



Bachelorarbeit im Studiengang B.Sc. Wirtschaftsinformatik

Realisierung einer bidirektionalen Chat-Anwendung auf Basis von HTML5 WebSockets mit Java und Angular 4 zum Einsatz im seminaristischen Kontext

Implementation of a bidirectional chat application utilizing HTML5 WebSockets in Java and Angular 4 for use in a seminaristic context

Andre Weinkötz

15. Februar 2018

Fakultät für Informatik und Mathematik
Hochschule München

Betreuer: Prof. Dr. Mandl

Abstract

Hier steht am Ende was genau eigentlich mit dem Unsinn hier erreicht werden soll.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1 Einleitung	5
2 Das WebSocket Protokoll	6
2.1 WebSocket-Frames	7
2.1.1 Header-Felder	7
2.1.2 Non-Control-Frames	9
2.1.3 Control-Frames	11
2.2 WebSocket Kommunikationsphasen	13
2.2.1 Verbindungsaufbau	14
2.2.2 Datentransfer	16
2.2.3 Verbindungsabbau	16
2.3 Alternative Verfahren	17
2.3.1 Polling	18
2.3.2 Long-Polling	18
2.3.3 Comet	19
2.3.4 Server-Sent Events	19
3 Die WebSocket-API	21
3.1 Elemente der W3C WebSocket-API	21
3.1.1 WebSocket Lebenszyklus	21
3.1.2 Event-Handling	22
3.1.3 Kommunikation	23
3.2 Die Java™ API for WebSocket (JSR-356)	24
3.2.1 Grundlagen	25
3.2.2 Kommunikation	28
3.2.3 En- und Decoding	30
3.2.4 Konfiguration und Session	32
3.2.5 Path-Mapping	36
4 Die Chat-Anwendung	40
4.1 Analyse der bestehenden Chat-Anwendung	41
4.1.1 Struktur des Projekts	41
4.1.2 Auswahl zu übernehmender Klassen	42
4.1.3 Funktionsweise	43
4.2 Anforderungen an WebSocket-Chat	45
4.2.1 Funktionale Anforderungen	46
4.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen	49
4.3 Entwurf des WebSocket-Chats	50

4.4	Implementierung und Test des WebSocket-Chats	50
5	Evaluation	50
5.1	Test-Umgebung	50
5.2	Probleme	50
5.3	Leistungsanalyse WebSocket-Chat	50
6	Zusammenfassung und Ausblick	50
6.1	Einsatzgebiete	50

1 Einleitung

Die Anforderungen an Webanwendungen haben sich in den vergangenen Jahren stark verändert. Mobile Geräte wie Smartphones oder Tablets ersetzen stationäre Systeme, Webanwendungen sollen zur Kollaboration eingesetzt werden und Buchungssysteme oder Finanzanwendungen verlangen die Bearbeitung tausender Anfragen mit minimaler Verzögerung. Das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) bietet hier keine zufriedenstellende Lösung. Um den Anforderungen an moderne Webanwendungen gerecht zu werden, spezifizierten das World Wide Web Consortium (W3C) und die Internet Engineering Taskforce (IETF) das WebSocket-Protokoll mit zugehöriger JavaScript-API.

Die Entwickler des WebSocket Protokolls machten es sich zur Aufgabe, einen Mechanismus zu schaffen, der es browserbasierten Anwendungen ermöglicht bidirektional zu kommunizieren ohne dabei auf mehrere HTTP Verbindungen zu öffnen [FM11]. Dabei sollte auf zusätzliche Methoden - wie beispielsweise den Einsatz von XMLHttpRequests, iframes oder long polling - verzichtet werden.

2 Das WebSocket Protokoll

Die Arbeit an der Spezifikation des WebSocket-Protokolls begann bereits 2009, als es von Google in Zusammenarbeit mit Apple, Microsoft und Mozilla im Rahmen ihrer Kooperation WHATWG¹ der Internet Engineering Task Force (IETF) vorgeschlagen wurde. Bis Mai 2010 wurden noch zahlreiche Verbesserungen hinzugefügt, bis es schließlich in Version 76 [Hic10] im August 2010 an die *BiDirectional or Server-Initiated HTTP* (HyBi) Task Force der IETF zur Weiterentwicklung übergeben wurde [Fet10]. Neben vielen anderen Fortschritten wurde das Protokoll um die Möglichkeit erweitert binäre Dateien auszutauschen, sowie Sicherheitslücken geschlossen, die in Verbindung mit Proxy-Servern entstehen konnten. Im Dezember 2010 wurde das WebSocket-Protokoll von der IETF zu dem Request for Comment (RFC) 6455 erklärt [FM11]. Dieser definiert auf über 70 Seiten neben den Kommunikationsphasen und verschiedenen Frames der WebSockets noch zahlreiche weitere technische Details und Definitionen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Grundlagen der Protokollspezifikation dargelegt werden.



Abbildung 2.1: WebSocket-Protokoll im ISO/OSI-Modell

Die Aufgabe des WebSocket-Protokolls ist die bidirektionale Kommunikation zwischen einer (Web-)Anwendung und einem WebSocket-Server. Dabei folgt das Protokoll dem Prinzip des minimalen *Framings* [FM11, S. 9-10]. Das bedeutet, dass Zusatzinformation zur Übermittlung von Nachrichten, wie z.B. Protokoll-Header, möglichst gering zu halten sind. Das Konzept sieht vor, dass das WebSocket-Protokoll direkt als Schicht auf das *Transmission Control Protocol* (TCP) aufsetzt und es neben HTTP in einer bereits bestehenden Infrastruktur eingesetzt werden kann. Dabei wird das Sicherheitsmodell der Same-Origin-Policy aus RFC 6454 sowie ein Adressierungs- und Bezeichnungsmechanismus hinzugefügt, durch welchen die Unterstützung mehrerer Dienste auf einem Port und verschiedener Hostnamen unter einer IP-Adresse sichergestellt wird. Des weiteren soll das aufgesetzte Framing den Paketierungsmechanismus des *Internet Protocols* (IP) imitieren, ohne die Länge eines Frames zu beschränken. Außerdem wird ein zusätzlicher *Closing-Handshake* definiert, der auch bei der Verwendung von Proxy-Servern und anderen *Vermittlern*, wie z.B. Firewalls, zwischen den beiden Endpunkten durchgeführt werden kann. Obwohl das

¹Web Hypertext Application Technology Working Group unter: www.whatwg.org

WebSocket-Protokoll die für HTTP(S) vorgesehenen Ports 80 und 443 verwendet, verbindet die beiden Protokolle lediglich der *HTTP Upgrade*-Mechanismus. Dieser kommt zum Einsatz, wenn eine WebSocket-Verbindungsanfrage von einem HTTP-Server interpretiert wird. Soll die WebSocket-Verbindung verschlüsselt sein, so kann dies durch die Verwendung eines *Transport Layer Security* (TLS) Tunnels erreicht werden.

2.1 WebSocket-Frames

Die Spezifikation eines WebSocket-Frames sieht eine Zweiteilung vor, wie sie bei Protokollnachrichten üblicherweise vorgenommen wird. Ein WebSocket-Frame besteht demnach aus einem Header Bereich der Kontrolldaten enthält, sowie dem Payload, welcher die Nutzdaten beinhaltet. Anhand des Aufbaus ist leicht erkennbar, dass die Kommunikation über WebSockets mit

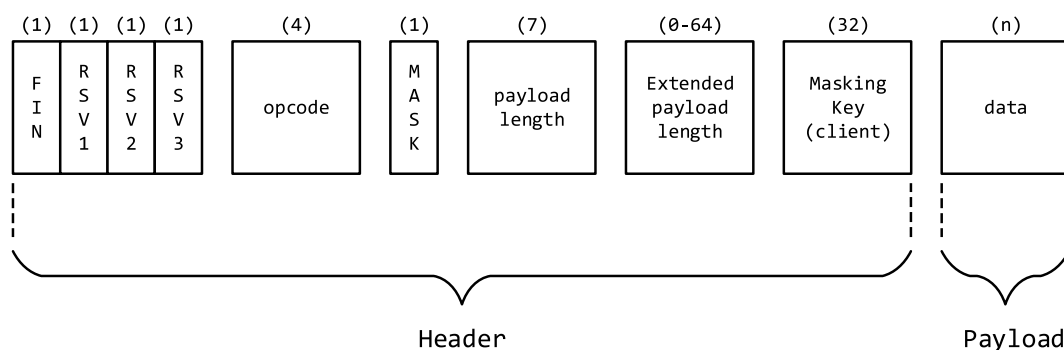


Abbildung 2.2: Vereinfachte Darstellung eines WebSocket Frames

deutlich geringeren Paketgrößen arbeiten kann als HTTP. Eine Nachricht mit einfacher Längenangabe, die von Server zu Client geschickt wird, erzeugt durch ihren Header lediglich einen Overhead von zwei Byte. Da WebSocket-Frames auf umgekehrtem Weg zusätzlich noch maskiert werden müssen, entspricht die minimale Länge eines clientseitigen Frames sechs Byte. Im Vergleich dazu beträgt der Overhead bei einer einfachen GET-Anfrage über HTTP/1.1 beim Aufruf des Hosts unter cs.hm.edu 35 Byte. Die Angabe des Hostnamens in HTTP/1.1 ist obligatorisch und trägt maßgeblich zur Größe des HTTP-Frames bei [Lea+99, S. 128].

2.1.1 Header-Felder

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Felder sowie deren jeweilige Aufgabe detailliert erläutert:

FIN (1 Bit) Das FIN-Flag gibt an, ob es sich bei dem empfangenen Frame um ein Fragment handelt. Kann der Payload nicht auf einmal übertragen werden, so wird die Übertragung über mehrere Frames gesteuert. Das FIN-Flag aller unvollständigen Fragmente weist den Wert 0 auf, wohingegen das finale Fragment mit einer 1 gekennzeichnet ist. Wenn alle Nutzdaten mit einem einzigen Frame übertragen werden können, so trägt dessen FIN-Flag ebenfalls den Wert 1. Eine Fragmentierung ist in den meisten Fällen nicht erforderlich. Liegen Daten jedoch zum Zeitpunkt des Versendens nicht vollständig vor oder können

nicht zwischengespeichert werden, so ermöglicht die Fragmentierung der Nachrichten eine teilweise Übertragung.

RSV1, RSV2, RSV3 (jeweils 1 Bit) Diese Flags sind für zukünftige Implementierung reserviert und finden aktuell keine standardisierte Anwendung. Die Ausnahme stellt das RSV1-Bit dar, welches verwendet wird um anzuzeigen, ob eine Nachricht komprimiert wurde oder nicht [Int11]. Daher tragen sie meist den Wert 0. Ist eines dieser Flags gesetzt und die empfangende Stelle hat keine Erweiterung, welches das jeweilige Flag interpretieren kann, so muss die WebSocket-Verbindung geschlossen werden [FM11, S. 27].

opcode (4 Bit) Das opcode-Feld enthält die Angabe wie der Payload zu interpretieren ist. Neben den sogenannten Datenframes bzw. Non-Control-Frames, welche die Art der übertragenen Daten kennzeichnen, sind Control-Frames definiert, die zur Steuerung und Überprüfung der Verbindung verwendet werden. Wird ein unbekannter Opcode empfangen, so wird die WebSocket-Verbindung geschlossen.

- **0x0** definiert ein Fortsetzungs-Frame
- **0x1** definiert ein Text-Frame
- **0x2** definiert ein Binary-Frame
- **0x3-7** reserviert für weitere Non-Control-Frames
- **0x8** definiert ein Verbindung beenden-Frame
- **0x9** definiert ein Ping-Frame
- **0xA** definiert ein Pong-Frame
- **0xB-F** reserviert für weitere Control-Frames

MASK (1 Bit) Aus Sicherheitsgründen müssen alle Frames *maskiert* werden, die von einem Client zu einem Server übertragen werden. Unter Maskierung versteht man dabei die bitweise Abwandlung der Nutzdaten mittels eines Schlüssels (Masking Key), wobei die Länge der Nutzdaten unverändert bleibt. Das MASK-Flag zeigt dabei an, ob der Payload maskiert ist. Frames, die clientseitig initiiert wurden, müssen maskiert sein, wohingegen serverseitige Frames keine Maskierung vornehmen dürfen. Der verwendete Masking-Key muss im gleichnamigen Header-Feld hinterlegt werden.

payload length (7 Bit) Hier wird die Länge der Nutzdaten angegeben. Sind diese nicht größer als 125 Bytes, so können sie mit nur einem Frame übertragen werden. Nutzdaten mit einem höheren Speicherplatzbedarf werden je nach Größe mit dem Wert 126 bzw. 127 angegeben. Diese Angaben führen zur Verwendung des Header-Felds *Extended payload length*.

Extended payload length (16 Bit oder 64 Bit) Überschreitet die Länge des Payloads 125 Byte, so wird dieses Feld verwendet. Je nach Wert im Header-Feld *payload length* umfasst die *Extended payload length* zwei Byte oder acht Byte. Dementsprechend beträgt die maximale Länge der Nutzdaten in einem WebSocket-Frame $2^{64} - 1$ Byte [GLN15, S. 41]

Masking Key (0 oder 32 Bit) Ein Frame, der von einem Client an einen Server gesendet wird, muss mit einem 32-Bit Schlüssel maskiert werden. Dieser wird vom Client generiert und im gleichnamigen Header-Feld abgelegt. Nachrichten, die von einem Server an einen Client gesendet werden, enthalten dieses Feld nicht.

data (n Byte) Hier befinden sich die eigentlichen Nutzdaten. Ihre Größe wird in den entsprechenden Länginfeldern des Headers hinterlegt. Werden lediglich Steuerungsinformationen übertragen, wird kein Payload mitgesendet.

2.1.2 Non-Control-Frames

Durch das Header-Feld *opcode* wird die Art der Nutzdaten angegeben. Es können sowohl textbasierte Daten als auch Binärdaten übertragen werden. Bei der Kommunikation über WebSockets gibt es hier einige zusätzliche Mechanismen, die für den fehlerfreien Ablauf einer Übertragung notwendig sind. Der folgende Abschnitt handelt von der bereits aus anderen Protokollen bekannten Fragmentierung, die WebSocket-Frames zur sequentiellen Übertragung unvollständiger Daten nutzt sowie der aufgrund von Sicherheitsproblemen eingeführten Maskierung clientseitig initierter Nachrichten.

Fragmentierung

In Abschnitt 5.4. des RFC6455 ist die Fragmentierung von WebSocket-Frames beschrieben. Primäre Anwendung erfährt dieses Verfahren, wenn die Daten zum Zeitpunkt der Übertragung noch nicht vollständig vorliegen oder nicht zwischengespeichert werden können. Wird die vom Server oder einer vermittelnden Stelle festgelegte Puffergröße überschritten, so wird ein Nachrichtenfragment mit dem Inhalt des Puffers gesendet [FM11, S. 32].

Folgende Grundsätze müssen bei der Fragmentierung beachtet werden. Erweiterungen werden hierbei außer Acht gelassen:

- Unfragmentierte Nachrichten werden mit einem einzelnen Frame übertragen (FIN-Bit = 1, opcode \neq 0)
- Die Übertragung fragmentierter Nachrichten erfolgt über mindestens einen Frame mit FIN-Bit = 0 und opcode \neq 0 und wird mit einem Frame FIN-Bit = 1 und opcode \neq 0 abgeschlossen. Die Summe der Payloads aller Fragmente entspricht dem Payload eines Einzelframes bei entsprechender Puffergröße.
- Control-Frames (Abschnitt 2.1.3) dürfen nicht fragmentiert werden. Sie können zwischen der Übertragung einer fragmentierten Nachricht gesendet werden, um beispielsweise die Latenzzeit eines Pings möglichst gering zu halten. Die Verarbeitung zwischengesendeter Control-Frames muss von allen Endpunkten unterstützt werden.
- Der Empfänger muss die Fragmente einer Nachricht in der gleichen Reihenfolge erhalten, in welcher sie vom Sender aufgegeben wurden.

- Vermittler dürfen an der Fragmentierung keine Änderungen vornehmen, falls eines der RSV-Bits gesetzt ist und dessen Bedeutung dem Vermittler nicht bekannt ist.

Daraus folgt, dass die Verarbeitung sowohl fragmentierter als auch unfragmentierter Nachrichten von allen Endpunkten unterstützt werden muss. Da Control-Frames nicht fragmentiert werden dürfen, können Fragmente lediglich von den Typen Text, Binary oder einem der reservierten opcodes (0x3-7) sein. Die Angabe des Typs erfolgt durch den opcode des ersten Fragments. Alle weiteren Fragmente tragen den opcode 0x0, der dem Empfänger mitteilt, dass die empfangenen Nutzdaten an den Payload des vorangegangenen Frames angehängt werden sollen [She17].

Maskierung

WebSocket Frames, von einem Client zu einem Server gesendet, müssen maskiert werden. Dieser Mechanismus war im ursprünglichen Draft für das WebSocket Protokoll nicht vorgesehen. In Folge einer Untersuchung durch eine Gruppe von Forschern rund um ein Team der Carnegie Mellon Universität wurden Sicherheitslücken in dem Konzept aufgedeckt. Bei der Verwendung transparenter Proxy-Server konnten sie durch deren fehlerhafte Implementierung des, bei dem Aufbau einer WebSocket Verbindung genutzten, *Upgrade* Mechanismus den Cache des Proxies infizieren [Hua+11]. Daraufhin wurde der Draft überarbeitet und um die Maskierung über eine bitweise XOR Verknüpfung ergänzt.

