

Bachelorarbeit

Evaluation der Programmiersprache Rust für den
Entwurf und die Implementierung einer
hochperformanten, serverbasierten
Kommunikationsplattform für Sensordaten
im Umfeld des automatisierten Fahrens

Michael Watzko
Sommersemester 2018

Erstprüfer: Prof. Dr. Manfred Dausmann
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Kevin Erath M. Sc.



Firma: IT Designers GmbH
Betreuer: Dipl.-Inf. Hannes Todenhagen

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Esslingen, den 21. Juni 2018

Michael Watzko

Danksagungen

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei dieser Bachelorarbeit unterstützt haben. Zuerst gilt mein Dank jedoch meiner Familie, die mich nicht nur während dieser Bachelorarbeit unterstützte, sondern den Weg für dieses Studium erst ermöglicht hat.

Meinen Kommilitonen möchte ich für die anregenden Diskussionen und amüsanten Zeiten zu Mittag – in keiner besonderen Reihenfolge – danken: Felix Grammling, Julian Klissenbauer, Matthias Geckeler, Oliver Wasser, Thomas Weißenbach und Peer Berberich.

Hannes Todenhausen danke ich für seine Betreuung und dafür, dass er nie müde wurde, meine vielen Fragen zu beantworten. Für seine langjährige Unterstützung und gute Zusammenarbeit möchte ich mich zudem bei Stefan Kaufmann bedanken. Für seinen organisatorischen Beitrag und seine stete Hilfsbereitschaft danke ich Kevin Erath.

Professor Dr. Manfred Dausmann danke ich für seine konstruktive Kritik und schnellen Reaktionen während meiner Bachelorarbeit. Durch seine Vorlesung „Einführung in die Programmiersprache C“ im Jahre 2008 wurde mein Interesse am Programmieren erst geweckt.

Für seine kontinuierliche Unterstützung und Förderung seit 2010 bedanke ich mich bei Professor Dr. Joachim Goll.

Mein Dank gilt auch der IT-Designers GmbH, welche diese Arbeit durch ihre Bereitschaft, Studenten zu fördern, unterstützt und durch das gute Arbeitsklima ermöglicht hat.

„This occasionally happens in Rust: there is a period of intense arguing with the compiler, at the end of which the code looks rather nice, as if it had been a breeze to write, and runs beautifully.“

– Jim Blandly und Jason Orendorff [BO17, S. 262]

Kurzfassung

Autonome Fahrzeuge sind Bestandteil vieler Zukunftsvisionen und werden von der Industrie bereits aktiv erforscht und entwickelt. Hierfür notwendige Software bietet aufgrund ihrer Komplexität eine höhere Wahrscheinlichkeit für Fehler, die sogar Menschenleben kosten könnten. Konventionell eingesetzte Programmiersprachen wie C++ weisen eine hohe Ausführungs­geschwindigkeit auf, bieten bei naiven Herangehensweisen aber auch Potenzial für fatale Laufzeitfehler.

Die Programmiersprache Rust soll eine hohe Ausführungs­geschwindigkeit erreichen, dank ihrer Garantien dieses Fehlerpotenzial jedoch vermeiden. Ob Rust als Alternative im echtzeitnahen Umfeld geeignet ist, wird in dieser Bachelorarbeit durch den Entwurf und die Implementierung einer Kommunikationsplattform überprüft. Diese Implementation wird mit einem bestehenden C++ Prototypen im Laufzeitverhalten verglichen.

Im Grundlagenkapitel werden die Eigenschaften, Versprechen und Garantien von Rust untersucht. Zudem wird ermittelt, welche Eigenschaften erfüllt sein müssen, um eine hochperformante Kommunikationsplattform umzusetzen.

In den Kapiteln „Implementierung“ und „Auswertung“ werden Vorgehensweisen, Schwierigkeiten bei der Implementierung und das Ergebnis dieser Arbeit präsentiert.

