren Nachfolger weiter.

> **!** Leiten Sie ein empfangenes `Lookup` an ihren Nachfolger weiter, wenn die Anfrage nicht beantwortet werden kann.

1.6. Ein komplettes Lookup

In den vorigen Tests haben Sie haben die einzelnen Aspekte eines Lookups implementiert: Senden, Weiterleiten und Beantworten. Nun muss ihre Implementierung lediglich Antworten verarbeiten, sich also die enthaltenen Informationen merken. Da unsere DHT

nicht produktiv eingesetzt können Sie annehmen, dass nicht allzu viele Anfragen parallel gestellt werden. Es genügt also hier, wenn Sie eine kleine Liste von 10 Antworten speichern, und die jeweils älteste verwerfen, wenn eine neue empfangen wird.



In einer DHT von mindestens drei Nodes sollte Ihre Implementierung nun in der Lage sein, den Ort von Resourcen zu bestimmen:

```
# curl -i localhost:2002/path-with-unknown-hash
HTTP/1.1 503 Service Unavailable
Retry-After: 1
Content-Length: 0

# curl -i localhost:2002/path-with-unknown-hash
HTTP/1.1 303 See Other
Location: http://127.0.0.1:2017/path-with-unknown-hash
Content-Length: 0

# curl -i localhost:2017/path-with-unknown-hash
HTTP/1.1 404 Not Found
Content-Length: 0
```

Beachten Sie bei der letzten Anfrage, dass `Not Found` sich auf die Existenz der Ressource bezieht. Mit den passenden Flags führt `curl` die wiederholte Anfrage, und das Folgen der Weiterleitung automatisch aus:

```
# curl -iL --retry 1 localhost:2002/path-with-unknown-hash
HTTP/1.1 503 Service Unavailable
Retry-After: 1
Content-Length: 0

Warning: Problem : HTTP error. Will retry in 1 seconds. 1 retries left.
HTTP/1.1 303 See Other
Location: http://127.0.0.1:2001/path-with-unknown-hash
Content-Length: 0

HTTP/1.1 404 Not Found
Content-Length: 0
```

1.7. Statische DHT

Herzlichen Glückwunsch! Ihr Code sollte nun eine statische DHT implementieren. Testen Sie das ganze nun mit mehreren Nodes und verschiedenen `GET`, `PUT`, und `DELETE` Anfragen. Denken Sie beim Starten der Nodes daran, die Umgebungsvaribalen entsprechend zu setzen! Dafür können Sie die folgenden Anfragen auf einen Pfad ausgeführt:

- `GET`: Erwartet `404: Not Found`
- `PUT`: Erwartet `201: Created`

- `GET`: Erwartet `200: Ok`
- `DELETE`: Erwartet `200: Ok/204: No Content`
- `GET`: Erwartet `404: Not Found`

Dieser Anfragen entsprechen dem letzten Test des ersten Aufgabenzettels. Allerdings wird jede Anfrage an eine andere Node der DHT gestellt. Durch die bisherigen Tests ist sichergestellt, dass die Anfragen trotzdem konsistent beantwortet werden.

A. Abgabeformalitäten

Die Aufgaben sollen von Ihnen in Gruppenarbeit mit jeweils *bis zu drei Kursteilnehmern gelöst* werden. Um die Verwaltung auf ISIS einfach zu halten muss *jedes Gruppenmitglied seine Abgabe* hochladen. Fügen Sie Ihrer Abgabe eine Datei `group.txt` hinzu, die Name und Matrikelnummer aller Gruppenmitglieder enthält. Dadurch bleibt die reguläre Gruppenarbeit bei unserem Plagiarismuscheck unbeachtet.

Ihre Abgaben laden Sie auf ISIS bis zur entsprechenden *Abgabefrist* hoch. Beachten Sie bei der Abgabe, dass die Abgabefrist fix ist und es *keine Ausnahmen für späte Abgaben* gibt. Planen Sie also einen angemessenen Puffer zur Frist hin ein um Eventualitäten, die Ihre Abgabe verzögern könnten, vorzubeugen. In Krankheitsfällen kann die Bearbeitungszeit angepasst werden, sofern diese ärztlich belegt sind.

Abgaben werden nur im `.tar.gz`-Format akzeptiert. Sie können ein entsprechendes Archiv erstellen, indem Sie das folgende Snippet an Ihre `CMakeLists` anhängen und im Build-Ordner `make package_source` ausführen:

```
# Packaging
set(CPACK_SOURCE_GENERATOR "TGZ")
set(CPACK_SOURCE_IGNORE_FILES ${CMAKE_BINARY_DIR} /\\..*$ .git .venv)
set(CPACK_VERBATIM_VARIABLES YES)
include(CPack)
```

B. Tests und Bewertung

Die einzelnen Tests finden Sie jeweils in der Vorgabe als `test/test_praxisX.py`. Diese können mit `pytest` ausgeführt werden:

```
pytest test # Alle tests ausführen
pytest test/test_praxisX.py # Nur die Tests für einen bestimmten Zettel
pytest test/test_praxis1.py -k test_listen # Limit auf einen bestimmten Test
```

Sollte `pytest` nicht auf Ihrem System installiert sein, können Sie dies vermutlich mit dem Paketmanager, beispielsweise `apt`, oder aber `pip`, installieren.

Ihre Abgaben werden anhand der Tests der Aufgabenstellung automatisiert bewertet. Beachten Sie, dass Ihre Implementierung sich nicht auf die verwendeten Werte (Node IDs, Ports, URIs, ...) verlassen sollte, diese können zur Bewertung abweichen. Darüber hinaus sollten Sie die Tests nicht verändern um sicherzustellen, dass die Semantik nicht unbeabsichtigt erweise verändert wird. Eine Ausnahme hierfür sind natürlich Updates der Tests, die wir gegebenenfalls ankündigen um eventuelle Fehler zu auszubessern.

Die Bewertung führen wir auf den Ubuntu 20.04 Systemen der EECS durch, welche auch für Sie sowohl vor Ort, als auch via SSH zugänglich sind. Daher können Sie Ihre Implementierung vor der Abgabe in der gleichen Umgebung testen. Wir empfehlen dies, um sicher zu gehen, dass es keine subtilen Unterschiede zwischen der Testumgebungung und Ihrer lokalen. Derartige Unterschiede, beispielsweise in den vorhandenen Bibliotheken, können im Zweifel auch abweichendes Verhalten der Tests zur Folge haben.

C. OpenSSL

Um OpenSSLzu verwenden muss Ihre Implementierung gegen die Bibliothek gelinkt werden. Dies ist im vorgegebenen Code schon der Fall, die relevanten Zeilen in der `CMakeLists.txt` sind:

```
find_package(OpenSSL REQUIRED)
target_link_libraries(webserver PRIVATE ${OPENSSL_LIBRARIES} -lm)
```

Die Funktionen um SHA Hashes zu berechnen sind im `openssl/sha.h`-Header zu finden und können wie folgt verwendet werden:

```
uint16_t hash(const char* str) {
    uint8_t digest[SHA256_DIGEST_LENGTH];
    SHA256((uint8_t *)str, strlen(str), digest);
    return htons(*((uint16_t *)digest)); // We only use the first two bytes here
}
```