Da der zur Maskierung des Payloads verwendete Schlüssel im Frame enthalten ist, steht hier nicht die Vertraulichkeit der gesendeten Daten im Vordergrund. Vielmehr sollen Proxy-Server daran gehindert werden, den Inhalt des Payloads zu lesen. Somit wird verhindert, dass Angreifer den Payload manipulieren und diesen für einen Angriff gegen einen Proxy einsetzen können [GLN15]. Im Folgenden soll der Ablauf der Maskierung einer Textnachricht an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Zunächst wählt der Client einen bisher nicht verwendeten 32 Bit Schlüssel aus, der zur Maskierung verwendet werden soll. Die Nachricht, die maskiert werden soll lautet "cs.hm.edu", konvertiert in hexadezimale Darstellung "63 73 2e 68 6d 2e 65 64 75". Als Schlüssel wird "3c 2e 3f 4a" verwendet. Dieser wird nun zyklisch auf den zu maskierenden Payload mit der XOR-Operation angewendet.

Unmaskierte Bytes	63	73	2e	68	6d	2e	65	64	75
Operator	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Schlüssel	3c	2e	3f	4a	3c	2e	3f	4a	3c
Maskierte Bytes	5f	5d	11	22	51	00	5a	2e	49

Tabelle 1: Maskierung durch bitweise XOR-Verknüpfung

Die maskierte Nachricht wird mit dem Schlüssel in dem WebSocket-Frame abgelegt. Der Server kann diese nach dem Empfang durch erneute Anwendung der selbstinversen XOR-Operation

demaskieren [GLN15].

Maskierte Bytes	5f	5d	11	22	51	00	5a	2e	49
Operator	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus	\oplus
Schlüssel	3c	2e	3f	4a	3c	2e	3f	4a	3c
Unmaskierte Bytes	63	73	2e	68	6d	2e	65	64	75
Nachricht	c	s	.	h	m	.	e	d	u

Tabelle 2: Demaskierung durch bitweise XOR-Verknüpfung

Die Übertragung von Server zu Client darf hingegen nicht maskiert werden. Empfängt ein Server eine unmaskierte bzw. ein Client eine maskierte Nachricht, so muss in beiden Fällen die Verbindung geschlossen werden. Dabei kann der im RFC6455 spezifizierte Statuscode *1002 (protocol error)* beim Verbindungsabbau angegeben werden [FM11, S. 26].

2.1.3 Control-Frames

Control-Frames werden dazu genutzt, den Status einer WebSocket-Verbindung zu steuern und zu überwachen. Der RFC6455 unterscheidet dabei drei Arten von Control-Frames, welche anhand des *opcodes* unterschieden werden. Der Close-Frame wird zur Einleitung und Bestätigung einer schließenden Verbindung eingesetzt. Ping- bzw. Pong-Frames werden genutzt, um festzustellen ob der jeweilige Endpunkt noch erreichbar ist oder um eine Verbindung aktiv zu halten (keep-alive) [FM11, S. 35-36]. Im Folgenden werden die verschiedenen Arten der Control-Frames sowie deren Aufgaben erläutert.

Ping- und Pong-Frames

Wie eingangs erwähnt, dienen Ping- und Pong-Frames zur Verwaltung offener WebSocket-Verbindungen. Ping-Frames tragen den *opcode* 0x9, Pong-Frames hingegen den *opcode* 0xA. Das Übertragen von Nutzdaten bis zu 125 Byte durch einen Ping- oder Pong-Frame ist durch den RFC6455 zwar vorgesehen, kommt aber typischerweise nicht zum Einsatz [GLN15, S. 48]. Enthält ein Ping-Frame Nutzdaten, so müssen diese von einem Pong-Frame übernommen und zurückgesendet werden. Empfängt ein Endpunkt einen Ping-Frame, so muss schnellstmöglich mit einem Pong-Frame darauf reagiert werden. Werden mehrere Ping-Frames empfangen, bevor ein Pong-Frame zurückgesendet wurde, so kann lediglich der zuletzt eingetroffene Ping-Frame beantwortet werden [FM11, S. 36]. Ping- und Pong-Frames dienen aktuell als rein interner Mechanismus und können nicht über eine Schnittstelle direkt versendet werden [GLN15, S. 49].

Bei den in Abbildung 2.3 dargestellten Frames handelt es sich um den Wireshark-Mitschnitt eines Heartbeats zwischen einem Client und dem Host unter *ws://echo.websocket.org*. Der Server sendet dabei einen Ping-Frame, um festzustellen, ob der Client noch erreichbar ist. Der Client antwortet mit einem korrespondierenden Pong-Frame. Da es sich um eine Nachricht von einem Client zu einem Server handelt, ist dieser Frame maskiert.

	Ping-Frame	Pong-Frame
Byte	89 00	8a 80 (85 e1 ef 27)
Binär	1000 1001	1000 1010 (...)
Detail	FIN = 1, RSV n. gesetzt opcode = 0x9	FIN = 1, RSV n. gesetzt opcode = 0xA

Abbildung 2.3: Ping- und Pong-Frames zur Verbindungskontrolle

Close-Frames

Der Abbau einer WebSocket-Verbindung erfolgt durch den Versand eines Close-Frames. Der zugehörige *opcode* lautet 0x8. Empfängt ein Endpunkt einen Close-Frame, ohne bereits selbst einen solchen versendet zu haben, so muss er ebenfalls mit einem Close-Frame antworten. Wurde der initiale Close-Frame mit einem Status-Code versehen, so wird dieser in der Antwort übernommen [FM11, S. 35]. Wird ein Close-Frame empfangen, so können ausstehende Fragmente noch vor dessen Bestätigung gesendet werden. Allerdings kann dabei nicht garantiert werden, dass der Endpunkt, der den Verbindungsabbau eingeleitet hat, diese Nachrichten noch verarbeitet. Haben beide Endpunkte je einen Close-Frame gesendet und empfangen, so müssen sowohl die WebSocket- als auch die TCP-Verbindung getrennt werden. Der Server muss dies unverzüglich durchführen, wohingegen der Client auf den Server warten sollte [FM11, S. 36]. Sollte der Verbindungsabbau von beiden Endpunkten gleichzeitig eröffnet werden, so kann angenommen werden, dass die Verbindung geschlossen ist.

Byte	88 82 (2a 1f fc f2) 29 f7
Binär	10001000 10000010 (...) 00101001 11110111
Detail	FIN = 1, RSV n. gesetzt
opcode	0x8
Maskierung	1
Payload length	2
Payload (maskiert)) ÷

Abbildung 2.4: Close-Frame initiiert von Client

Byte	88 02 03 e8
Binär	10001000 00000010 00000011 11101000
Detail	FIN = 1, RSV n. gesetzt
opcode	0x8
Maskierung	0
Payload length	2
Payload (unmaskiert)	1000

Abbildung 2.5: Close-Frame Antwort des Servers

Abbildung 2.4 zeigt einen maskierten Close-Frame, der von einem Client abgesetzt wurde. Der

maskierte Payload enthält dabei den Status-Code *1000*. Dieser wurde in der Antwort des Servers ebenfalls zurückgemeldet. Hierbei handelt es sich um die Angabe *Normal Closure*, welche besagt, dass die Verbindung ordnungsgemäß beendet wurde. Der RFC6455 definiert vier Status-Gruppen mit folgender Bedeutung [FM11, S. 46]:

0-999 Dieser Bereich wird nicht genutzt.

1000-2999 Diese Status-Codes sind für die Definition innerhalb des RFC6455 sowie für zukünftige Überarbeitungen und Erweiterungen reserviert.

3000-3999 Status-Codes in diesem Bereich sind für die Verwendung in Frameworks, Bibliotheken und Anwendungen gedacht und bedürfen einer Registrierung bei der Internet Assigned Numbers Authority (IANA).

4000-4999 In diesem Bereich können eigene Status-Codes definiert werden. Diese benötigen keine Registrierung und müssen den kommunizierenden Anwendungen bekannt sein.

Die Spezifikation des WebSocket-Protokolls definiert bereits einige Status-Codes innerhalb des zweiten Bereichs. Allerdings werden diese nur als Vorschlag angegeben, was inzwischen zu einem gewissen Wildwuchs und damit verbunden zu einigen Problemen führte [GLN15, S. 53]. Bisher wurden nur wenige Status-Codes neben jenen aus der Spezifikation registriert. Die bisher offiziellen Registrierungen finden sich auf den zugehörigen Seiten der IANA.² Tabelle 3 (S.14) zeigt einen kurzen Auszug der wichtigsten Status-Codes. Es fällt auf, dass alle Neuregistrierungen durch Alexey Melnikov erfolgten, welcher bereits an der Spezifikation des Protokolls beteiligt war. In einer der betreffenden Anfragen zur Registrierung eines Status-Codes fragt Melnikov auch, ob diese Status-Codes denn überhaupt genutzt werden und ob noch ein Interesse an deren Registrierung besteht [Mel12].

2.2 WebSocket Kommunikationsphasen

Das WebSocket-Protokoll basiert auf dem Transmission Control Protocol und durchläuft wie dieses verschiedene Phasen der Kommunikation. Zu Beginn wird ähnlich zu TCP ein Opening-Handshake zum Verbindungsaufbau durchgeführt. Auch am Ende der Datenübertragung wird ein solcher Handshake eingesetzt, um die Verbindung ordnungsgemäß zu beenden. Die Ports, welche vom WebSocket-Protokoll verwendet werden, sind Port 80 (ungesicherte Verbindungen) und Port 443 (gesicherte Verbindungen). Aktuell wird deren Verwendung jedoch vom HTTP(S)-Protokoll dominiert und sie müssen daher geteilt werden. Der Verbindungsaufbau wird daher als HTTP-Upgrade Anfrage initiiert. Zukünftige Implementierungen könnten dies jedoch durch einen einfacheren Mechanismus über einen dedizierten Port ablösen, ohne das WebSocket-Protokoll umgestalten zu müssen [FM11, S. 3]. Im Folgenden Abschnitt werden die notwendigen Schritte zum Verbindungsaufbau und -abbau erläutert, sowie ein beispielhafter Ablauf der Übertragung über eine WebSocket-Verbindung gezeigt.

²unter <https://www.iana.org/assignments/websocket/>

Status-Code	Bedeutung	Beschreibung	Spezifiziert durch
1000	Normal Closure	Zeigt einen ordnungsgemäßen Verbindungsabbau an.	RFC6455
1002	Protocol Error	Der Endpunkt beendet die Verbindung aufgrund eines Protokollfehlers. Beispielsweise wird der Empfang einer nicht maskierten Nachricht von einem Server durch selbigen mit diesem Status-Code beendet.	RFC6455
1006	Abnormal Closure	Dieser Status darf nicht in einem Close-Frame verwendet werden. Anwendungen können durch diesen signalisieren, dass die Verbindung unerwartet und auf unbekannte Weise beendet wurde.	RFC6455
1010	Mandatory Ext.	Ein WebSocket-Client kann diesen Status-Code verwenden, wenn er die Verbindung aufgrund fehlender Erweiterungen beendet. Ein Server verwendet diesen Status-Code nicht, da er aufgrund mangelnder clientseitiger Erweiterungen den Opening-Handshake abbrechen kann.	RFC6455
1012	Service Restart	Gibt an, dass der Dienst neustartet. Verbundene Clients sollen im Falle einer Wiederherstellung der Verbindung eine zufällige Zeit zwischen 5-30 Sekunden warten [Mel12].	Alexey Melnikov
1013	Try Again Later	Signalisiert, dass der Dienst überlastet ist. Sollte das Ziel über mehrere IP-Adressen verfügen, kann eine andere verwendet werden. Ist nur eine IP-Adresse verfügbar, so soll der Benutzer entscheiden, ob er sich erneut verbinden möchte [Mel12].	Alexey Melnikov

Tabelle 3: Auszug der registrierten Status-Codes

2.2.1 Verbindungsaufbau

Da Verbindungen über die Ports 80 bzw. 443 in den meisten Firewalls zugelassen werden, bedarf es keiner neuen Freigaben bei der Verwendung von WebSockets. Allerdings sind diese Ports oftmals durch einen HTTP-Server belegt. Aus diesem Grund bedarf es beim Aufbau einer WebSocket-Verbindung der Kooperation mit HTTP. Der Client sendet dazu einen HTTP-Upgrade-Request, der um spezielle Felder erweitert wurde.

Der Client stellt in Abbildung 2.6 einen solchen HTTP-Upgrade-Request an den Endpunkt des WebSocket-Servers unter `localhost:8080`. Durch **Connection: Upgrade** wird dem Server mitgeteilt, dass auf ein anderes Protokoll gewechselt werden soll, in diesem Fall **websocket**. Die Versionsnummer entspricht den unterschiedlichen IETF Drafts. Über **Sec-WebSocket-Extensions** werden die Erweiterungen angefragt, die der Client unterstützt. Die übermittelte Erweiterung **permessage-deflate** wird in Kombination mit dem Parameter **client_max_window_bits** ange-

```
GET /dako-backend/advancedchat HTTP/1.1
Host: localhost:8080
Connection: Upgrade
Upgrade: websocket
Origin: localhost:8080
Sec-WebSocket-Version: 13
Sec-WebSocket-Key: 1zUsRVYbBDvRKqqZq9cRsg==
Sec-WebSocket-Extensions: permessage-deflate; client_max_window_bits
(...)
```

Abbildung 2.6: Opening-Handshake des Clients

geben, der die *LZ77 Sliding Window* Größe limitiert, mit der der Client die Nachricht komprimiert. Bei dieser Methode handelt es sich um einen Algorithmus zur verlustfreien Kompression von Daten. So kann der zu reservierende Speicherbedarf bei der serverseitigen Dekompression reduziert werden [Yos15, S. 18]. Der Client generiert den Base64-codierten **Sec-WebSocket-Key**, der anschließend vom Server zur Empfangsbestätigung des Handshakes verwendet wird.

```
HTTP/1.1 101
Connection: Upgrade
Upgrade: websocket
Sec-WebSocket-Accept: mi8r8dWsVBJS1B3908SLbnd5tHM=
Sec-WebSocket-Extensions: permessage-deflate; client_max_window_bits=15
(...)
```

Abbildung 2.7: Opening-Handshake des Servers

Damit der Server bestätigen kann, dass der Handshake eingetroffen ist, wird der übermittelte **Sec-WebSocket-Key** mit dem Globally Unique Identifier (GUID) 258EAF5-E914-47DA-95CA-C5AB0DC85B11, welcher das WebSocket-Protokoll identifiziert, verbunden und ein SHA-1 Hashwert gebildet. Dieser Wert wird in einer Base64-Kodierung im Feld **Sec-WebSocket-Accept** übermittelt. Der Client kann beim Empfang der Nachricht anhand des gleichen Vorgehens einen SHA-1 Hash erzeugen und mit dem empfangenen vergleichen. Dieses Verfahren wird eingesetzt, um zu verhindern, dass der Server Verbindungen annimmt, die keine WebSocket-Verbindungen sind. Dadurch sollen Angreifer gehindert werden, über Formulareingaben oder **XMLHttpRequests** den WebSocket-Server zu manipulieren [FM11, S. 7].

1. **Kombinierter Wert** 1zUsRVYbBDvRKqqZq9cRsg==258EAF5-E914-47DA-95CA-C5AB0DC85B11
2. **SHA-1 Hashwert** 9A2F2BF1D5AC541252D41DFDD3C48B6E7779B473
3. **Base64 Kodierung** mi8r8dWsVBJS1B3908SLbnd5tHM=

Des weiteren teilt der Server dem Client mit, dass die Erweiterung **permessage-deflate** unterstützt wird. Die maximale Größe eines LZ77 Sliding Windows beträgt demnach 2^{15} Byte = 32 KB. Als HTTP-Status wird der Code 101 **Switching Protocols** angegeben. Dieser wird eingesetzt, um zu signalisieren, dass ab sofort das WebSocket-Protokoll genutzt wird. Weitere Anwendung findet dieser Status-Code beim Wechsel von HTTP-Versionen [Lea+99]. Meldet der

Server einen anderen Status, so wird angenommen, dass der WebSocket Handshake nicht vollständig durchgeführt werden konnte und die Semantik von HTTP gilt [FM11, S. 7]. Ebenso wird verfahren, wenn der vom Client ermittelte Hashwert nicht mit dem vom Server übertragenen `Sec-WebSocket-Accept` übereinstimmt.

Optionale Felder können ebenfalls übertragen werden. Hierzu zählt beispielsweise das Header-Feld `Sec-WebSocket-Protocol`, das angibt welches Sub-Protokoll für die Übertragung genutzt werden soll. Hat der Server den Opening Handshake erfolgreich zurückgesendet, so gilt die WebSocket-Verbindung als geöffnet und Daten können gesendet werden.

2.2.2 Datentransfer

Befindet sich die WebSocket-Verbindung nach dem erfolgreichen Opening-Handshake im Status `OPEN`, so können Daten bidirektional gesendet werden. Wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert, definiert das Header-Feld `opcode` eines WebSocket-Frames die übertragene Art von Nutzdaten. Aktuell sind lediglich Text- und Binärdaten offiziell spezifiziert.

Byte	81 0e [57 65 62 53 6f 63 6b 65 74 20 32 30 31 38]
Header	FIN = 1, RSV = 0, opcode = 0x1, Payload length = 14
[Payload]	WebSocket 2018

Abbildung 2.8: Datentransfer von Server zu Client

In Abbildung 2.8 ist eine Nachricht mit dem Inhalt `WebSocket 2018` von einem Server an einen Client gesendet worden. Als `opcode` wurde `0x1` angegeben, welcher besagt, dass es sich bei der Art des Payloads um eine Textnachricht handelt. Die Größe der Nutzdaten beträgt 14 Byte und die Nachricht konnte ohne Fragmentierung vollständig übertragen werden.

2.2.3 Verbindungsabbau

Der Abbau einer WebSocket-Verbindung erfolgt anhand eines Closing-Handshakes. Er soll den `FIN/ACK` Closing-Handshake von TCP ergänzen, da dieser insbesondere bei der Verwendung von Proxy-Servern oder Vermittlungsstellen nicht garantiert zwischen genau zwei Endpunkten abläuft [FM11, S. 9]. Laut RFC6455 sollen so Szenarien vermieden werden, in denen Daten unnötigerweise verloren gehen. Wird beispielsweise ein Proxy-Server verwendet, so verbindet sich ein Client mit diesem anstelle des eigentlichen Ziels. Der Proxy-Server stellt daraufhin selbst eine Verbindung zu dem Zielhost her und vermittelt die Pakete zwischen Client und Server. Schließt einer der Endpunkte die TCP-Verbindung, obwohl der andere Kommunikationspartner noch Daten überträgt, so kann es sein, dass die Verbindung zwischen dem Proxy und dem schließenden Endpunkt bereits abgebaut ist. Die noch ausstehende Datenübertragung schlägt fehl. Über den zusätzlichen Closing-Handshake des WebSocket-Protokolls wird die zugrundeliegende TCP-Verbindung erst geschlossen, wenn die WebSocket-Sitzung bereits abgebaut ist.