Schlagworte: Rust, FFI, ASN.1, sichere Nebenläufigkeit, asynchrone Ein- und Ausgabe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Projektkontext	2
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Die Programmiersprache Rust	5
2.1	Geschichte	6
2.2	Anwendungsgebiet	6
2.2.1	Kompatibilität	7
2.2.2	Veröffentlichungszyklus	7
2.2.3	Ökosystem	8
2.3	Aufbau eines Projektverzeichnisses	9
2.3.1	Klassisch	9
2.3.2	Als Crate	10
2.4	Hello World	10
2.5	Einfache Datentypen	11
2.6	Zusammengesetzte Datentypen	13
2.7	Funktionen, Ausdrücke und Statements	14
2.8	Implementierung einer Datenstruktur	14
2.9	Generalisierung durch Traits	15
2.10	Closure	18
2.11	Zugriffsmodifikatoren	18
2.12	Musterabgleich	19
2.13	Schleifen	20
2.14	Attribute	22
2.15	Unit- und Integrationstests	23
2.16	Namenskonvention und Formatierung	23
2.17	Niemals Nichts und niemals unbehandelte Ausnahmen	24
2.18	Standardbibliothek	24
2.19	Speicherverwaltung	26
2.20	Eigentümer- und Verleihprinzip	27
2.21	Versprechen von Rust	29
2.21.1	Kein undefiniertes Verhalten	29
2.21.2	Keine vergessene Null-Pointer Prüfung	30
2.21.3	Keine vergessene Fehlerprüfung	30

2.21.4	No dangling pointer	32
2.21.5	Speichersicherheit	34
2.21.6	Sichere Nebenläufigkeit	34
2.21.7	Zero Cost Abstraction	36
2.21.8	Optional	36
2.21.9	Referenzzähler	36
2.21.10	Closures	36
2.22	Einbinden von externen Bibliotheken	37
2.23	Unsafe	39
2.24	Beispiele der Verwendung von Rust	40
3	Systemrelevante Technologien	41
3.1	Echtzeitsysteme	41
3.2	Mobile Edge Computing	41
3.3	ASN.1	42
3.4	Test-Driven Development	43
3.5	Funktionale Sicherheit	44
3.6	Asynchrone Kommunikation und Datenströme	44
4	Anforderungen	47
4.1	Funktionale Anforderungen	47
4.1.1	Top-Level Requirement	47
4.1.2	Anforderungen	47
4.2	Nichtfunktionale Anforderungen	50
5	Systemanalyse	53
5.1	Systemkontextdiagramm	53
5.2	Gesamtübersicht der Anwendungsfälle	54
5.3	Beschreibung der Anwendungsfälle	55
5.3.1	Als Fahrzeug registrieren	55
5.3.2	Umgebungsmodell abonnieren	55
5.3.3	Umgebungsmodell deabonnieren	56
5.3.4	Als Sensor registrieren	56
5.3.5	SensorFrame zusenden	56
5.3.6	SensorIdleFrame zusenden	57
5.3.7	Sensor abonnieren	57
5.3.8	Sensor deabonnieren	57
5.3.9	Fahrzeug Sektoren zusenden	58
5.3.10	Fahrzeug Umgebungsmodell zusenden	58
5.4	Nachrichtenanalyse	59
5.4.1	ClientRegistration	59
5.4.2	SensorFrame	60
5.4.3	EnvironmentFrame	60
5.4.4	UpdateSubscription	60

5.4.5	InitMessage	60
5.4.6	RoadClearanceFrame	60
5.4.7	SensorIdleFrame	60
5.5	Schnittstellenanalyse	61
5.5.1	Sensor und MEC-View-Server	61
5.5.2	Fahrzeug und MEC-View-Server	62
5.5.3	Sensor, Fahrzeug und MEC-View-Server	63
6	Systementwurf	65
6.1	Kein ASN.1 Compiler für Rust	65
6.2	Framework Tokio	65
6.3	Architektur	66
6.3.1	Kommunikationsarchitektur	69
7	Implementierung	71
7.1	Continuous Integration mittels Jenkins	71
7.2	Asynchrone Kommunikation	74
7.3	ASN.1 via Bindgen einbinden	79
7.4	C++ Algorithmus laden	82
7.5	Startparameter	89
7.6	Resistenz gegenüber böswilligen oder defekten Clients	90
8	Auswertung	91
8.1	Testumgebung	91
8.2	Vorgehen	92
8.3	Ergebnisse	93
9	Fazit	97
	Literatur	99
	Abkürzungsverzeichnis	105
	Abbildungsverzeichnis	106

1 Einleitung

Der Begriff „Autonomes Fahren“ hat spätestens seit den Autos von Tesla einen allgemeinen Bekanntheitsgrad erreicht. Damit ein Auto selbstständig fahren kann, müssen erst viele Hürden gemeistert werden. Dazu gehört zum Beispiel das Spurhalten, das richtige Interpretieren von Verkehrsschildern und das Navigieren durch komplexe Kreuzungen.