Die Einleitung eines Verbindungsabbaus kann sowohl vom Client, als auch vom Server erfolgen. Dazu wird ein Frame mit dem `opcode`-Wert `0x8` an den Kommunikationspartner versendet. Der versendende Endpunkt wechselt mit dem Absenden des Closing-Frames vom `OPEN` in den `CLOSING` Status. Ebenso gilt dies beim Empfang eines Closing-Frames insofern selbst noch keiner versendet wurde. Danach eintreffende oder zu sendende Nachrichten müssen verworfen werden. Haben beide Endpunkte sowohl einen Closing-Frame gesendet, als auch empfangen, so gilt die Verbindung als beendet (Status: `CLOSED`) und die darunterliegende TCP-Verbindung kann geschlossen werden. Dies sollte stets vom Server begonnen werden, damit er im `TIME WAIT` Status verbleibt. Der Client kann so die Verbindung durch das Senden eines neuen `SYN` unverzüglich wieder eröffnen [FM11, S. 41]. Die Zustände die ein WebSocket annehmen kann sowie deren Übergänge, sind detailliert in Abbildung ?? auf Seite 22 dargestellt.

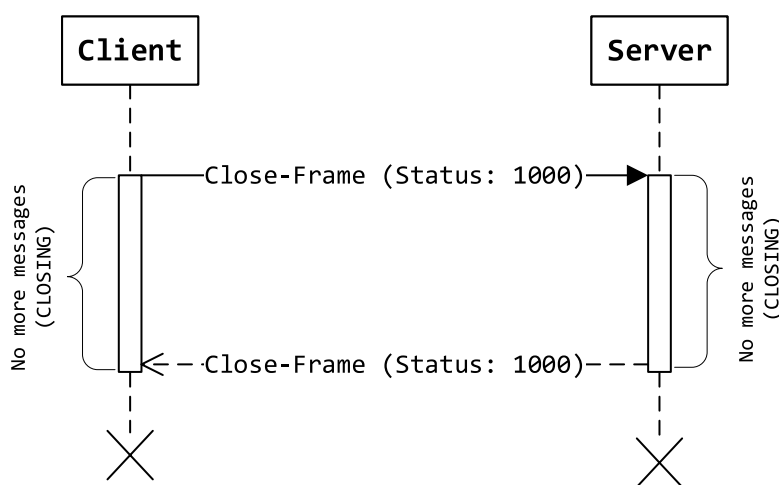


Abbildung 2.9: Clientseitiger Closing-Handshake

Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Ablauf des Closing-Handshakes. Der Client initiiert diesen, indem er einen Closing-Frame mit dem Statuscode 1000 versendet. Der Server reagiert mit einer entsprechenden Antwort, wobei der Status aus dem ersten Frame übernommen wurde. Nachdem der Closing-Handshake abgeschlossen wurde befinden sich beide Endpunkte im Status `CLOSED` und die zugrundeliegende TCP-Verbindung kann beendet werden.

2.3 Alternative Verfahren

Die Kommunikation mittels HTTP basiert auf einem Request/Response Verfahren. Dabei sendet immer der Client eine Anfrage an einen Server. Dieser antwortet mit einer Statuszeile und entsprechendem Statuscode. Anschließend gilt die Übertragung als beendet und kann durch eine erneute Anfrage des Clients neu gestartet werden. Eine Möglichkeit Daten vom Server an den Client zu senden, ist in der Spezifikation von HTTP nicht vorgesehen. Verändert sich der Zustand einer serverseitigen Ressource, so kann der Client darüber bei einer reinen HTTP-Verbindung nur durch erneutes Anfragen informiert werden. Allerdings benötigen viele Anwendungsfälle diese Funk-

tion. Aus diesem Grund wurde eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, die diese Mechanismen abbilden sollen. Im Folgenden werden einige dieser Verfahren kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile gegenüber WebSocket analysiert.

2.3.1 Polling

Durch die vom W3C standardisierte API XMLHttpRequest (XHR) wurde im Jahr 2012 eine Möglichkeit geschaffen, mittels JavaScript HTTP-Requests zu konstruieren [WHA06]. Ein XHR-Objekt registriert verschiedene Methoden, welche bei einer Änderung des Objekts asynchron aufgerufen werden. Dadurch können Anfragen gesendet werden, ohne den weiteren Programmlauf zu blockieren. Dies bildet die technische Grundlage vieler moderner Web-Frontends, die unter dem Oberbegriff Ajax (*Asynchronous JavaScript and XML*) zusammengefasst werden [GLN15, S. 26].

Beim Polling-Verfahren wird eine Anfrage an den Server in festgelegten Zeitabständen wiederholt. Durch die Verwendung eines XHR-Objekts blockiert die Anwendung zwischen dem Absenden und Empfang der Serverantwort nicht. Liegt keine Änderung vor, so sendet der Server eine leere Antwort zurück.

Dieses Verfahren wird von allen Browsern unterstützt und bedarf keiner besonderen Kenntnisse. Allerdings ist der erzeugte Overhead je nach Einsatzszenario nicht zu unterschätzen. Auch die Belastung des Servers bei der Verarbeitung der eintreffenden Anfragen kann problematisch sein. Treten demnach viele Änderungen in kurzen Zeitabständen auf, so ist von der Verwendung eines einfachen Polling-Verfahrens abzuraten.

2.3.2 Long-Polling

Die regelmäßigen Abfragen des einfachen Pollings führen zu einem enormen Overhead. Um diesen zu reduzieren wird beim Long-Polling nur eine Antwort vom Server zurückgesendet, wenn eine Änderung vorliegt. Der Client reagiert umgehend mit einem neuen Request auf die Antwort des Servers. Die Verbindung bleibt dabei geöffnet, solange keine Änderung auftritt. Läuft die vordefinierte Wartezeit ab, so antwortet der Server auch hier mit einer leeren Nachricht [GLN15, S. 29].

Das Long-Polling reduziert den Overhead gegenüber dem einfachen Polling-Mechanismus deutlich. Auf Grund des sofortigen Wiederaufbaus durch den Client wird eine nahezu andauernde Verbindung simuliert. Dennoch ist auch in diesem Fall der Overhead deutlich größer als bei der Verwendung einer WebSocket-Verbindung. Mit steigender Frequenz von Nachrichten nähert sich dieser an den Overhead des einfachen Pollings.

2.3.3 Comet

Auf Grund diverser Limitierungen für Mehrbenutzeranwendungen, entwickelten sich Programmiermodelle, welche unter der Bezeichnung *Comet* [Rus06] zusammengefasst wurden. Da es sich hierbei nicht um einen spezifizierten Standard handelt, wurde im Rahmen des CometD-Projekts der Dojo Foundation das Bayeux-Protokoll ins Leben gerufen. Ziel des Projekts ist die Reduzierung der Komplexität bei der Implementierung von Comet Anwendungen [Rus+07]. Um dies zu erreichen wurden Referenzimplementierungen des Bayeux-Protokolls in verschiedenen Programmiersprachen bereitgestellt.

Neben der Verwendung des Long-Polling Mechanismus zur ereignisgesteuerten Nachrichtenübertragung von Server zu Client, sieht das Bayeux-Protokoll auch Streaming-Techniken vor. Dabei wird die HTTP-Verbindung nach der Antwort des Servers auf den Request des Clients nicht geschlossen, sondern anhand des Connection-Headers `keep-alive` weiterhin offen gehalten. Somit können weitere Nachrichten vom Server an den Client gesendet werden, ohne dass eine erneute Anfrage durch den Client gestellt werden muss. Abbildung 2.10 illustriert die Übertragung einer Nachricht `M0` von einem Client, der in einem Webbrowser (**User Agent**) ausgeführt wird, zu einem Webserver **Origin Server**, auf welchem die serverseitige Implementierung des Bayeux-Protokolls ausgeführt wird. Die Übertragung erfolgt als HTTP Request und die korrespondierende Antwort des Servers als HTTP Response. Die Nachricht des Servers enthält dabei etwaige Bayeux-Events `E`. Nach der Übermittlung von `M1(E0)` wird die Verbindung nicht geschlossen, sodass der Server weiterhin Events an den Client übertragen kann.

Allerdings muss die Verwendung von HTTP-Streaming von den User Agenten unterstützt werden, da unvollständige HTTP Responses für dieses Verfahren genutzt werden [Rus+07]. Um bidirektional kommunizieren zu können verwendet das Bayeux-Protokoll zwei HTTP-Verbindungen, wohingegen das WebSocket-Protokoll mit einer einzigen Verbindung arbeitet. Der größte Nachteil des Bayeux-Protokolls ist jedoch die fehlende Standardisierung durch eine etablierte Organisation.

2.3.4 Server-Sent Events

Die bislang vorgestellten Verfahren bieten keine standardisierte API, die es Servern ermöglicht Daten über HTTP an eine Website zu senden. In HTML5 wurde dafür vom W3C die sogenannten *Server-Sent Events (SSE)* eingeführt, welche ein **EventSource**-Objekt bereitstellen. Dieses sorgt auf der Clientseite dafür, dass Benachrichtigungen des Servers empfangen werden können. Dazu stellt der Browser drei Event-Handler bereit, die DOM-Events an die Anwendung weiterleiten [GLN15, S. 31]. Bei der Öffnung einer SSE-Verbindung wird der Event-Handler `onopen` aufgerufen, im Falle eines Fehlers der `onerror`-Handler. Kommen Nachrichten des Servers an, so wird der `onmessage`-Handler aktiviert [Hic09a]. Zu jedem Event-Handler werden entsprechende Methoden registriert, welche die Bearbeitung des jeweiligen Events übernehmen.

Server-Sent Events erzeugen keinen Overhead durch wiederholte Anfragen an den Server. Die

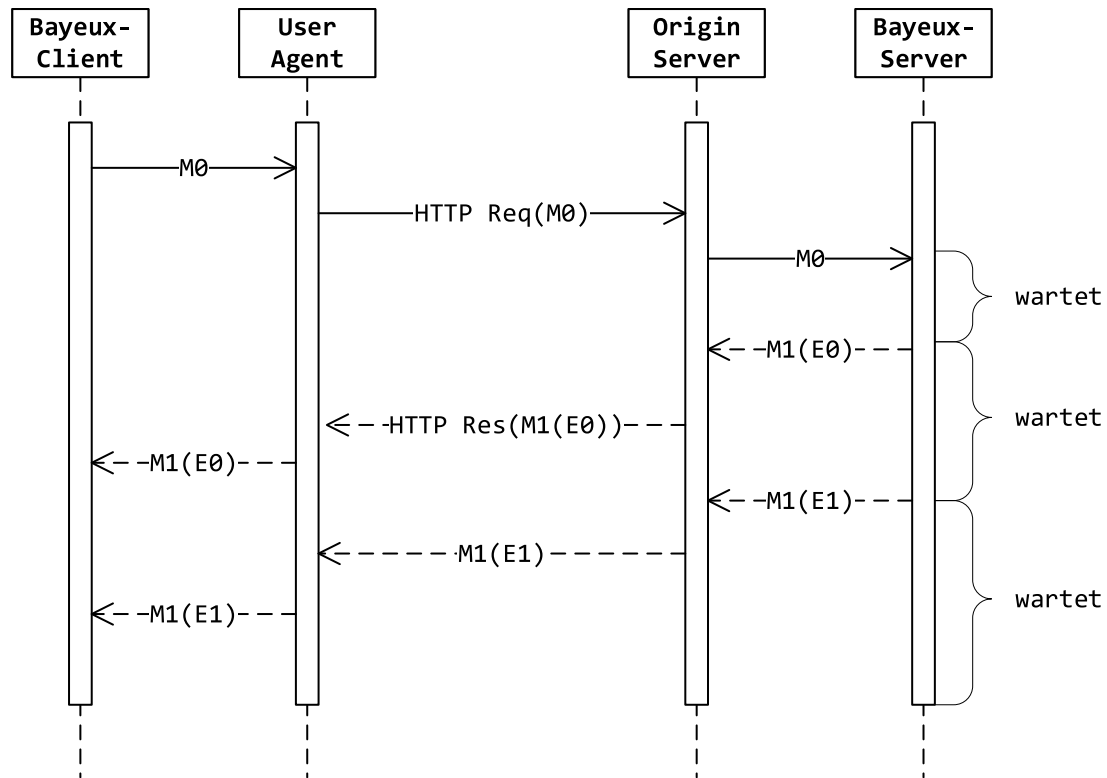


Abbildung 2.10: HTTP-Streaming im Bayeux-Protokoll

Kommunikation von Server zu Client wird ermöglicht, ohne mehrere HTTP-Verbindungen zu öffnen. Allerdings handelt es sich hier um einen unidirektionalen Kanal von Server zu Client. Dies ist für Anwendungsfälle ausreichend, in denen lediglich der Server Informationen zu übermitteln hat. Beispiele hierfür wären u.a. das Hardware-Monitoring eines Server oder ein Newsticker. Sollen jedoch Daten in beide Richtungen übertragen werden, so ist die Verwendung von WebSockets die bessere Alternative. Insbesondere Mehrbenutzeranwendungen wie Spiele oder Chats, die auf kurze Latenzen angewiesen sind, profitieren von deren bidirektionalem Kommunikationskanal.

Die Vielfalt der Alternativen lässt darauf schließen, dass ein Bedarf für eine standardisierte Methode besteht, mit der Daten zwischen Client und Server bidirektional übertragen werden können. Dieser Bedarf führte zur Einführung der WebSockets, die als einzige auch für die Übertragung binärer Daten geeignet sind.

3 Die WebSocket-API

Neben der Protokollspezifikation durch das Standardisierungsgremium IETF, wurde auch eine passende API für die Verwendung von WebSockets definiert. Da es sich hierbei um eine Webtechnologie handelt die in Browsern Anwendung findet, obliegt deren Spezifizierung dem W3C. Der erste Working Draft vom 23. April 2009 wurde von Ian Hickson eingereicht, einem der führenden Entwickler der Protokollspezifikation [Hic09b]. Darin werden alle benötigten Eigenschaften und Funktionen der WebSocket-Schnittstelle definiert. Die Beschreibung erfolgt anhand der *Web Interface Description Language* (*Web IDL*), einer formalen Darstellung, die an die sprachlichen Konstrukte von ECMAScript bzw. JavaScript angelehnt ist. Dabei handelt es sich um eine Programmiersprache, die 1995 von Netscape Communications entwickelt und durch die European Computer Manufacturers Association (ECMA) unter der Bezeichnung ECMAScript standardisiert wurde [Pey17]. Alle Beispiele beziehen sich auf die aktuelle Version 8, die im Juni 2017 offiziell freigegeben wurde. Im Folgenden wird die geläufigere Bezeichnung JavaScript verwendet.

3.1 Elemente der W3C WebSocket-API

Das Erstellen eines WebSocket-Endpunkts erfolgt laut Spezifikation anhand des Konstruktors. Dieser empfängt die URL, zu welcher der Endpunkt sich verbinden soll und legt diese im read-only Attribut `url` ab. Optional empfängt der Konstruktor einen String oder ein String-Array, welches die unterstützten Sub-Protokolle enthält.

```
var ws = new WebSocket(in DOMString url, in optional DOMString[] protocols);
```

Listing 3.1: WebSocket anlegen und verbinden

Wird die URL nicht im korrekten Schema angegeben, so wird eine `DOMException` mit der Beschreibung `SyntaxError` ausgelöst. Falls Sub-Protokolle angegeben werden, so sendet der Client diese bei der Anfrage im HTTP-Headerfeld `Sec-WebSocket-Protocol`. Wenn Server und Client ein gemeinsames Protokoll vereinbaren konnten, wird es im schreibgeschützten Attribut `protocol` abgelegt. Etwaige Erweiterungen werden nach dem erfolgreichen Verbindungsaufbau im Attribut `extensions` abgelegt.

3.1.1 WebSocket Lebenszyklus

Jede WebSocket-Verbindung unterliegt einem Lebenszyklus. Die Spezifikation unterscheidet hier vier mögliche Zustände, die als konstante Zahlenwerte hinterlegt sind. Je nachdem in welchem Zustand sich der WebSocket gerade befindet, wird der Wert einer dieser Konstanten im Attribut `readyState` abgelegt [WHA10].

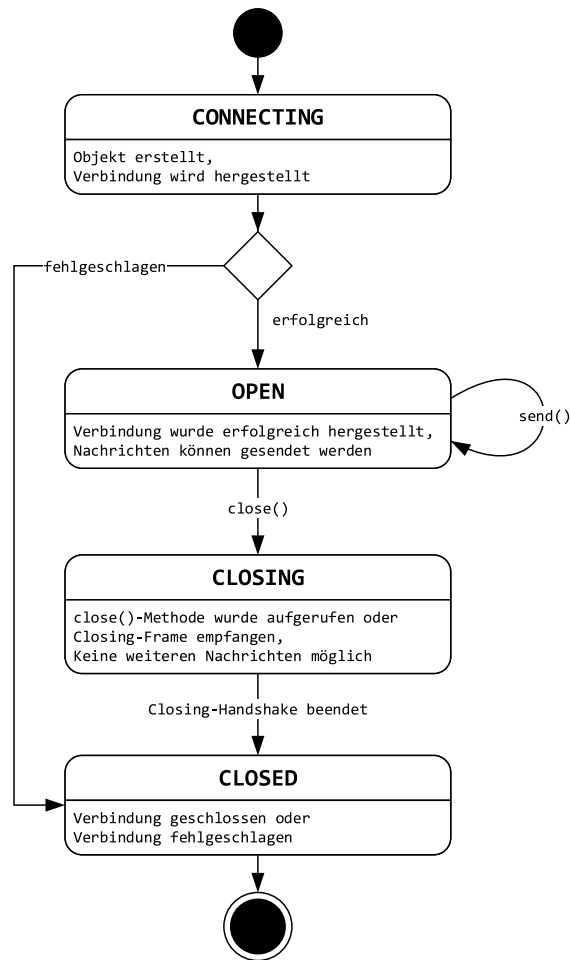


Abbildung 3.1: UML-Zustandsdiagramm des WebSocket Lifecycle

Die Implementierung in JavaScript spiegelt den Lebenszyklus eines WebSocket-Objekts gemäß der Beschreibung des W3C ab. So wird beim Anlegen des Objekts die Verbindung aufgebaut und lässt anschließend das Senden von Nachrichten zu. Durch den Aufruf der `close()`-Methode wird der Verbindungsaufbau eingeleitet. Das Schließen kann zudem optional mit Angabe eines Status-Codes (Tabelle 3, S.14) und einer textuellen Begründung erfolgen.

```

var ws = new WebSocket("ws://echo.websocket.org"); // 0 = CONNECTING
console.log(ws.readyState); // 1 = OPEN, wenn erfolgreich
ws.send("Message"); // 1
ws.close(1000, "Work done."); // 2 = CLOSING
console.log(ws.readyState); // 3 = CLOSED
  
```

Listing 3.2: WebSocket Lebenszyklus

3.1.2 Event-Handling

Die Zustände eines WebSockets werden durch Events beeinflusst, die während der Kommunikation mit einem Endpunkt eintreffen. Diese werden von Event-Handle­rn empfangen und können

anschließend verarbeitet werden. Die WebSocket API definiert die vier Event-Handler `onopen`, `onerror`, `onmessage` und `onclose`. Ein erfolgreicher Verbindungsaufbau löst das Event `open` aus, welches vom Event-Handler `onopen` verarbeitet wird. Fehler werden vom `onerror`-Event-Handler signalisiert. Wurde die Verbindung geschlossen oder konnte nicht geöffnet werden, so wird der `onclose`-Event-Handler ausgelöst.

```
var ws = new WebSocket("ws://echo.websocket.org");
// Registrieren des OnOpen-Handlers
ws.onopen = function(){
    console.log("Verbindung hergestellt!");
}
// Registrieren des OnError-Handlers
ws.onerror = function(e){
    console.log("Fehler aufgetreten: " + e.data);
}
// Registrieren des OnMessage-Handlers
ws.onmessage = function(e){
    showMessageInUI(e.data);
}
// Registrieren des OnClose-Handlers
ws.onclose = function(e){
    console.log("CloseEvent erhalten - Verbindung wird abgebaut")
    console.log("Code: " + e.code);
    console.log("Grund: " + e.reason);
}
```

Listing 3.3: WebSocket Event-Handler

3.1.3 Kommunikation

Empfangene Nachrichten können mittels des `onmessage`-Event-Handlers an die Anwendung weitergegeben werden. Entsprechend der Spezifikation des RFC6455 ermöglicht die WebSocket API das Senden von textuellen und binären Daten. Zur Unterscheidung verschiedener Arten binärer Daten stellt sie die Enumeration `BinaryType` bereit. Diese enthält die Werte `blob` und `ArrayBuffer`. Die Übermittlung der Daten erfolgt durch die Methode `send()`. Bei deren Aufruf wird das Attribut `bufferedAmount` um die Anzahl Bytes erhöht, die nicht in das Netzwerk übermittelt werden konnten [WHA10].

```
var ws = new WebSocket("ws://echo.websocket.org");
ws.send("Nachricht"); // als DOMString versenden
ws.send(BlobUtils.fromString("Nachricht")) // als binary blob versenden
```

Listing 3.4: WebSocket Nachrichten senden

3.2 Die Java™ API for WebSocket (JSR-356)

Die WebSocket-APIs beschränken sich nicht nur auf JavaScript. Verschiedene Implementierungen des Standards ermöglichen dem Entwickler, WebSockets in seiner bevorzugten Programmiersprache zu nutzen. Laut des Popularity of Programming Language (PYPL) Index ist Java der Oracle Corporation die weltweit beliebteste Programmiersprache [Cab17]. Sie wurde 1990 von James Gosling mit seinem Team bei dem Unternehmen Sun Computers entwickelt. Die erste öffentlich zugängliche Version wurde 1995 veröffentlicht [Smy09]. Aktuell ist Java 9 verfügbar.

Java Community Process

Soll eine neue Technologie in den Standardumfang von Java aufgenommen werden, so muss diese den Community Prozess (JCP) durchlaufen [Ora17b]:

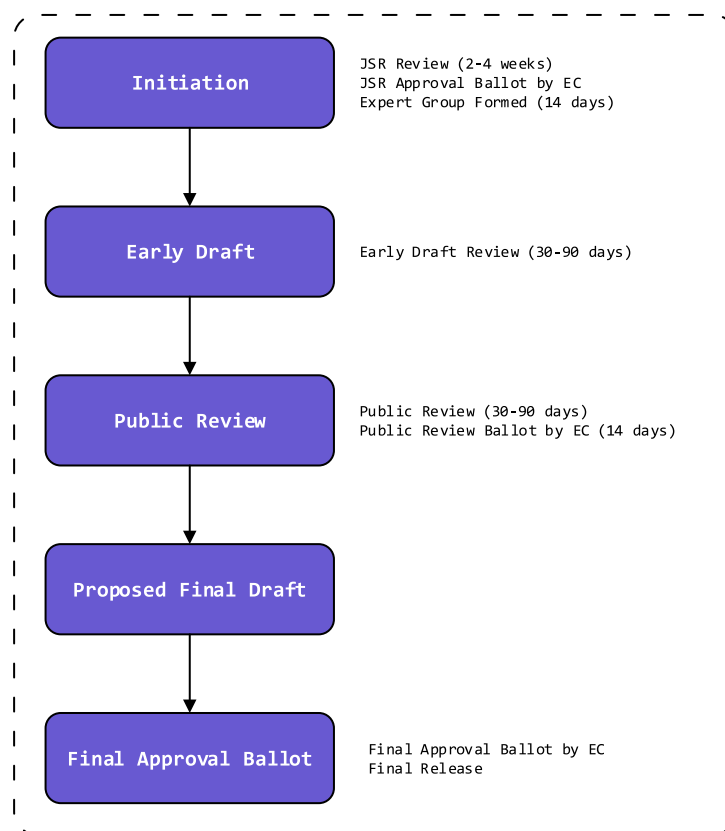


Abbildung 3.2: JSR Approval Timeline

In Phase 1 können Mitglieder des JCP einen Vorschlag zur Aufnahme einer Erweiterung machen. Diese werden als *Java Specification Request* (JSR) bezeichnet. Wird der JSR vom *Executive Committee* (EC) angenommen, so wird bis Phase 2 eine Expertengruppe gebildet, die einen Early Draft erstellt. Darauf aufbauend entwickelt diese Gruppe einen Public Draft, der in Phase 3 öffentlich eingesehen und kommentiert werden kann. Der Entwurf wird dann entsprechend überarbeitet und eine finale Version eingereicht. Zudem wird eine Referenzimplementierung (RI) und

das Technology Compatibility Kit (TCK) erstellt, welches Tests und Tools bereitstellt um Implementierungen auf Konformität mit dem JSR zu prüfen. Abschließend stimmt das EC noch über die Aufnahme in die Standardbibliothek ab. Befindet sich der JSR dann im produktiven Betrieb, können in der Maintenance Phase Updates und Änderungen des JSR beantragt und eingepflegt werden [Ora17b].

Der JSR 356 trägt die Bezeichnung JavaTMAPI for WebSocket und regelt die Aufnahme der WebSocket-Technologie in die Standardbibliothek der Java Enterprise Edition (JEE). Er befindet sich aktuell in der 4. Phase und ist seit dem 22. Mai 2013 offizieller Bestandteil seit JEE 7. Die folgenden Beispiele verwenden die achte Version von Java.

3.2.1 Grundlagen

Alle Klassen und Interfaces zur Implementierung von WebSocket-Clients und Servern wurden für Java in dem Paket `javax.websocket` zusammengefasst. Für einen WebSocket-Client, der weder im Browser noch in einem anderen Framework zum Einsatz kommt, kann in Java die Open-Source Referenzimplementierung *Tyrus* von Oracle verwendet werden. Nachfolgende Beispiele verwenden das aktuellste Release 1.12. Die Bereitstellungen erfolgen über Maven:

```
<dependency>
  <groupId>javax.websocket</groupId>
  <artifactId>javax.websocket-api</artifactId>
  <version>1.1</version>
  <scope>provided</scope>
</dependency>
<dependency>
  <groupId>org.glassfish.tyrus.bundles</groupId>
  <artifactId>tyrus-standalone-client</artifactId>
  <version>1.12</version>
</dependency>
```

Für die Implementierung eines WebSocket-Serverendpunkts wird zudem ein Webserver benötigt, der die WebSocket-API implementiert. Für Java gibt es hier eine Vielzahl von Alternativen zur Auswahl:

- Apache Tomcat ab Version 7.0.56 [The14]
- GlassFish Server ab Version 4.1 [Ora14a]
- Grizzly ab Version 2 [Ora17a]
- Eclipse Jetty ab Version 7 [The16]
- Netty ab Version 4.0 [Lee11]

Ansätze der Programmierung

Die Java™API for WebSocket kann auf zwei unterschiedliche Weisen verwendet werden. Der programmatische Ansatz sieht die Vererbung der `Endpoint` Klasse der API vor. Dabei müssen u.a. die Methoden der Oberklasse überschrieben und Funktionen auf Events registriert werden. [Cow14, S. 9]:

```
public class MyWebSocketClient extends Endpoint {
    @Override
    public void onOpen(Session session) {
        session.addMessageHandler(new MessageHandler.Whole<String>() {
            @Override
            public void onMessage(String message) {
                // Verarbeitung der Nachricht
            }
        });
    }
}
```

Listing 3.5: Java: Programmatischer Ansatz

Der Einsatz von Annotationen transformiert einfache Java-Objekte zu WebSocket Endpunkten. Handelt es sich um eine Annotation auf Klassenebene, so können diverse Konfigurationsparameter angegeben werden. Alle Informationen sind somit an einer Stelle gesammelt und auf eine Konfigurationsklasse kann in vielen Fällen verzichtet werden.

```
@ServerEndpoint( value = "/endpoint", subprotocols = {"chat"})
public class MyWebSocketServer { ... }
```

Listing 3.6: Java: Annotationen

Die nachfolgenden Code-Beispiele sind immer annotations-basiert, aufgrund besserer Lesbarkeit, verkürzter Schreibweise und der einfachen Verständlichkeit.

Erzeugung eines WebSockets

Clientseitige Endpunkte werden mit der Annotation `@ClientEndpoint` versehen. Die Konstruktion eines WebSockets erfolgt hier durch die Erzeugung eines Container-Objekts, welches anschließend zum Verbindungsaufbau verwendet wird.

```
@ClientEndpoint
public class MyClient {
    public MyClient(URI hostPath){
        // Container-Objekt erstellen
        WebSocketContainer wsc = ContainerProvider.getWebSocketContainer();
        // Verbindung fuer Endpunkt MyClient herstellen
        wsc.connectToServer(this, hostPath);
    }
}
```

Listing 3.7: Java Client: Verbindungsaufbau

Die Erstellung des Objekts ist nur dann erfolgreich, wenn die WebSocket-Verbindung aufgebaut werden konnte. Ein WebSocket-Server wird mit der Annotation `@ServerEndpoint` gekennzeichnet. Sowohl bei Server- als auch bei Clientendpunkten können verschiedene Konfigurationsparameter verwendet werden (siehe Listing 3.6). Der Parameter `value` gibt dabei den relativen Pfad an, unter dem der WebSocket-Endpunkt erreichbar ist. Wird die Anwendung auf einem lokalen WebServer ausgeführt und ihre Bezeichnung lautet `example`, so ist die Anwendung erreichbar unter `ws://localhost[:port]/example/endpoint`. Unterstützte Subprotokolle können optional mittels des Parameters `subprotocols` angegeben werden. Falls die Anwendung eigene Java-Objekte oder komplexere Datentypen übertragen soll, so müssen Encoder- bzw. Decoder-Klassen angegeben werden. Diese werden im Abschnitt 3.2.3 näher erläutert.

Event-Handling

Durch die Verwendung der Annotationen erfolgt in Java keine manuelle Deklaration der Handler. Eine Methode, die ein bestimmtes Event bearbeitet, wird durch Angabe der jeweiligen Annotation zu einem EventHandler transformiert.

```
@OnOpen
public void init(Session session, EndpointConfig config){
    // Session und Konfiguration in Variable speichern
}

@OnError
public void error(Throwable t) {
    System.out.println("Fehler aufgetreten: " + t.getMessage());
}

@OnClose
public void close(CloseReason c) {
    System.out.println("Die Verbindung wurde geschlossen.");
    System.out.println("Code: " + c.getCloseCode());
    System.out.println("Grund: " + c.getReasonPhrase());
}

@OnMessage
public void incoming(String msg){
    System.out.println("Neue Nachricht empfangen: " + msg);
}
```

Listing 3.8: Java: EventHandler

Die Java™ API for WebSocket sieht dafür die Annotationen `@OnOpen`, `@OnError`, `@OnMessage` und `@OnClose` vor. Jede auf diese Weise deklarierte Methode ermöglicht die Angabe einiger Parameter. Die aktuell verwendete `Session` kann dabei immer empfangen werden.

3.2.2 Kommunikation

Der RFC6455 definiert Ping- und Pong-Frames, durch die beispielsweise geprüft werden kann, ob ein Endpunkt noch erreichbar ist oder um eine inaktive Verbindung aufrechtzuerhalten. Allerdings spezifiziert die W3C WebSocket API keine Möglichkeit, diese Art von Control-Frames zu versenden. Die Java API hingegen stellt dafür die Methoden `sendPing()` und `sendPong()` zur Verfügung, die ein `ByteBuffer`-Objekt als Parameter empfangen, über welches Nutzdaten mit bis zu 125 Byte angehängt werden können. Diese Limitierung wird aufgrund der im RFC6455 definierten Größe von Control-Frames durch eine `IllegalArgumentException` sichergestellt.

```
public void sendPing(ByteBuffer applicationData) throws IOException,
    IllegalArgumentException

public void sendPong(ByteBuffer applicationData) throws IOException,
    IllegalArgumentException

@OnMessage
public void catchPong(PongMessage pong, Session session){ ... }
```

Listing 3.9: Java: Ping/Pong Nachrichten

Die Antwort auf eine eingehende Ping-Nachricht muss nicht durch den Entwickler erfolgen. Die Implementierungen der Java WebSocket-API stellen sicher, dass eine korrespondierende Pong-Nachricht so bald wie möglich zurückgesendet wird. In Listing 3.9 ist die Methode `catchPong` definiert, die als Parameter ein `PongMessage`-Objekt empfängt. Durch sie ist es möglich, die Antwort einer zuvor gesendeten Ping-Nachricht weiter zu verarbeiten. Beispielsweise können so Messungen der *Round Trip Time* (RTT) durchgeführt werden. Allerdings ist deren Aussagekraft nur bedingt gegeben, da diese bei größeren Nachrichten stark abweichen können [Cow14, S. 116]. Das Senden einer Pong-Nachricht ohne vorangegangenen Ping kann genutzt werden, um einen unidirektionalen *Heartbeat* abzubilden. Ein Endpunkt antwortet spezifikationsgemäß nicht auf eine eintreffende Pong-Nachricht, es sei denn, eine entsprechende Methode wurde dafür bereitgestellt.

Das Senden und Empfangen sowohl textueller als auch binärer Daten ist ebenfalls in der Java WebSocket API definiert. Die grundlegendsten Datentypen, die dabei eingesetzt werden können sind `String`, `ByteBuffer` und `byte[]` [Cow14, S. 30]. Darüber hinaus ist es möglich, komplexere Datenstrukturen oder eigene Objekte zu versenden. Dies setzt jedoch entsprechende Decoder- und Encoder-Klassen voraus. Liegen Daten zum Zeitpunkt des Versendens noch nicht vollständig vor oder können aufgrund ihrer Größe nicht in einem einzigen Frame übertragen werden, so kann auf Methoden zurückgegriffen werden, die das partielle Übertragen von Nachrichten ermöglichen. Aufgrund der protokolleigenen Fragmentierung können diese Teilnachrichten von den tatsächlich übertragenen Fragmenten abweichen. Wird der letzte Teil einer Nachricht übertragen, so muss das `isLast` Flag der jeweiligen `send`-Methode gesetzt werden. Das Versenden erfolgt immer über die `RemoteEndpoint` Schnittstelle, die man durch ein `Session` Objekt erhält.

```

public void sendMessages(Session session){

    RemoteEndpoint.Basic rEndpoint = session.getBasicRemote();

    // Textnachricht als String
    rEndpoint.sendText("Message");

    // Binaere Daten senden
    rEndpoint.sendBinary(ByteBuffer.wrap("Message".getBytes()));

    // Partielles Senden einer Textnachricht
    String part1 = "Mess";
    String part2 = "age";
    boolean isDone = false;
    rEndpoint.sendText(part1, isDone);
    rEndpoint.sendText(part2, !isDone);
}

```

Listing 3.10: Java: Synchrone Nachrichtenübertragung

Die bisher vorgestellten Methoden zum Nachrichtenversand blockieren solange, bis der gesamte Payload übertragen wurde. Soll die Applikation hingegen weitere Aufgaben während des Sendens erledigen können, so muss auf die Funktionen der Schnittstelle `RemoteEndpoint.Async` zurückgegriffen werden. Beispiele für den Einsatz asynchroner Verarbeitung finden sich häufig. So soll eine grafische Oberfläche beim Versand einer sehr großen Nachricht weiterhin reagieren können. Um Nachrichten asynchron zu übertragen, stellt die API zwei Varianten zur Verfügung.

```

// Liefert Future-Objekt zurueck
public Future<Void> sendText(String text);

// Benoetigt SendHandler
public void sendText(String text, SendHandler handler);

```

Listing 3.11: Java: Future und Handler

Der erste Weg besteht aus dem Senden einer WebSocket-Nachricht *by future* [Cow14, S. 119]. Der Sinn und Zweck eines `Future`-Objekts ist die Nachverfolgung des Versendungsstatus durch den Aufruf der zugehörigen Methoden. So kann mittels `isDone()` geprüft werden, ob die Nachricht versandt wurde. Die Methode `cancel()` bricht eine ausstehende Übertragung ab. Im Unterschied zur synchronen Nachrichtenübertragung werden etwaige Ausnahmen oder Fehler nicht automatisch zurückgemeldet. Diese können nur durch `Future.get()` ermittelt werden. Diese Methode blockiert die weitere Ausführung, bis die Nachricht übermittelt wurde oder ein Fehler aufgetreten ist.