Bevor ein autonomes Fahrzeug Entscheidungen treffen kann, benötigt es ein möglichst genaues Modell seines Umfelds. Hierzu werden von verschiedenen Sensoren wie Front-, Rück- und Seitenkameras und Abstandssensoren Informationen gesammelt und ausgewertet. Aber vielleicht kann ein Auto nicht immer selbstständig genügend Informationen zu seinem Umfeld sammeln?

Externe Sensorik könnte zusätzliche Informationen liefern, die das Auto selbst nicht erfassen kann. Ein viel zu schneller Radfahrer hinter einer Hecke in einer unübersichtlicher Kreuzung? Eine Lücke zwischen Autos, die ausreichend groß ist, um einzufahren ohne zu bremsen? Die nächste Ampel wird bei Ankunft rot sein, ein schnelles und Umwelt belastendes Anfahren ist nicht nötig? Ideen gibt es zuhauf.

Aber was ist, wenn das externe System aussetzt? Die Antwort hierzu ist einfach: das Auto muss immer selbstständig agieren können, externe Systeme sollen nur optionale Helfer sein. Viel schlimmer ist es dagegen, wenn das unterstützende System falsche Informationen liefert. Eine Lücke zwischen Autos, wo keine ist; eine freie Fahrbahn, wo ein Radfahrer fährt; ein angeblich entgegenkommendes Auto, eine unnötig Vollbremsung, ein Auffahrunfall. Ein solches System muss sicher sein – nicht nur vor Hackern. Es muss funktional sicher sein, Redundanzen und Notfallsysteme müssen jederzeit greifen.

Aber was nützt die beste Idee, die ausgeklügelte Strategie, wenn beim Programmieren nur ein einziges Mal vergessen wurde einen Rückgabewert auf den Fehlerfall zu prüfen? Was nützt es, wenn Strategien für das Freigeben von Speicher in Notfallsituationen einen Sonderfall übersehen haben? Das System handelt total unvorhersehbar.

Was wäre, wenn es eine Programmiersprache geben würde, die so etwas nicht zulässt: die fehlerhafte Strategien zur Compilezeit findet und die Compilation stoppt; die trotz erzwungener Sicherheitsmaßnahmen, schnell und echtzeitnah reagieren kann und sich nicht vor Geschwindigkeitsvergleichen mit etablierten, aber unsicheren Programmiersprachen, scheuen muss?

Diese Arbeit soll zeigen, dass Rust genau so eine Programmiersprache ist und sich für sicherheitsrelevante, hoch parallelisierte und echtzeitnahe Anwendungsfälle bestens eignet.