Die zweite Möglichkeit Nachrichten asynchron zu übermitteln erfordert die Bereitstellung eines *callback* Objekts. Dabei handelt es sich um eine Implementierung der `SendHandler`-Schnittstelle,

die beim Eintreffen eines Ereignisses ausgelöst wird. Man spricht vom Senden einer Nachricht *with handler*.

```
public class MyHandler implements SendHandler {
    @Override
    public void onResult(SendResult arg0) {
        // Verarbeiten des Ergebnisses
    }
}
```

Listing 3.12: Java: Callback Interface SendHandler

Beide Varianten der asynchronen Nachrichtenübermittlung können sowohl textuelle, als auch binäre Daten übertragen. Für das Senden komplexer Strukturen oder eigener Objekte wird auch hier ein Encoder benötigt. Ping- bzw. Pong-Nachrichten können nicht asynchron übertragen werden. Die Notwendigkeit asynchroner Übertragung ist in diesem Fall auch nicht gegeben, da diese Control-Frames maximal 125 Byte Nutzdaten enthalten können und dementsprechend selbst bei geringen Bandbreiten unverzüglich übermittelt werden [Cow14, S. 120]. Die Entscheidung für eine der beiden Varianten der asynchronen Nachrichtenübertragung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Soll nur eine kleine Anzahl anderer Aufgaben während des Sendevorgangs erledigt werden, so kann die Nachricht *by future* versendet, anschließend andere Aufgaben gestartet und nach deren Beendigung durch den Aufruf der `get()`-Methode auf die Sendebestätigung gewartet werden. Dieser Ansatz blockiert dadurch einen laufenden Thread. Folgen jedoch weitere Aufgaben nach dem Versand der Nachricht, deren Bearbeitung Vorrang hat, so sollten **Handler** eingesetzt werden. Die Benachrichtigung einer eintreffenden Sendungsbestätigung muss hierbei durch einen eigenen Thread der zugrundeliegenden WebSocket-Implementierung erfolgen [Cow14, S. 123]. Dieser Ansatz blockiert dadurch nicht den laufenden Thread des eigenen Programms. Zu beachten ist weiterhin, dass lediglich durch die Verwendung des **Future**-Ansatzes das Senden einer Nachricht abgebrochen werden kann.

3.2.3 En- und Decoding

Die W3C WebSocket-API definiert lediglich textuelle und binäre Datentypen zur Übermittlung von Nutzdaten und entspricht damit den Anforderungen, die im RFC6455 für das WebSocket-Protokoll festgelegt wurden. Die Java WebSocket-API stellt hierfür standardisierte Methoden bereit, die das Senden eines **String**-Objekts oder binärer Datentypen wie **ByteBuffer** bzw. **byte[]** ermöglichen. In vielen Fällen ist es jedoch von Vorteil, komplexere Datentypen oder eigene Objekte übertragen zu können. Dafür wurde die `send`-Methode der **RemoteEndpoint**-Schnittstelle überladen, sodass sie einen Parameter vom Typ **Object** empfängt. Mit Hilfe dieser Methode lassen sich demnach Objekte eines beliebigen Datentyps versenden. Da das WebSocket-Protokoll aber lediglich textuelle oder binäre Daten kennt, müssen alle komplexeren Objekte in eine dieser beiden Formen gebracht werden. Zu diesem Zweck wurden die Schnittstellen **Encoder** und **Decoder** im Paket `javax.websocket` bereitgestellt. Über untergeordnete Schnittstellen kann zwischen der Umwandlung in textuelle oder binäre Daten gewählt werden.

```

public interface Encoder {
    // Aufruf bei Verbindungsaufbau
    void init(EndpointConfig config);
    // Aufruf bei Verbindungsabbau
    void destroy();
    // Sub-Interfaces mit jeweiliger encode-Methode
    interface Text<T> extends Encoder { String encode(T object) throws
        EncodeException; }
    interface Binary<T> extends Encoder { ByteBuffer encode(T object) throws
        EncodeException; }
}

```

Listing 3.13: Java: Encoder Interface

Die textuelle Enkodierung eines Objekts mit der Klassenbezeichnung `MyObject` erfolgt demnach über eine Klasse, die das `Encoder.Text<MyObject>` Interface implementiert. Sowohl die Enkodierung, als auch die Dekodierung erfolgen automatisch und müssen nicht vom Entwickler ausgelöst werden. Die Enkodierung von `MyObject` erfolgt beim Aufruf der `send`-Methode.

```

public interface Decoder {

    // Aufruf bei Verbindungsaufbau
    void init(EndpointConfig config);

    // Aufruf bei Verbindungsabbau
    void destroy();

    // Sub-Interfaces mit jeweiliger decode- und willDecode-Methode
    interface Binary<T> extends Decoder {
        T decode(ByteBuffer bytes) throws DecodeException;
        boolean willDecode(ByteBuffer bytes);
    }

    interface Text<T> extends Decoder {
        T decode(String s) throws DecodeException;
        boolean willDecode(String s);
    }
}

```

Listing 3.14: Java: Decoder Interface

Ein Endpunkt, der nur über eine `@OnMessage`-Methode verfügt, die als Parameter ein Objekt vom Typ `MyObject` empfängt, muss beim Erhalt einer textuellen Nachricht diese dekodieren. Dies erfolgt über eine Klasse, die das `Decoder.Text<MyObject>`-Interface implementiert hat. Dazu ist es zunächst notwendig, zu überprüfen ob die Dekodierung möglich ist. Dies wird über die Methode `willDecode` sichergestellt. Anschließend wird das erwartete Objekt aus dem empfangenen Text dekodiert.

Damit ein WebSocket-Endpunkt Nachrichten enkodieren oder dekodieren kann, müssen diese

Klassen bekannt gemacht werden. Dies erfolgt durch deren Angabe als Parameter in der jeweiligen Klassenannotation. Sollen verschiedene Objekte versendet oder empfangen werden, so müssen entsprechende Encoder- und Decoderklassen bereitgestellt werden. Die Auswahl der passenden Klasse erfolgt anhand ihrer Reihenfolge in der Klassenannotation.

```
@ClientEndpoint(encoders = { MyObjectEncoder.class },
                 decoders = { MyObjectDecoder.class })
public class MyWebSocketClient { ... }
```

Listing 3.15: Java: Angabe der Encoder- und Decoder-Klassen

Jede WebSocket-Verbindung erhält eine eigene Instanz der Encoder- und Decoder-Klassen. Dadurch wird sichergestellt, dass niemals mehr als ein Thread in der `decode()` oder `encode()` Methode aktiv ist [Cow14, S. 82].

3.2.4 Konfiguration und Session

Eine der zentralen Komponenten der Java WebSocket-API ist die **EndpointConfig** Schnittstelle. Durch sie können einem Endpunkt diverse Meta-Daten übermittelt werden, die den gemeinsamen Zustand aller verbundenen Endpunkte repräsentieren. Je nach Art des Endpunktes wird weiterhin zwischen **ClientEndpointConfig** und **ServerEndpointConfig** unterschieden. Die Parameter sind bei der Verwendung von Annotationen in der jeweiligen Klassenannotation anzugeben. Sie werden zum Zeitpunkt der Bereitstellung dazu verwendet, um eine entsprechende Instanz der zugehörigen Endpunktkonfiguration zu erstellen. Diese Konfiguration kann als optionaler Parameter von den Event-Handlern empfangen werden.

Die Methoden der übergeordneten **EndpointConfig** Schnittstelle sind sowohl für Server-, als auch für Clientendpunkte verfügbar. Durch sie können die konfigurierten Encoder- und Decoder-Klassen sowie ein **Map** Objekt abgerufen werden. Die **Map** kann vom Entwickler genutzt werden, um applikationsspezifische Objekte und Informationen abzulegen.

```
public interface EndpointConfig{
    // Liste aller Encoder-Klassen
    List<Class<? extends Encoder>> getEncoders()
    // Liste aller Decoder-Klassen
    List<Class<? extends Decoder>> getDecoders()
    // Editierbare Map
    Map<String, Object> getUserProperties()
}
```

Listing 3.16: Java: EndpointConfig

Die Konfigurationsschnittstelle des Clients ermöglicht den Zugriff auf clientspezifische Eigenschaften wie die bevorzugten Subprotokolle, Erweiterungen und den Konfigurator. Der Konfigurator ist eine Klasse, die Modifikationen an der HTTP-Anfrage sowie eine manuelle Auswertung der zugehörigen Antwort des Servers ermöglicht.

Subprotokolle und Erweiterungen Die Spezifikation des WebSocket-Protokolls ermöglicht die Bereitstellung von Subprotokollen und Erweiterungen. Die verwendeten HTTP-Felder im Opening-Handshake lauten `Sec-WebSocket-Protocol` und `Sec-WebSocket-Extensions`. Subprotokolle werden dabei als einfache `Strings` angegeben und durch Kommata getrennt. Bei der Vergabe eines eigenen Namens für ein Subprotokoll sollte beachtet werden, dass es nicht zu einer Überschneidung mit den bei der IANA registrierten Bezeichnungen kommt. Werden WebSocket-Frames um zusätzliche Informationen erweitert, um beispielsweise den Inhalt der Nutzdaten näher zu beschreiben, so spricht man von `Extensions` [Cow14, S. 102]. Verwendet eine Applikation Subprotokolle oder Erweiterungen, so werden diese ebenfalls in der Klassenannotation hinterlegt.

Für das Hinzufügen oder Ändern der HTTP-Header muss die verwendete Konfiguratorklasse von der Klasse `ClientEndpointConfig.Configurator` abgeleitet werden. Ein häufiger Anwendungsfall ist die Erweiterung der HTTP-Anfrage um applikations- oder frameworkspezifische Informationen für zusätzliche Funktionen [Cow14, S. 104]. In Listing 3.17 ist ein solcher Fall beispielhaft dargestellt.

```
public class MyClientConfig extends ClientEndpointConfig.Configurator {

    @Override
    public void afterResponse(HandshakeResponse hr) {
        // Prüfen, ob Feature aktiviert werden konnte
        boolean activated = hr.getHeaders().get("My-Feature-Field").get(0)
            .equals("activated");

        if(activated){
            // MyFeature nutzen
        } else {
            // Auf Fallback-Mechanismus zurueckgreifen
        }
        super.afterResponse(hr);
    }

    @Override
    public void beforeRequest(Map<String, List<String>> headers) {
        // HTTP-Headerfeld fuer "MyFeature" erzeugen
        List<String> featureParam = new ArrayList<String>();
        featureParam.add("enable");

        // HTTP-Header erweitern
        headers.put("My-Feature-Field", featureParam);

        super.beforeRequest(headers);
    }
}
```

Listing 3.17: Java: ClientEndpointConfig Konfigurationsklasse

Die Konfiguration des Server durch die `ServerEndpointConfig` Schnittstelle bietet ebenfalls den Zugriff auf einen Konfigurator. Zudem ist es möglich die unterstützten Subprotokolle und Erweiterungen des Servers sowie die Klasse des Endpunkts abzurufen. Die Ermittlung des relativen Pfads des Serverendpunkts wird in Abschnitt 3.2.5 detailliert behandelt.

Der Konfigurator der `ServerEndpointConfig` stellt zusätzlich diverse Methoden bereit, über die der Verbindungsaufbau gezielt gesteuert werden kann. So kann ein passendes Subprotokoll oder eine Erweiterung gewählt, die Erzeugung einer neuen Instanz manuell durchgeführt und in den Handshake selbst eingegriffen werden. Die Methode `checkOrigin()` prüft, ob der für Browserclients verbindliche HTTP-Origin-Header auf den selben Webserver verweist, auf dem der Serverendpunkt ausgeführt wird [Cow14, S. 107]. Eine Anpassung ist meist nicht notwendig. Listing 3.18 zeigt den Konfigurator des Serverendpunkts, welcher den modifizierten Opening-Handshake des Clients aus Listing 3.17 bearbeitet. Dazu wird in der Methode `modifyHandshake()` die Anfrage des Clients auf das entsprechende Feld geprüft und die Antwort des Servers vor dem Versenden angepasst.

```
public class MyServerConfig extends ServerEndpointConfig.Configurator {
    @Override
    public boolean checkOrigin(String originHeaderValue) {
        // Hier kann die Pruefung des Origin-Headers durchgefuehrt werden
    }

    @Override
    public <T> T getEndpointInstance(Class<T> endpointClass) throws
        InstantiationException {
        // Hier kann die Erzeugung einer neuen Instanz angepasst werden
    }

    @Override
    public List<Extension> getNegotiatedExtensions(List<Extension> installed,
        List<Extension> requested) {
        // Hier kann der Standardablauf der Wahl der Erweiterung veraendert werden
    }

    @Override
    public String getNegotiatedSubprotocol(List<String> supported, List<String>
        requested) {
        // Hier kann der Standardablauf der Protokollwahl veraendert werden
    }

    @Override
    public void modifyHandshake(ServerEndpointConfig sec, HandshakeRequest
        request, HandshakeResponse response) {
        // Anfrage auf zusaetzliches Header-Feld pruefen
    }
}
```

```

    boolean activateMyFeature = request.getHeaders().get("My-Feature-Field").
        get(0).equals("enable");

    if(activateMyFeature) {
        // HTTP-Headerfeld fuer "MyFeature" erzeugen
        List<String> featureParam = new ArrayList<String>();
        featureParam.add("activated");

        // HTTP-Antwort-Header erweitern
        response.getHeaders().put("My-Feature-Field", featureParam);
    }
}
}

```

Listing 3.18: Java: ServerEndpointConfig Konfigurationsklasse

Durch den Einsatz der `EndpointConfig`-Klassen werden Einstellungen getroffen, die übergreifend für alle verbundenen Endpunkte gelten. Das `Session`-Objekt hingegen repräsentiert alle Einstellungen und Zustände, bezüglich einer einzelnen WebSocket-Verbindung. Für einen WebSocket-Client existiert nur eine `Session`, wohingegen ein WebSocket-Server Zugriff zu allen verbundenen Clients hat. Ein `Session`-Objekt wird bei einer erfolgreich aufgebauten Verbindung erstellt und kann über die mit `@OnOpen` gekennzeichnete Methode empfangen werden. Durch den Aufruf der Methode `getId()` lässt sich ein eindeutiger Bezeichner zur Identifizierung einer `Session` ermitteln. Weiterhin können zur Laufzeit die Methoden zur Bearbeitung von Events ermittelt, hinzugefügt oder entfernt werden. Ändert sich im Laufe einer Verbindung beispielsweise die Art, wie ein Client Nachrichten bearbeiten soll, so kann durch den Aufruf der `removeMessageHandler`-sowie `addMessageHandler`-Methode des zugehörigen `Session`-Objekts der `@OnMessage`-Handler ausgetauscht werden. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, erfolgt das Senden von Nachrichten über `Basic`- oder `Async`-Objekte des `RemoteEndpoint`-Interfaces. Diese werden durch die Methoden `getBasicRemote()` respektive `getAsyncRemote()` der zugehörigen `Session` bereitgestellt.

Die Konfiguration verschiedener verbindungspezifischer Eigenschaften kann ebenfalls über das `Session`-Objekt verändert werden. Auf einige dieser Merkmale ist der Zugriff lediglich lesend möglich, da deren Werte während des Verbindungsaufbaus zwischen Server und Client ausgehandelt werden. Hierbei handelt es sich um die Liste der verfügbaren Subprotokolle und Erweiterungen, die verwendete Protokollversion und den authentifizierten Benutzer, repräsentiert durch ein Java `UserPrincipal`-Objekt. Des weiteren kann geprüft werden, ob die Verbindung verschlüsselt erfolgt. Schreibender Zugriff ist auf folgende Eigenschaften möglich:

userProperties Ein `map`-Objekt, in dem benutzerspezifische Schlüssel-Werte-Paare gespeichert werden können.

maxBinaryMessageSize Beschränkt die Größe einer ankommenden binären Nachricht.

maxTextMessageSize Beschränkt die Größe einer ankommenden textuellen Nachricht.

maxIdleTimeout Legt den längsten Zeitabstand fest, indem keine Aktivität zwischen den Endpunkten festgestellt wird, bevor die Verbindung geschlossen wird.

Alle Eigenschaften sind auch übergreifend für alle Endpunkte konfigurierbar. Beispielsweise kann die Beschränkung der Nachrichtengröße auch innerhalb der Annotation `@OnMessage` als Parameter hinterlegt werden. Es gilt daher abzuwägen, ob die Konfiguration nur individuell für bestimmte Clients oder übergreifend zutreffen soll.