1.1 Projektkontext

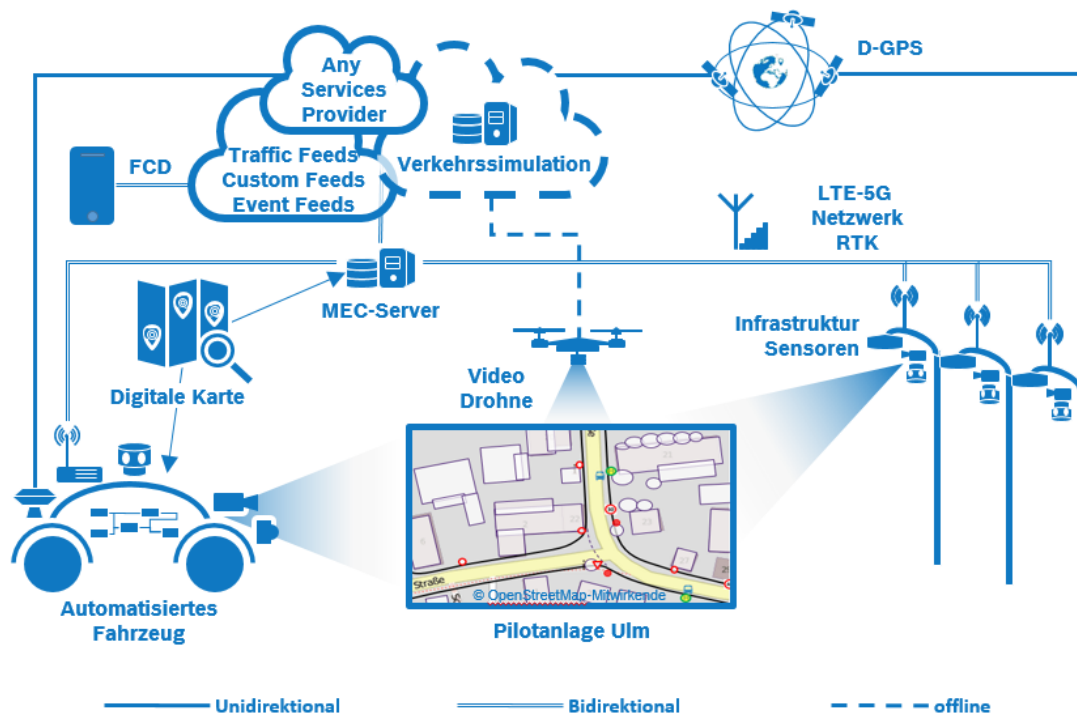


Abbildung 1.1: Übersicht über das Forschungsprojekt¹

Diese Abschlussarbeit befasst sich mit dem Kommunikationsserver von MEC-View². Das MEC-View Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und befasst sich mit der Thematik hochautomatisierter Fahrzeuge. Es soll erforscht werden, ob und inwieweit eine durch externe Sensorik geleistete Unterstützung nötig und möglich ist, um in eine Vorfahrtstraße automatisiert einzufahren.

Das Forschungsprojekt ist dabei ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen mit unterschiedlichen Themengebieten. Die IT-Designers Gruppe beschäftigt sich mit der Implementation des Kommunikationsservers, der auf der von Nokia zur Verfügung gestellten Infrastruktur im 5G Mobilfunk als MEC-Server betrieben wird. Erkannte Fahrzeuge und andere Verkehrsteilnehmer werden von den Sensoren von Osram via Mobilfunk an den Kommunikationsserver übertragen. Der Kommunikationsserver stellt diese Informationen dem Fusionsalgorithmus der Universität Ulm zur Verfügung und leitet das daraus gewonnene Umfeldmodell an die hochautomatisierten Fahrzeuge der Robert Bosch GmbH und der Universität Ulm weiter. Durch hochgenaue, statische und dynamische Karten von TomTom und den Fahrstrategien von Daimler und der Universität Duisburg soll das Fahrzeug daraufhin automatisiert in die Kreuzung einfahren können.

¹Quelle: https://www.uni-due.de/~hp0309/images/Arch_de_V1.png (Legende verschoben)

²Mobile Edge Computing (MEC)-View

1.2 Zielsetzung

Zu dem zuvor beschriebenen Verhalten des Kommunikationsservers besteht bereits eine prototypische Implementation in C++. Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine alternative Implementierung des Kommunikationsservers in Rust zu schaffen. Durch die Garantien (Abschnitt 2.21) von Rust wird erhofft, dass der menschliche Faktor als Fehlerquelle gemindert und somit eine fehlertolerantere und sicherere Implementation geschaffen werden kann.

Eine Ähnlichkeit in Struktur und Architektur zu der bestehenden C++ Implementation ist explizit nicht vonnöten. Eventuelle Spracheigenheiten und einzigartige Features von Rust sollen im vollen Umfang genutzt werden können, ohne durch auferzwungene und unpassende Architekturmuster benachteiligt zu werden. Es ist erwünscht, eine kompetitive Implementation in Rust zu schaffen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in folgende Themengebiete aufgeteilt: Grundlagen, Anforderungs- und Systemanalyse, Systementwurf und Implementation und Auswertung.