Der Lebenszyklus einer WebSocket-Verbindung (siehe Abbildung 3.1) kann durch das **Session**-Objekt der Java WebSocket API überprüft und gesteuert werden. Die Methode `isOpen()` zeigt an, ob diese geöffnet ist und `getOpenSessions()` listet alle offenen Verbindungen zu dem Endpunkt auf, mit welchem das verwendete **Session**-Objekt verbunden ist. Allerdings können diese Methoden nicht garantieren, dass die zugrundeliegenden Verbindungen tatsächlich geöffnet sind. Wurde der andere Endpunkt unerwartet beendet oder die Verbindung getrennt, erfolgt keine Benachrichtigung darüber. Um sicherzugehen kann eine **PingMessage** an den gegenüberliegenden Endpunkt gesendet und auf eine entsprechende Bestätigung gewartet werden. Soll eine Verbindung geschlossen werden, erfolgt dies über den Aufruf der `close()`-Methode. Optional kann ein **CloseReason**-Argument übergeben werden, in dem ein **CloseCode** und eine textuelle Begründung hinterlegt werden können. Diese können von dem `@OnClose`-Handler des empfangenden Endpunkts abgefragt und interpretiert werden.

3.2.5 Path-Mapping

Die Konfiguration eines WebSocket-Serverendpunkts verlangt die Angabe eines Pfades, unter welchem der Endpunkt relativ zum Kontextpfad der Anwendung erreichbar ist. Die Zuordnung dieses Pfades auf einen bestimmten Endpunkt wird als *Path Mapping* bezeichnet. Die Identifikation eines WebSocket-Serverendpunkt erfolgt durch einen *Unique Resource Identifier* (URI). Der Aufbau des URI für WebSocket-Verbindungen erfolgt nach folgendem Schema:

`<ws-protocol-scheme>://<host>:<port>/<uri-path>?<query-string>`

Das Protokollschema ist analog zu HTTP *http(s)* bei WebSocket-URIs *ws(s)*. Dabei entspricht die *wss*-Angabe einer verschlüsselten WebSocket-Verbindung. Die Angabe des Hosts kann sowohl durch dessen IP-Adresse, als auch seinen kanonischen Namen erfolgen. Die Angabe der Port-Nummer muss lediglich dann erfolgen, wenn der zugehörige Webserver nicht unter den für WebSockets standardisierten Ports 80 bzw. 443 erreichbar ist. Der URI-Pfad entspricht der **value**-Angabe in der Konfiguration des Serverendpunkts. Es gilt zu beachten, dass insbesondere bei der Verwendung von *Java Web Archiven* (WAR) der Name der Anwendung häufig als deren Ausgangspunkt verwendet wird. Trägt die WAR-Datei die Bezeichnung *example* und der WebSocket-Serverendpunkt ist unter */test* erreichbar, so lautet der URI-Pfad */example/test*.

Der URI-Pfad kann dabei exakt oder unter Verwendung von *URI Templates* angegeben werden. Für die exakte Angabe ist es ausreichend, die URI-Pfadsegmente im **value**-Feld des WebSocket-Servers, getrennt durch `/`, zu hinterlegen. Clients können daraufhin die Verbindung unter diesem Pfad herstellen. Die Verwendung eines *URI Templates* ermöglicht die Angabe von Pfadvariablen, durch die verschiedene Aufrufe der URI unterschiedlich interpretiert werden können. Die Pfadvariablen werden durch geschweifte Klammern innerhalb des URI-Pfads angegeben und dürfen lediglich einfache Bezeichner ohne reservierte Sonderzeichen enthalten. Ein gültiger URI-Pfad unter Verwendung von Templates wäre demnach:

```
/app/{access-level}/v1
```

Der Aufruf des URI-Pfads mit verschiedenen Werten wie z.B. `/app/new/v1` oder `/app/gold/v1` ist demnach gültig und kann von dem WebSocket-Serverendpunkt unter Verwendung des **Session**-Objekts interpretiert werden. Dazu kann die Methode `getPathParameters()` eingesetzt werden. Das zurückgelieferte **Map**-Objekt beinhaltet die Pfadvariablen, wobei der Schlüsselwert der **Map** dem Variablennamen und der Wert dem übergebenen **String** entspricht. Zudem kann die Annotation `@PathParam` verwendet werden. Durch diese kann in einer der Methoden des WebSocket-Lebenszyklus der angegebene Pfadparameter als Parameter der Methode empfangen werden.

```
@ServerEndpoint(value="/app/{access-level}")
public class MyServer{
    @OnOpen
    public void onOpen(@PathParam("access-level") String level, String message)
    {
        // Nachricht differenziert nach Berechtigung bearbeiten.
    }
}
```

Listing 3.19: Java: PathParam

Als Datentypen für `@PathParam`-Parameter können alle primitiven Datentypen verwendet werden. Die Umwandlung in den jeweiligen Zieldatentyp erfolgt automatisch. Kann die Konvertierung nicht durchgeführt werden, so führt dies zu einer `DecodeException`. Die WebSocket-Verbindung wird jedoch nicht automatisch beendet.

Die optionale Übergabe zusätzlicher Parameter kann durch die Verwendung von *Query Strings* erfolgen. Dazu können Schlüssel-Werte-Paare an den URI-Pfad mit `?` angehängt und durch `&` verknüpft werden. Query Strings werden von der WebSocket-Implementierung bei der Auswahl des zu verbindenden Endpunkts ignoriert [Cow14, S. 156]. Sie können jedoch beim Verbindungsaufbau genutzt werden, um beispielsweise benutzerspezifische Einstellungen vorzunehmen. Hierfür kann die Methode `getQueryString()` oder `getRequestParameterMap()` des **Session**-Objekts verwendet werden. Erstere liefert die vollständige Zeichenkette, die nach dem URI-Pfad folgt wohingegen die zweite Methode ein `Map<String, List<String>>`-Objekt der Parameter erstellt. Ein gültiger Aufruf mit Parametern in einem Query String wären beispielsweise:

```
/app/{access-level}/v1?username=admin&password=secure  
/app/premium?showpictures=1
```

Durch die Verwendung der `getRequestParameterMap()`-Methode können diese Parameter eingesehen und verarbeitet werden. Eine Kombination aus Pfadparametern und Query Strings ist ebenfalls möglich. Bei der Auswahl der Übertragungsart verbindungspezifischer Parameter sollte beachtet werden, dass Pfadparameter nur einzelne Werte für einen Schlüssel zulassen, Query Strings jedoch eine Listenstruktur ermöglichen. Sollen Parameter ohne einen Neustart der Verbindung übertragen werden, so müssen diese als WebSocket-Nachrichten gesendet werden. Der Autor eines Großteils der Java™API for WebSocket, Danny Coward, hat zudem neun Regeln zur generellen Verwendung des *Path Mapping* festgelegt [Cow14, S. 146-159]:

Regel 1: “Der URI-Pfad eines WebSocket-Serverendpunkts wird relativ zum Kontextpfad des Webservers angegeben, auf welchem er bereitgestellt wird.”

Regel 2: “Innerhalb einer Anwendung dürfen keine zwei Endpunkte den selben URI-Pfad verwenden.”

Regel 3: “Die Interpretation von URI-Pfaden erfolgt unter Beachtung von Groß-/Kleinschreibung”

Regel 4: “Ein eingehender Opening Handshake passt genau dann zu dem URI Template eines Serverendpunkts, wenn er die Rahmenbedingungen des Templates einhält.”

Regel 5: “Es werden nur einfache URI Templates (level 1) unterstützt³.”

Regel 6: “Eine eingehende URI trifft nur dann auf ein Template zu, wenn die Pfadparameter mit einem Wert übergeben werden.”

Regel 7: “Analog zu Regel 2 dürfen keine zwei Endpunkte innerhalb einer Anwendung das gleiche URI Template verwenden.”

Regel 8: “Ein Query String kann nicht zur Auswahl des zu verwendenden Endpunkts eingesetzt werden.”

Regel 9: “Bei der Auswahl des zu verwendenden Endpunkts vergleicht die Java WebSocket API Pfadsegment für Pfadsegment beginnend von links. Eine exakte Übereinstimmung wird dabei der Übereinstimmung mit einem Pfadparameter vorgezogen.”

Bei Regel 8 muss angemerkt werden, dass ein übergebener Query String bei der Auswahl des passenden Endpunkts vollständig ignoriert wird. Das folgende Beispiel sorgt für ein besseres Verständnis der Problematik, welche in Regel 9 geregelt ist:

³Vollständige Definitionen von URI Templates sind im zugehörigen RFC einsehbar, siehe [Not+12]

Endpunkt 1 unter: `/language/professional`

Endpunkt 2 unter: `/java/skill`

Hier stellt eine Anwendung zwei Endpunkte unter der Verwendung von URI Templates bereit. Trifft nun eine Anfrage an `/java/professional` ein, so kann nicht garantiert werden, welcher der beiden Endpunkte nun zuständig ist. Durch die Festlegung des Vorzugs exakter Übereinstimmung in Regel 9 wird Endpunkt 2 bereitgestellt, da `java` kein Parameter, sondern ein festgelegter Wert ist und mit der angefragten URI übereinstimmt. Zudem erfolgt diese Überprüfung für jedes Segment beginnend von links, wodurch die exakte Übereinstimmung von `professional` nicht weiter geprüft wird.

4 Die Chat-Anwendung

Im Rahmen des Bachelor Studiums der Wirtschaftsinformatik an der Hochschule München lernen Studierende ab dem dritten Fachsemester grundlegende und fortgeschrittene Merkmale der Datenkommunikation. Die zugehörige Modulbeschreibung der Hochschule München erklärt für diesen Kurs die Vermittlung von Prinzipien der Datenkommunikation, der Netzwerkkonzeption sowie der Entwicklung von Kommunikationsanwendungen als Ziel. Die Studierenden sollen dabei Kenntnisse über die Prinzipien der Datenkommunikation und der Netzwerkkonzeption erlangen sowie die wichtigsten Protokollmechanismen nachvollziehen können. Anschließend sollen sie in der Lage sein Kommunikationsanwendungen für konkrete Problemstellungen zu entwickeln [siehe Hoc17]. Um die erklärten Ziele des Moduls zu erreichen liegt der Schwerpunkt auf folgenden Inhalten [aus Man17b]:

- Spezielle Aspekte der Datenkommunikation wie verbindungsorientierte und verbindungslose Kommunikation, gesicherte Datenübertragung, Routing, Segmentierung und Fragmentierung sowie spezielle Aspekte der Netzwerkkonzeption.
- Studium ausgewählter Problemstellungen realer, insbesondere von TCP/IP-basierten Datenkommunikationssystemen.
- Verwendung von Transportzugriffsschnittstellen wie Sockets.
- Entwicklung von Kommunikationsanwendungen auf Basis von Transportprotokollen wie TCP und UDP.
- Grundbegriffe und Anwendungsbereiche von Kommunikationsarchitekturen (z.B. Schichtenmodell, Protokolle, Netzarten- und -technologien).

Da Studierende nach Abschluss des Moduls in der Lage sein sollen anhand definierter Anforderungen Kommunikationsanwendungen zu entwickeln, müssen sie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Mandl⁴ eine Studienarbeit erstellen, in welcher eine Chat-Anwendung programmiert, evaluiert und vorgestellt werden muss. Der Schwerpunkt der Anwendung liegt auf der Entwicklung von Kommunikationsprotokollen auf Basis heutiger Transportprotokolle [Man17b]. Als Transportprotokoll kommt dabei das verbindungsorientierte *Transmission Control Protocol* (TCP) zum Einsatz. Die verwendete Programmiersprache ist *Java* der Oracle Corporation.

Durch die Einführung des WebSocket-Protokolls sollen Webanwendungen unter möglichst geringem Einsatz von Verwaltungsdaten die Vorteile von TCP nutzen können. Dabei steht insbesondere die Möglichkeit bidirektional zu kommunizieren im Vordergrund. Die Nutzung von WebSockets im Rahmen der Studienarbeit stellt somit einen neuen Anwendungsfall dar, welcher im Rahmen dieser Bachelorarbeit geplant, umgesetzt und getestet werden soll. Dazu wird in diesem Kapitel zunächst die bestehende Anwendung analysiert, um daraus auf die Anforderungen der neuen Applikation schließen zu können. Anschließend wird deren Dokumentation zur gezielten Planung der Umsetzung eingesetzt. Die Implementierung und der Test der WebSocket-Chat-Anwendung bilden den Abschluss dieses Kapitels.

⁴unter https://www.wirtschaftsinformatik-muenchen.de/?page_id=4 (letzter Zugriff am 14.01.2018)

4.1 Analyse der bestehenden Chat-Anwendung

Die detaillierte Prüfung der bestehenden Anwendung stellt einen wichtigen Teilaspekt in der Definition der Anforderungen an das neue Chat-Programm dar. Die Technik der Informationsgewinnung aus der Dokumentation oder Implementierung eines Altsystems wird als *Systemarchäologie* bezeichnet [PR09, S. 38]. Ziel dabei ist die Sicherstellung der Übernahme aller relevanten, bereits implementierten Funktionen. Sie gilt als die einzige Technik, die eine vollständige Umsetzung von Alt- in Neusysteme gewährleistet [PR09, S. 38]. Diese Methode kann bei dem vorliegenden Entwicklungsprojekt gut angewendet werden, da die Dokumentation sowie die Implementierung der bestehenden Anwendung in ausreichendem Umfang und Qualität vorliegen. Des weiteren unterscheiden sich Neu- und Altsystem nur im Hinblick auf die zugrundeliegende Architektur und nicht anhand der fachlichen Funktionalität. Aus diesem Grund wird zunächst die grundlegende Struktur analysiert, die relevanten Klassen und Bibliotheken identifiziert sowie die prinzipielle Funktionsweise dargestellt.

4.1.1 Struktur des Projekts

Bei dem vorliegenden Projekt handelt es sich um ein *Java Eclipse Projekt*, unterteilt in sechs *Packages*. Ein Package (Paket) enthält dabei eine oder mehrere Klassen, die sich einen Geltungsbereich für Klassen teilen [Kre06]. Ihre Bezeichnung spiegelt den Aufgabenbereich der enthaltenen Klassen wider.

edu.hm.dako.chat.benchmarking Dieses Package beinhaltet Klassen und Interfaces zur grafischen Darstellung und Bereitstellung der Funktionalität für den Belastungstest der Anwendung.

edu.hm.dako.chat.client Hier sind alle notwendigen Klassen und Interfaces der Client-Anwendung zur grafischen Darstellung und Bereitstellung der Funktionalität enthalten.

edu.hm.dako.chat.common Gemeinsam genutzte Klassen, die beispielsweise Datenobjekte repräsentieren oder in denen Messwerte abgelegt werden können, sind in diesem Package enthalten. Sowohl Server als auch Client können diese Klassen verwenden. Die Übertragung der Nachrichten erfolgt durch Objekte der Klasse `ChatPDU` innerhalb dieses Packages.

edu.hm.dako.chat.connection In diesem Package befinden sich die Klassen, durch welche die Verbindungssteuerung sowohl auf Server- als auch auf Clientseite erfolgt. Die Klassen und Interfaces sind dabei klar auf die Verwendung von TCP als Transportprotokoll ausgelegt.

edu.hm.dako.chat.server Hier sind alle notwendigen Klassen und Interfaces der Server-Anwendung zur grafischen Darstellung und Bereitstellung der Funktionalität enthalten.

edu.hm.dako.chat.tcp Diese Klassen implementieren die im `connection`-Package definierten Funktionalitäten zur Verwendung von TCP als Transportprotokoll.

Weiterhin befinden sich im Projektverzeichnis noch zwei Konfigurationsdateien. Sie werden benötigt um die `log4j`-Bibliothek zu konfigurieren. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung für die Ausgabe von Log-Daten auf einer Konsole oder in eine Datei.

4.1.2 Auswahl zu übernehmender Klassen

Die strukturellen Änderungen zwischen der bisherigen Chat-Anwendung und dem neuen WebSocket-Chat erfordern eine sorgfältige Auswahl der Klassen, die portiert werden sollen. Insbesondere Klassen zur Steuerung der Verbindung sowie zur Darstellung und Implementierung von Server- und Client-Anwendung sind zu prüfen. Dabei sollen auch nicht verwendete Programmteile des Altsystems identifiziert werden.

Das Package `edu.hm.dako.chat.common` beinhaltet diverse Datenobjekte, die sowohl vom Client als auch vom Server verwendet werden. Die Klassen `MemoryTest` und `TestNanoTime` dienen lediglich zu Testzwecken und sind für den Einsatz in der Studienarbeit nicht relevant. Die Funktionalität aller weiteren Klassen soll auch weiterhin bestehen bleiben und muss daher übernommen werden.

Im Package `edu.hm.dako.chat.benchmarking` sind die Funktionen zur Durchführung des Lasttests gebündelt. Die Klasse `BenchmarkingUserInterfaceSimulation` simuliert jedoch nur eine Benutzeroberfläche und wird weiterhin nicht verwendet. Die Funktionalität aller weiteren Klassen soll bestehen bleiben und muss daher übernommen werden.

Die Packages `edu.hm.dako.chat.server` und `edu.hm.dako.chat.client` repräsentieren alle Klassen zur Darstellung und Implementierung eines Clients bzw. eines Servers. Die grafischen Oberflächen werden mittels `JavaFX` implementiert, einer Bibliothek zur Erstellung von Benutzeroberflächen durch den Einsatz von `FXML`. Dabei handelt es sich um eine auf XML-basierende Auszeichnungssprache [Ora14b]. Da eine Webanwendung entwickelt werden soll, erfolgt die Darstellung der Client-Anwendung durch einen Webbrowser. Die aktuellen Klassen zur Darstellung werden demnach nicht weiter benötigt, wohingegen die Funktionalität aller weiteren Klassen bestehen bleiben soll und daher übernommen werden muss.

Bei den Packages `edu.hm.dako.chat.connection` und `edu.hm.dako.chat.tcp` handelt es sich um die Klassen und Interfaces, die zur Repräsentation und Steuerung der Verbindung eingesetzt werden. Allerdings liegt deren Fokus auf der Implementierung einer Verbindung mit TCP oder dem *User Datagram Protocol* (UDP). Aus diesem Package kann demnach keine Klasse weiterhin verwendet werden.