Im Themengebiet Grundlagen sollen wesentliche Bestandteile dieser Arbeit erläutert und erklärt werden. Hierzu zählt zum einen die Programmiersprache Rust in ihrer Entstehungsgeschichte, Garantien und Sprachfeatures (Kapitel 2). Zum anderen geht es um die hochperformante, serverbasierte Kommunikationsplattform mit ihren Protokollen (Kapitel 3) und dem Systemkontext, in dem diese betrieben wird.

In der Anforderungs- und Systemanalyse wird der Kontext, in dem der Server betrieben werden soll, genauer betrachtet. Umzusetzende funktionale und nicht-funktionale Anforderungen werden aufgestellt (Kapitel 4), sowie eine Übersicht über die Systeme gegeben, mit denen der Server interagieren soll (Kapitel 5).

Das Themengebiet Systementwurf und Implementation (Kapitel 6 und Kapitel 7) befasst sich mit dem theoretischen und praktischen Lösen der im vorherigen Kapitel aufgestellten Anforderungen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei um eine alternative Implementation handelt, wird zur bestehenden C++ Implementation Bezug genommen. Architektonische Unterschiede im Systementwurf, die sich aufgrund von Sprach- und Bibliotheksunterschiede ergeben, werden hier genauer beschrieben.

Zuletzt wird eine Auswertung der Implementation (Kapitel 8) aufgezeigt und ein Fazit (Kapitel 9) gezogen.

2 Die Programmiersprache Rust

Rust hat als Ziel, eine sichere (siehe Abschnitt 2.21) und performante Systemprogrammiersprache zu sein. Abstraktionen sollen die Sicherheit, Lesbar- und Nutzbarkeit verbessern, aber keine unnötigen Performance-Einbußen verursachen (siehe Unterabschnitt 2.21.7).

Aus anderen Programmiersprachen bekannte Fehlerquellen – wie vergessene `NULL`-Pointer Prüfung, vergessene Fehlerprüfung, „dangling pointers“ oder „memory leaks“ – werden durch strikte Regeln und mit Hilfe des Compilers verhindert (Abschnitt 2.21). Im Gegensatz zu Programmiersprachen, die dies mit Hilfe ihrer Laufzeitumgebung¹ sicherstellen, werden diese Regeln in Rust durch eine statische Lebenszeitanalyse (Abschnitt 2.19) und mit dem Eigentümerprinzip (Abschnitt 2.20) bei der Compilation überprüft und erzwungen. Dadurch erreicht Rust eine zur Laufzeit hohe Ausführungsgeschwindigkeit.

Das Eigentümerprinzip (siehe Abschnitt 2.20) und die Markierung von Datentypen durch Merkmale (siehe Abschnitt 2.9) vereinfacht es zudem, nebenläufige und sichere Programme zu schreiben.

Rust hat in den letzten Jahren deutlich an Beliebtheit gewonnen und ist 2018 das dritte Jahr in Folge als die beliebteste Programmiersprache in einer Umfrage auf Stack Overflow gewählt worden [Ove18]. Die Programmiersprache scheint den sich selbst gesetzten Zielen, performant und sicher zu sein, gerecht zu werden:

„Again, Rust guides you toward good programs“ [BO17, S. 497]

„[...]Leute, die [...] sichere Programmierung haben wollen, [...] können das bei Rust haben, ohne [...] undeterministischen Laufzeiten oder Abstraktionskosten schlucken zu müssen.“ [Lei17, Felix von Leitner in einem Blogeintrag]

„[...] Rust makes it safe, and provides nice tools“ [Qui, Folie 130, Federico Mena-Quintero in „Ersetzen von C Bibliotheken durch Rust“]

„Rust hilft beim Fehlervermeiden“ [Grü17, Federico Mena-Quintero in einem Interview]

„Rust is [...] a language that cares about very tight control“ [fgi17, Diskussion zwischen Programmierern auf Reddit]

¹u.a. Java Virtual Maschine (JVM), Common Language Runtime (CLR)

2.1 Geschichte

In 2006 begann Graydon Hoare die Programmiersprache Rust in seiner Freizeit als Hobbyprojekt zu entwickeln [Rusa]. Als Grund nannte er seine Unzufriedenheit mit der Programmiersprache C++, in der es sehr schwierig sei, fehlerfreien, speichersicheren und nebenläufigen Programmcode zu entwickeln. Zudem beschrieb er C++ als „ziemlich fehlerträchtig“ [Sch13].

Auch Federico Mena-Quintero – Mitbegründer des GNOME-Projekts [Men] – äußerte in einem Interview mit Golem im Juli 2017 seine Bedenken an der Verwendung der „feindseligen“ Sprache C [Grü17]. In Vorträgen vermittelt er seither, wie Bibliotheken durch Implementationen in Rust ersetzt werden können [Qui].

Ab 2009 begann Mozilla die Weiterentwicklung finanziell zu fördern, als mit einfachen Tests die Kernprinzipien demonstriert werden konnten. Die Entwicklung der Programmiersprache, des Compilers, des Buchs, von Cargo, von crates.io und von weiteren Bestandteilen findet öffentlich einsehbar auf GitHub² unter <https://github.com/rust-lang> statt. Dadurch kann sich jeder an Diskussionen oder Implementation beteiligen, seine Bedenken äußern oder Verbesserungen vorschlagen.

Durch automatisierte Tests (siehe Abschnitt 2.15), in Kombination mit drei Veröffentlichungskanälen („release“, „stable“ und „nightly“) und „feature gates“ (siehe Unterabschnitt 2.2.2), wird die Stabilität des Compilers und die der Standardbibliothek (Abschnitt 2.18) gewährleistet.

Rust ist wahlweise unter MIT oder der Apache Lizenz in Version 2 verfügbar [Rus18b].

2.2 Anwendungsgebiet

Das Ziel von Rust ist es, das Designen und Implementieren von sicheren und nebenläufigen Programmen möglich zu machen. Gleichzeitig soll der Spagat geschaffen werden, nicht nur ein sicheres, aber lediglich theoretisches Konstrukt zu sein, sondern in der Praxis anwendbar zu sein. Als Beweis könnte hierbei auf die Umstellung von Firefox auf Rust und Servo – ein minimaler Webbrowser komplett in Rust geschrieben – verwiesen werden [Rusa].

Interessant ist eine Diskussion von 2009, bei der „sicher aber nutzlos“ und „unsicher aber brauchbar“ gegenübergestellt wurde. Programmiersprachen scheinen auf der Suche nach

² Plattform zum Hosten von git-Repositories inklusive eingebautem Issue-Tracker und Wiki. Änderungen an Quellcode können vorgeschlagen und durch die Projektverantwortlichen übernommen werden. Bietet auch die Möglichkeit, eine kontinuierliche Integrationssoftware einzubinden, um automatisierte Tests auf momentanen Quellcode und auch für Änderungen auszuführen. Eine vorgeschlagene Änderung kann somit vor Übernahme auf Kompatibilität überprüft werden.

dem nicht existierenden „Nirvana“ zu sein, das sowohl sichere als auch brauchbare Programmierung verspricht [Hoa09, ab ca Minute 58:20]. Rust möchte dieses Nirvana gefunden haben.

2.2.1 Kompatibilität

Da Rust den LLVM³-Compiler nutzt, erbt Rust auch eine große Anzahl der Zielplattformen die LLVM unterstützt. Die Zielplattformen sind in drei Stufen unterteilt, bei denen verschieden stark ausgeprägte Garantien vergeben werden. Es wird zwischen

- „Stufe 1: Funktioniert garantiert“ (u.a. X86, X86-64),
- „Stufe 2: Compiliert garantiert“ (u.a. ARM, PowerPC, PowerPC-64) und
- „Stufe 3“ (u. a. Thumb (Cortex-Microcontroller))

unterschieden [Rusb]. Diese Unterscheidung wirkt sich auch auf die Stabilisierungsphase und Implementation neuer Funktionen aus (Beispiel „128-bit Integer Support“ [wit]).