Die Anwendung wird ergänzt durch einige externe Bibliotheken, die zusätzliche Funktionen einbringen. Die Bibliothek `netty-all-4.0.0.final` wird verwendet um die übertragenen TCP-Streams in Objekte zu konvertieren und muss daher nicht übernommen werden. Neben der bereits erwähnten Bibliothek `log4j-1.2.15` kommt lediglich `commons-math3-3.6` zur Berechnung der statistischer Werte zum Einsatz und muss daher übernommen werden. Die Verwendung aller weiteren Bibliotheken wird nicht fortgesetzt.

4.1.3 Funktionsweise

Die Ermittlung der abzubildenden Funktionsweise ist essentiell für die Implementierung der WebSocket-Chat-Anwendung. Die obligatorische Übernahme der daraus abgeleiteten Anforderungen gewährleistet die bestehende Funktionalität weiterhin. Die Chat-Anwendung besteht grundlegend aus drei Teilbereichen. Der Serverteil ermöglicht die Auswahl zwischen zwei unterschiedlichen Implementierungsvarianten: **Simple** und **Advanced**. Zudem kann der Port eingestellt werden, auf welchem der Server auf neue Anfragen lauscht. Des weiteren können Send- und Empfangspuffergrößen in Byte angegeben werden. Der Teil des Clients besteht aus einer Anmeldemaske, in welcher der Benutzer seinen Namen sowie die IP-Adresse und den Port des Zielserver eintragen kann. Auch hier muss ein Implementierungstyp angegeben werden. Könnte die Verbindung zu dem Server hergestellt werden und stimmen die Implementierungstypen überein, so wechselt die Darstellung in die Chat-Ansicht. Diese besteht aus einer Liste der angemeldeten Benutzer sowie einem Bereich, in welchem die Chat-Nachrichten dargestellt werden. Zudem befinden sich dort noch Schaltflächen zum Senden von Nachrichten und zum Abmelden. Der dritte Teilbereich stellt die Funktionalität eines Lasttests bereit. Die Benutzeroberfläche dieses Benchmark-Clients bietet eine Vielzahl von Konfigurationsmöglichkeiten. Weiterhin finden sich dort diverse Felder für Laufzeitdaten und Messergebnisse. Der Benchmark-Client kann mit den vorhandenen Schaltflächen gestartet, abgebrochen, neugestartet und vollständig beendet werden. Eine detaillierte Ansicht aller verfügbaren Optionen zeigt die Abbildung im Anhang.

Kern der Anwendung ist die Klasse `ChatPDU`. Eine *Protocol Data Unit* (PDU) repräsentiert die (Protokoll-)Nachrichten, die zwischen Server und Client ausgetauscht werden. Dabei enthalten sie Statusinformationen, durch welche der Zustand der Verbindung verändert werden kann.

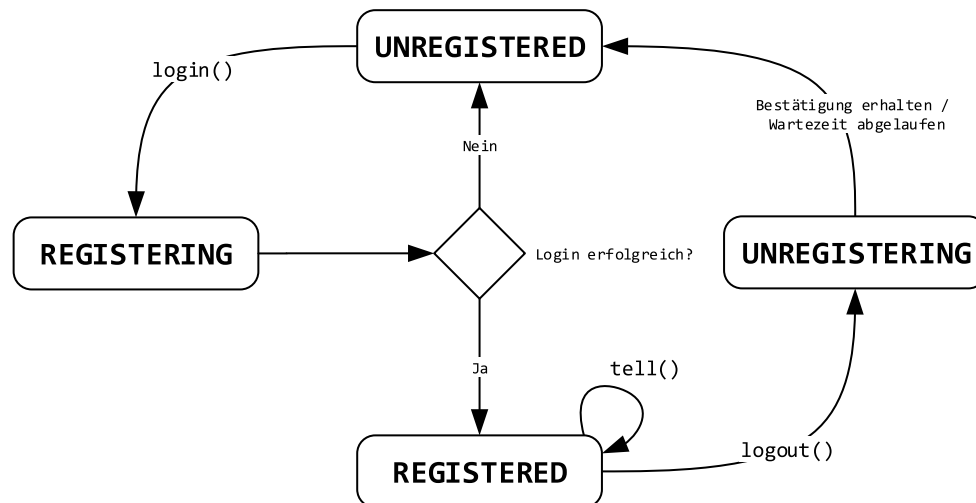


Abbildung 4.1: Zustände in der Chat-Anwendung

Durch den Aufruf der `login()`-Methode wechselt der Client zunächst in den Zustand **REGISTERING**. Bestätigt der Server die korrekte Anmeldung, so wechselt der Client in den Zustand **REGISTERED**.

Das Senden von Nachrichten erfolgt mittels `tell()` und ändert dabei nicht den Zustand des Clients. Die Abmeldung wird durch die Methode `logout()` initiiert, woraufhin sich der Client im Zustand `UNREGISTERING` befindet. Wird die Abmeldung vom Server bestätigt bzw. erreicht die Bestätigung den Client nicht innerhalb einer festgelegten Zeitspanne, so wird angenommen, dass die Verbindung geschlossen werden kann und der Client wechselt in den Zustand `UNREGISTERED`.

Jeder Methodenaufruf generiert dabei eine `ChatPDU` mit einer Anfrage der zugehörigen Aktion. Beispielsweise wird bei der Anmeldung der PDU-Typ `LOGIN_REQUEST` und beim Versand einer Nachricht der Typ `MESSAGE_REQUEST` verwendet. Die Verarbeitung der Anfrage ist abhängig von der Implementierung des Servers. Die einfache Implementierung (**Simple**) benachrichtigt alle angemeldeten Clients über das eingetretene Ereignis und antwortet dem anfragenden Client umgehend. Die komplexe Implementierung (**Advanced**) sieht vor, dass alle versendeten Events zunächst bestätigt werden müssen, bevor die Antwort an den initiierenden Client versendet wird. Der Ablauf der komplexen Implementierung ist beispielhaft für den Anmeldevorgang in Abbildung 4.2 dargestellt.

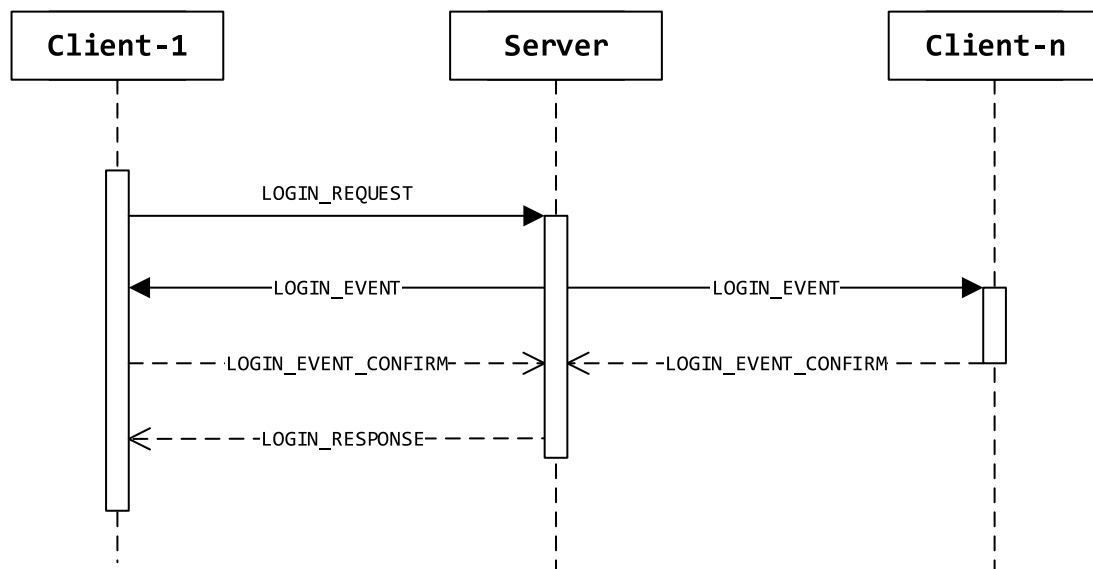


Abbildung 4.2: Ablauf des Login-Vorgangs (AdvancedChat)

Neben den Anfragen, die als `REQUESTS` versendet werden, können die PDUs des Chat-Protokolls von den Typen `EVENT` für neue Ereignisse, `EVENT_CONFIRM` zur Bestätigung eines Ereignisses und `RESPONSE` zur Bestätigung der Anfrage sein. Anfragen und Ereignisbestätigungen werden ausschließlich von einem Client verwendet, wohingegen ein Server lediglich über neue Ereignisse informiert und Anfragen bestätigt. Da die Protokollmechanismen genutzt werden sollen, um die „Programmierung von Kommunikationsanwendungen [...] zu erlernen und Erfahrungen mit Transportprotokollen zu sammeln“ [vgl. Man17a, S. 2], müssen diese im WebSocket-Chat unverändert abgebildet werden.

Das Stellen von Anfragen sowie deren Bearbeitung erfolgt nebenläufig durch die Verwendung von *Threads*. Dabei handelt es sich um leichtgewichtige Prozesse innerhalb eines Prozesses, die sich dessen Ressourcen teilen. Da der gemeinsame Zugriff auf die unterliegenden Ressourcen zu unvorhergesehenen Ergebnissen (*Race Conditions*) führen kann, müssen die Threads mittels geeigneter Mechanismen synchronisiert werden. Die Chat-Anwendung verwendet drei Threads pro Verbindung zwischen Server und Client. Der Server stellt für jeden neuen Client einen dedizierten Thread zur Bearbeitung der Anfragen zur Verfügung. Der Client verfügt über zwei Threads, wobei einer für die Bearbeitung der Benutzerinteraktionen zuständig ist und der andere die Nachrichten des Servers annimmt und bearbeitet. Sowohl die Client-, als auch die Serveranwendung werden als eigenständige Prozesse ausgeführt und können unabhängig voneinander auf verschiedene Hosts verteilt werden. Der WebSocket-Chat soll die Anwendungsteile ebenfalls trennen, wobei die Clientanwendung im Browser und die Serveranwendung auf einem Webserver ausgeführt wird. Der Teil des Clients wird bei einer Webanwendung ebenfalls durch den Webserver ausgeliefert. Durch die Verwendung der Java WebSocket-API wird die Verwaltung der Threads von der spezifischen Implementierung übernommen und kann daher nur eingeschränkt angepasst werden.

Die Übertragung der Protokollnachrichten erfolgt synchron durch die kontinuierliche Übertragung von Objektströmen. Eine zu übermittelnde **ChatPDU** wird zunächst serialisiert und anschließend in den Puffer des TCP-Sockets übertragen. Für die Serialisierung implementiert die Klasse das Interface **Serializable**. Überschreitet die Größe der Nachricht den reservierten Speicherplatz des Puffers nicht, so kann der aktive Thread im Anschluss weitere Aufgaben bearbeiten. Im Gegensatz zum nachrichten-basierten WebSocket-Protokoll erfolgt die Übertragung mittels TCP-Sockets *stream-basiert*. Dabei werden die Daten in einem kontinuierlichen Fluss übertragen, dessen Ende vorab nicht ersichtlich ist. Aufgrund der Unterschiede im Aufbau der Protokolle sind nicht alle Eigenschaften der Übertragung von Protokollnachrichten der bestehenden Chat-Anwendung abbildbar. Da jedoch im WebSocket-Chat ebenfalls **ChatPDUs** übertragen werden sollen, müssen diese entsprechend vor der Übertragung transformiert werden.

4.2 Anforderungen an WebSocket-Chat

Die gewonnen Erkenntnisse aus der Analyse der bestehenden Chat-Anwendung sollen im Folgenden dazu verwendet werden, die Anforderungen an den WebSocket-Chat zu spezifizieren. Eine Anforderungsspezifikation entspricht einer systematisch dargestellten Sammlung von Anforderungen an ein System [PR09, S. 43]. Eine Anforderung ist im IEEE Standard 620.16-1990 definiert als „Eine Bedingung oder Fähigkeit, die ein System oder eine Komponente erfüllen oder besitzen muss, um einen Vertrag, einen Standard, eine Spezifikation oder anderweitig formal vorgeschriebene Dokumente zu erfüllen.“ Dabei wird zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen unterschieden. Funktionale Anforderungen beziehen sich auf ein erwartetes Ergebnis des Verhaltens einer bereitgestellten Funktion des Systems wohingegen nicht-funktionale Anforderungen an Qualitätsmerkmale des Systems gestellt werden [PR09, S. 16]. Diese Quali-

tätsanforderungen können beispielsweise die Geschwindigkeit oder Verfügbarkeit eines Systems betreffen. Die ermittelten Anforderungen dienen als Basis für den Entwurf des Systems sowie die anschließende Implementierung. Des weiteren werden aus ihnen Testfälle abgeleitet, um die Einhaltung der Systemanforderungen zu überprüfen.

4.2.1 Funktionale Anforderungen

Durch die Analyse der Funktionen der bestehenden Chat-Anwendung wurde eine Vielzahl von Anforderungen an den WebSocket-Chat ermittelt. Im Folgenden werden diese zusammengefasst und in die zugehörigen Bereiche eingeteilt.

System und Systemkontext

Die Chat-Anwendung ist aufgeteilt in Server-, Client- und Benchmarking-Teil. Jeder Teil ist in einem eigenen Prozess ausführbar und kann auf verschiedenen Hostsystemen lokalisiert sein. Der WebSocket-Chat sollte diese Aufteilung weiterhin beibehalten, kann jedoch die Server- und Clientanwendung in einer Einheit bereitstellen. Der Benchmark-Client muss weiterhin als eigenständige Einheit verfügbar sein, um Leistungsmessungen in verschiedenen Szenarien zu ermöglichen. Die Serveranwendung soll in Java 8 durch die JavaTM API for WebSocket realisiert werden, wohingegen die Clientanwendung in TypeScript unter Verwendung des Front-End-Webapplikationsframeworks Angular 4 entwickelt wird. Der Benchmark-Client soll als unabhängige Konsolenanwendung in Java 8 implementiert werden und die bisherigen Auswertungsmöglichkeiten bereitstellen.

Die Kommunikation zwischen den Anwendungsteilen muss auf dem WebSocket-Protokoll basieren. Dabei müssen die in Kapitel 2 und Kapitel 3 beschriebenen Vorgehensweisen und Standards eingehalten werden. Eine WebSocket-Verbindung zwischen Server und Client muss immer über den HTTP Handshake hergestellt werden. Bei den Leistungsmessungen kann gemäß der Spezifikation auf diesen verzichtet werden, da der Benchmark-Client nicht innerhalb eines Browsers ausgeführt wird.

Die Protokollnachrichten, die zwischen den Kommunikationsendpunkten ausgetauscht werden, müssen den Vorgaben der **ChatPDUs** entsprechen. Dabei sind die Attribute und Methoden vollständig zu übernehmen. Abbildung 4.3 bietet einen Überblick über die wichtigsten Elemente der **ChatPDU**-Klasse. Zur Verbesserung der Lesbarkeit wurde auf *Getter*- und *Setter*-Methoden sowie auf die Parameter der statischen Methoden in der Darstellung verzichtet. Alle statischen Operationen dienen der Erzeugung einer **ChatPDU** eines bestimmten PDU-Typs. Es werden nur die Attribute mit entsprechenden Werten versehen, die im jeweiligen PDU-Typ benötigt werden. So soll beispielsweise keine Liste aller angemeldeten Clients beim Senden einer neuen Chat-Nachricht (**MESSAGE_EVENT**) hinterlegt werden. Die verschiedenen Zustände, die eine **ChatPDU** annehmen kann, sind in der Enumeration **PduType** definiert. Der Status des Clients wird der Enumeration **ClientConversationStatus** entnommen und kann die in Abbildung 4.1 dargestellten Werte

annehmen.

ChatPDU
<pre> -pduType: PduType -userName: String -eventUserName: String -clientThreadName: String -serverThreadName: String -sequenceNumber: long -message: String -clients: Vector<String> -serverTime: long -clientStatus: ClientConversationStatus -errorCode: int -numberOfReceivedChatMessages: long -numberOfSentEvents: long -numberOfReceivedConfirms: long -numberOfLostConfirms: long -numberOfRetries: long </pre>
<pre> +ChatPDU() +ChatPDU(type: PduType, clients: Vector<String>) +ChatPDU(type: PduType, message: String) +createLogoutEventPdu(): ChatPDU +createLoginEventPdu(): ChatPDU +createLoginResponsePdu(): ChatPDU +createChatMessageEventPdu(): ChatPDU +createLogoutResponsePdu(): ChatPDU +createChatMessageResponsePdu(): ChatPDU +createLoginErrorResponsePdu(): ChatPDU +createLoginEventConfirm(): ChatPDU +createLogoutEventConfirm(): ChatPDU +createChatMessageEventConfirm(): ChatPDU </pre>

Abbildung 4.3: Aufbau einer ChatPDU

Die bestehende Chat-Anwendung verfügt über zwei unterschiedliche Implementierungsformen. In der einfachen Variante (**SimpleChat**) wird die Antwort des Servers auf die Anfrage eines Clients umgehend versendet. Die komplexe Variante (**AdvancedChat**) erwartet zunächst eine Bestätigung des Ereignisses durch alle aktiven Clients, bevor die Antwort an den Initiator versendet wird. Ein Client gilt als aktiv, wenn er sich nicht im Zustand **UNREGISTERED** befindet. Beide Implementierungsformen dienen als wichtiges didaktisches Mittel und müssen daher im WebSocket-Chat abgebildet werden. Es soll möglich sein, zwischen beiden Implementierungsformen zu wechseln.

Funktionen des Server

Der Server stellt die zentrale Komponente der WebSocket-Chatanwendung dar. Er muss die Nachrichten der Clients empfangen und verarbeiten können. Dazu muss der Server in der Lage sein, Informationen zu jedem verbundenen Clients zu speichern und entsprechende Anfragen dem Initiator zuzuordnen. Der Server muss daher jederzeit den Zustand und die Adresse aller verbundenen Clients abrufen können. Treffen Anfragen eines Clients ein, die eine Statusänderung zur Folge haben, so muss der Server den gespeicherten Zustand des Clients umgehend ändern können. Die Benutzernamen innerhalb des WebSocket-Chats müssen eindeutig sein. Verwendet ein Client beim Verbindungsaufbau einen bereits existierenden Namen, so muss der Server die Anmeldung verweigern und einen entsprechenden Fehlercode in seiner Antwort hinterlegen. Chat-Nachrichten

dürfen ausschließlich von Clients gesendet werden, die sich im Status **REGISTERED** befinden. Eintreffende Chat-Nachrichten von Clients mit einem anderen Status müssen verworfen werden. Der Verbindungsabbau wird clientseitig gestartet und muss vom Server bestätigt werden. Befindet sich der Client im Status **UNREGISTERED**, kann eine neue Verbindung aufgebaut werden. Bei der Verwendung der **Simple-Chat**-Implementierung muss der Server bei einer eintreffenden Anfrage alle aktiven Clients über das Ereignis informieren und anschließend eine Bestätigung an den initiierenden Client senden. Die komplexere **AdvancedChat**-Implementierung verlangt, dass der Server nach der Benachrichtigung aller aktiven Clients zunächst auf deren Empfangsbestätigung wartet, bevor die Antwort an den Initiator erfolgt.

Funktionen des Clients

Die Clientanwendung soll einem Anwender ermöglichen, am WebSocket-Chat teilzunehmen. Dazu muss die Clientanwendung über eine grafische Oberfläche verfügen, über welche der Anwender sich anmelden, Nachrichten versenden und sich abmelden kann. Für die Anmeldung muss der Anwender einen Benutzernamen eingeben können. Existiert dieser Name bereits in der Chatanwendung, so wird dem Anwender die Anmeldung verweigert und er wird darüber benachrichtigt. Der Anwender muss anschließend in der Lage sein, die Anmeldung mit einem neuen Benutzernamen zu wiederholen. Nach einer erfolgreichen Anmeldung müssen Anwender untereinander Nachrichten austauschen können. Sie sollen dabei jederzeit die Benutzernamen aller angemeldeten Anwender sehen können. Alle Nachrichten, die seit dem Zeitpunkt der Anmeldung eines Anwenders gesendet wurden, sollen für diesen einsehbar sein. Die Abmeldung von der Chat-Anwendung muss über eine Schaltfläche möglich sein.

Beim Start der Anwendung befindet sich der Client im Zustand **UNREGISTERED**. Ausschließlich Clients mit diesem Status sollen eine Anmeldeaufforderung angezeigt bekommen. Durch die Anmeldung wechselt der Client in den Zustand **REGISTERING** und insofern diese erfolgreich ist in **REGISTERED**. Durch diesen Status erhält der Anwender Zugriff auf den Chat. Meldet sich der Anwender ab, so wechselt der Client in den Zustand **UNREGISTERING** und wartet auf die Bestätigung durch den Server. Beim Erhalt dieser Bestätigung oder nach einer vordefinierten Wartezeit wechselt der Client in den Status **UNREGISTERED**. Der Client muss in der Lage sein, den eigenen Zustand zu speichern und zu ändern. Die Änderung wird entweder durch eine Aktion des Anwenders ausgelöst, oder durch eine Antwort des Servers.

Funktionen des Benchmark-Clients

Der Benchmark-Client nutzt die Funktionsweise der Clientanwendung. Für die Leistungsmessung soll er eine große Anzahl simultan agierender Clients bereitstellen. Eine grafische Oberfläche wird dazu nicht benötigt. Der Benchmark-Client muss in der Lage sein, die Messergebnisse aus Abbildung 6.1 zu erheben. Die Eingabeparameter des bestehenden Benchmark-Clients müssen als Konsolenparameter abgebildet werden. Folgende Parameter müssen konfigurierbar sein:

- Implementierungsart (Simple/Advanced)
- Serveradresse (IP-Adresse oder Hostname)
- Anzahl der Clients
- Anzahl der Nachrichten pro Client
- Länge einer Nachricht in Byte
- Wartezeit eines Clients vor dem Senden der nächsten Nachricht

4.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Betrifft eine Anforderung mehrere oder alle funktionalen Anforderungen oder überschneidet sie, so handelt es sich um eine nicht-funktionale Anforderung [BL11, S. 109]. Für viele Anforderungen dieser Art lassen sich Qualitätskriterien definieren. Einer Studie von Forschern der University of Technology Sydney zufolge, sind die am häufigsten berücksichtigten Qualitätsmerkmale Leistung (performance) (89%), Zuverlässigkeit (reliability) (68%), Benutzbarkeit (usability) (62%), Sicherheit (security) (60%) und Wartbarkeit (maintainability) (55%) [MZN10, S. 314]. Die nicht-funktionalen Anforderungen an den WebSocket-Chat werden im folgenden Abschnitt diesen Kategorien zugeteilt. Da die zu entwickelnde Anwendung im Rahmen einer Lehrveranstaltung zu didaktischen Zwecken eingesetzt werden soll, werden Sicherheitsaspekte jedoch nicht betrachtet.

Leistung

Anforderungen bezüglich der Leistung einer Anwendung spezifizieren die Fähigkeit der Software eine angemessene Geschwindigkeit im Verhältnis zu den eingesetzten Ressourcen zu gewährleisten [MZN10, S. 315].

Zuverlässigkeit

Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit einer Anwendung spezifizieren die Fähigkeit der Software fehlerfrei ein definiertes Leistungsniveau unter regulären Bedingungen für einen vorgegebenen Zeitraum einzuhalten [MZN10, S. 315].

Benutzbarkeit

Anforderungen bezüglich der Benutzbarkeit einer Anwendung betreffen die Interaktionen eines Benutzers mit dem System. Dies betrifft auch die Erlernbarkeit und Bedienbarkeit des Systems [MZN10, S. 315].

Wartbarkeit

Anforderungen bezüglich der Wartbarkeit einer Anwendung spezifizieren, in welchem Maße der Quellcode der Software verständlich, korrigierbar und verbesserbar ist [MZN10, S. 315].

Modernes UI responsive, singlepage, Fehlertolerant, nicht blockieren nach Senden der Nachricht,

4.3 Entwurf des WebSocket-Chats

4.4 Implementierung und Test des WebSocket-Chats

5 Evaluation

5.1 Test-Umgebung

5.2 Probleme

5.3 Leistungsanalyse WebSocket-Chat

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Einsatzgebiete

Literatur

- [BL11] Helmut Balzert und Peter Liggesmeyer. *Lehrbuch der Softwaretechnik. 2: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. 3. Aufl. Lehrbücher der Informatik. OCLC: 750951360. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl, 2011. 596 S. ISBN: 978-3-8274-1706-0.
- [Cab17] Pierre Cabonnelle. *PYPL Popularity of Programming Language Index*. 1. Dez. 2017. URL: <http://pyp1.github.io/PYPL.html> (besucht am 31.12.2017).
- [Cow14] Danny Coward. *Java WebSocket Programming*. New York: McGraw-Hill, 2014. 230 S. ISBN: 978-0-07-182719-5.
- [Fet10] Ian Fette. *The WebSocket Protocol*. 31. Aug. 2010. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-hybi-thewebsocketprotocol-01> (besucht am 19.12.2017).
- [FM11] Ian Fette und Alexey Melnikov. *The WebSocket Protocol*. 1. Dez. 2011. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6455> (besucht am 19.12.2017).
- [GLN15] Peter Leo Gorski, Luigi Lo Iacono und Hoai Viet Nguyen. *WebSockets: moderne HTML5-Echtzeitanwendungen entwickeln*. OCLC: 901007083. München: Hanser, 2015. 269 S. ISBN: 978-3-446-44438-6.
- [Hic09a] Ian Hickson. *Server-Sent Events*. 23. Apr. 2009. URL: <https://www.w3.org/TR/2009/WD-eventsourcing-20090423/> (besucht am 28.12.2017).
- [Hic09b] Ian Hickson. *The Web Sockets API*. 23. Apr. 2009. URL: <https://www.w3.org/TR/2009/WD-websockets-20090423/> (besucht am 30.12.2017).
- [Hic10] Ian Hickson. *The WebSocket Protocol*. 6. Mai 2010. URL: <https://tools.ietf.org/search/draft-hixie-thewebsocketprotocol-76> (besucht am 19.12.2017).
- [Hoc17] Hochschule München. *Modulhandbuch IB 2017*. 1. Okt. 2017. URL: <https://w3-o.cs.hm.edu:8000/public/module/59/> (besucht am 14.01.2018).
- [Hua+11] Lin-Shung Huang u. a. „Talking to Yourself for Fun and Profit“. In: *Proceedings of W2SP* (1. Jan. 2011), S. 1–11.
- [Int11] Internet Assigned Numbers Authority. *WebSocket Protocol Registries*. 21. Okt. 2011. URL: <https://www.iana.org/assignments/websocket/websocket.xhtml#opcode> (besucht am 25.12.2017).
- [Kre06] Heinz Kredel. *JavaPackages*. 23. Jan. 2006. URL: <http://krum.rz.uni-mannheim.de/pk1/sess-606.html> (besucht am 14.01.2018).
- [Lea+99] Paul J. Leach u. a. *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. 1. Juni 1999. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2616> (besucht am 20.12.2017).
- [Lee11] Trustin Lee. *Netty.News: WebSockets in Netty*. 17. Nov. 2011. URL: <https://netty.io/news/2011/11/17/websockets.html> (besucht am 04.01.2018).

- [Man17a] Peter Mandl. *Aufgabenstellung Studienarbeit Datenkommunikation WS17/18*. 1. Sep. 2017. URL: https://www.wirtschaftsinformatik-muenchen.de/wp-content/uploads/Peter%20Mandl/Lehrveranstaltungen/WiSe%2017-18/Datenkommunikation/Aufgabenstellung_Studienarbeit_Datenkommunikation_WS_17_18.pdf (besucht am 25.01.2018).
- [Man17b] Peter Mandl. *Datenkommunikation / Competence Center Wirtschaftsinformatik (CCWI)*. 1. Okt. 2017. URL: https://www.wirtschaftsinformatik-muenchen.de/?page_id=595 (besucht am 14.01.2018).
- [Mel12] Alexey Melnikov. *Additional WebSocket Close Error Codes*. 16. Mai 2012. URL: <http://www.ietf.org/mail-archive/web/hybi/current/msg09670.html> (besucht am 25.12.2017).
- [MZN10] Dewi Mairiza, Didar Zowghi und Nurie Nurmuliani. „An Investigation into the Notion of Non-Functional Requirements“. In: *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing*. ACM, 2010, S. 311–317.
- [Not+12] Mark Nottingham u. a. *URI Template*. 1. März 2012. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6570> (besucht am 13.01.2018).
- [Ora14a] Oracle Corporation. *GlassFish Server Open Source Edition Release Notes 4.1*. 1. Sep. 2014. URL: <https://javaee.github.io/glassfish/doc/4.0/release-notes.pdf> (besucht am 04.01.2018).
- [Ora14b] Oracle Corporation. *JavaFX Overview (Release 8)*. 1. Aug. 2014. URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm> (besucht am 14.01.2018).
- [Ora17a] Oracle Corporation. *Project Grizzly - WebSockets Overview*. 6. Sep. 2017. URL: https://javaee.github.io/grizzly/websockets.html#/Overview_of_Grizzlys_WebSocket_Implementation (besucht am 04.01.2018).
- [Ora17b] Oracle Corporation. *The Java Community Process(SM) Program - Introduction - Timeline View*. 1. Jan. 2017. URL: <https://jcp.org/en/introduction/timeline> (besucht am 31.12.2017).
- [Pey17] Sebastian Peyrott. *A Brief History of JavaScript*. 16. Jan. 2017. URL: <https://auth0.com/blog/a-brief-history-of-javascript/> (besucht am 31.12.2017).
- [PR09] Klaus Pohl und Chris Rupp. *Basiswissen Requirements Engineering: Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering"; Foundation Level nach IREB-Standard*. 1. Aufl. OCLC: 319867958. Heidelberg: dpunkt-Verl, 2009. 172 S. ISBN: 978-3-89864-613-0.
- [Rus+07] Alex Russell u. a. *The CometD Reference Book – 3.1.3*. 1. Jan. 2007. URL: https://docs.cometd.org/current/reference/#_bayeux (besucht am 28.12.2017).

- [Rus06] Alex Russell. *Comet: Low Latency Data for the Browser – Infrequently Noted*. 3. März 2006. URL: <https://infrequently.org/2006/03/comet-low-latency-data-for-the-browser/> (besucht am 28.12.2017).
- [She17] Eric Shepherd. *Writing WebSocket Servers*. 16. Aug. 2017. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets_API/Writing_WebSocket_servers (besucht am 22.12.2017).
- [Smy09] Tamara Smyth. *Brief History of Java*. 1. März 2009. URL: https://www.cs.sfu.ca/~tamaras/javaIntro/Brief_History_Java.html (besucht am 31.12.2017).
- [The14] The Apache Foundation. *Apache Tomcat 7 (7.0.56) - Changelog*. 6. Okt. 2014. URL: <http://tomcat.apache.org/tomcat-7.0-doc/changelog.html> (besucht am 04.01.2018).
- [The16] The Eclipse Foundation. *Jetty - Servlet Engine and Http Server*. 1. Jan. 2016. URL: <http://www.eclipse.org/jetty/about.html> (besucht am 04.01.2018).
- [WHA06] WHATWG. *XMLHttpRequest Standard*. 1. Jan. 2006. URL: <https://xhr.spec.whatwg.org/> (besucht am 27.12.2017).
- [WHA10] WHATWG. *HTML Standard WebSockets*. 2010. URL: <https://html.spec.whatwg.org/multipage/web-sockets.html> (besucht am 19.12.2017).
- [Yos15] Takeshi Yoshino. *Compression Extensions for WebSocket*. 24. Aug. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-hybi-permessage-compression-28#section-4> (besucht am 26.12.2017).

Abbildungsverzeichnis

2.1	WebSocket-Protokoll im ISO/OSI-Modell	6
2.2	Vereinfachte Darstellung eines WebSocket Frames	7
2.3	Ping- und Pong-Frames zur Verbindungskontrolle	12
2.4	Close-Frame initiiert von Client	12
2.5	Close-Frame Antwort des Servers	12
2.6	Opening-Handshake des Clients	15
2.7	Opening-Handshake des Servers	15
2.8	Datentransfer von Server zu Client	16
2.9	Clientseitiger Closing-Handshake	17
2.10	HTTP-Streaming im Bayeux-Protokoll	20
3.1	UML-Zustandsdiagramm des WebSocket Lifecycle	22
3.2	JSR Approval Timeline	24
4.1	Zustände in der Chat-Anwendung	43
4.2	Ablauf des Login-Vorgangs (AdvancedChat)	44
4.3	Aufbau einer ChatPDU	47

Tabellenverzeichnis

1	Maskierung durch bitweise XOR-Verknüpfung	10
2	Demaskierung durch bitweise XOR-Verknüpfung	11
3	Auszug der registrierten Status-Codes	14

Listings

3.1	WebSocket anlegen und verbinden	21
3.2	WebSocket Lebenszyklus	22
3.3	WebSocket Event-Handler	23
3.4	WebSocket Nachrichten senden	23
3.5	Java: Programmatischer Ansatz	26
3.6	Java: Annotationen	26
3.7	Java Client: Verbindungsaufbau	26
3.8	Java: EventHandler	27
3.9	Java: Ping/Pong Nachrichten	28
3.10	Java: Synchrone Nachrichtenübertragung	29
3.11	Java: Future und Handler	29
3.12	Java: Callback Interface SendHandler	30
3.13	Java: Encoder Interface	31
3.14	Java: Decoder Interface	31
3.15	Java: Angabe der Encoder- und Decoder-Klassen	32
3.16	Java: EndpointConfig	32
3.17	Java: ClientEndpointConfig Konfigurationsklasse	33
3.18	Java: ServerEndpointConfig Konfigurationsklasse	34
3.19	Java: PathParam	37

Anhang

The screenshot displays the 'Benchmarking Client' application window. It is organized into three main sections: 'Eingabeparameter' (Input Parameters), 'Laufzeitdaten' (Runtime Data), and 'Messergebnisse' (Message Results). Each section contains a grid of input fields and dropdown menus. The 'Eingabeparameter' section includes settings for implementation type, message type, number of threads, message length, response timeout, denotation time, server port, and server IP. The 'Laufzeitdaten' section tracks various metrics during the test, such as planned and sent requests, test duration, and event messages. The 'Messergebnisse' section displays performance metrics like RTT, interquartile range, percentiles, and server CPU usage. At the bottom, there are four buttons: 'Abbrechen' (Cancel), 'Starten' (Start), 'Neustart' (Restart), and 'Beenden' (End).

Eingabeparameter		
Implementierungstyp	TCPSimple	Art der Messung
Anzahl Client-Threads	1	Nachrichtenlänge in Byte
Anzahl Nachrichten je Client	10	Response-Timeout in ms
Max. Anzahl Wiederholungen	1	Denkzeit in ms
		Serverport
		Server-IP-Adresse

Laufzeitdaten		
Geplante Requests	Gesendete Requests	Empfangene Responses
Testbeginn	Testende	Testdauer in s
Kalkulierte Event-Nachrichten	Gesendete Event-Nachrichten	Wiederholte Event-Nachrichten
Empfangene Confirm-Nachrichten	Verlorene Confirm-Nachrichten	Anzahl Übertragungswiederholungen

Messergebnisse		
Mittlere RTT in ms	Maximale RTT in ms	Minimale RTT in ms
Interquartilsabstand in ms	Spannweite in ms	Standardabweichung in ms
10%-Percentile in ms	25%-Percentile in ms	50%-Percentile in ms
75%-Percentile in ms	90%-Percentile in ms	
Mittlere Serverzeit in ms	Maximale Heap-Belegung in MiB	Mittlere CPU-Auslastung in %

Abbrechen Starten Neustart Beenden

Abbildung 6.1: Benutzeroberfläche des Benchmark-Clients