2.2.2 Veröffentlichungszyklus

Es stehen Versionen in drei verschiedenen Veröffentlichungskanälen zur Verfügung:

- **nightly**: Version, die einmal am Tag mit dem aktuellen Stand des Quellcodes gebaut wird. Experimentelle und nicht fertige Features sind hier zwar enthalten, aber hinter „feature gates“ versteckt. Diese „Tore“ können durch entsprechende Attribute (siehe Abschnitt 2.14) geöffnet werden.
- **beta**: Alle sechs Wochen werden Features aus der Nightly in eine neue Beta übernommen. Anschließend werden nur noch Fehler aus dieser Version getilgt. Dieser Prozess könnte auch als Reifephase bezeichnet werden.
- **stable**: Nach sechs Wochen wird die aktuellste Beta zur Stable befördert und veröffentlicht. Gleichzeitig wird auch eine neue Beta veröffentlicht.

³ Früher „Low Level Virtual Machine“ [Wik17b], heute Eigenname; ist eine „Ansammlung von modularen und wiederverwendbaren Compiler- und Werkzeugtechnologien“ [LLVa]. Unterstützt eine große Anzahl von Zielplattformen, u.a. X86, X86-64, PowerPC, PowerPC-64, ARM, Thumb, ... [LLVb].

Bei der Compilierung wird der Programmcode zuerst in einen Assembler-ähnlichen Code übersetzt, der daraufhin von LLVM zu Maschinencode der Zielplattform compiliert und optimiert wird.

2.2.3 Ökosystem

Mit Rust wird nicht nur eine Programmiersprache, sondern auch ein umfassendes Ökosystem angeboten.

Cargo ist hierbei vermutlich das größte angebotene Werkzeug. Es löst Abhängigkeiten auf, indem es auf das öffentliche Verzeichnis unter <https://crates.io> zurückgreift und diese entsprechend herunterlädt und compiliert. Zum jetzigen Zeitpunkt (21. Juni 2018) sind über 16.000 Crates öffentlich erreichbar und nutzbar.

Eine Crate kann von jedem veröffentlicht werden, insofern derjenige ein GitHub-Konto besitzt, der Name der Crate noch nicht vergeben ist und der Programmcode compiliert. Die API-Dokumentation der jeweiligen Crate wird dabei automatisiert auf <https://docs.rs> veröffentlicht.

Unter <https://www.rust-lang.org> ist die Website von Rust erreichbar und unter <https://doc.rust-lang.org> sowohl die API-Dokumentation der Standardbibliothek als auch das hauseigene Rust Buch in Version 1 und 2. Die Entwicklung findet dagegen auf GitHub unter <https://github.com/rust-lang> statt.

Neue Bibliotheken für die Standardbibliothek werden zuerst unter <https://github.com/rust-lang-nursery> entwickelt. Dies ermöglicht eine ungestörte Diskussion und Entwicklung, ohne den Veröffentlichungszyklus und die Qualitätsstandards der Standardbibliothek einhalten zu müssen. Nach einer Bewährungsprobe können diese Crates in die Standardbibliothek übernommen werden [Cri15].

Unter <https://internals.rust-lang.org/> finden Diskussionen zu fundamentalen Herangehensweisen und Philosophien der Kernentwickler statt.

Kleine Testprogramme und Experimente können auf dem „Spielplatz“ unter <https://play.rust-lang.org> compiliert und ausgeführt werden, ohne dass hierfür eine lokale Installation benötigt wird. Unter <https://rustup.rs> ist dagegen das Installations- und Aktualisierungsprogramm zu finden.

2.3 Aufbau eines Projektverzeichnisses

Der Aufbau eines Rust Projektverzeichnis ist auf zwei verschiedene Arten möglich. Zum einen gibt es den klassischen Aufbau, in dem lediglich der Programmcode liegt und der Compiler direkt aufgerufen und parametrisiert wird. Zum anderen wird der Aufbau als Crate (siehe Unterabschnitt 2.3.2) empfohlen, da dadurch Abhängigkeiten automatisch aufgelöst werden können, aber auch Metainformationen bezüglich des Autors, der Version und der Abhängigkeiten hinterlegt werden müssen. Ein klassischer Aufbau ist nur selten anzutreffen.

2.3.1 Klassisch

```
1 src/  
2 |-- main.rs  
3 |-- functionality.rs  
4 |-- module/  
5     |-- mod.rs  
6     |-- functionality.rs  
7     |-- submodule/  
8         |-- mod.rs  
9         |-- functionality.rs
```

Listing 2.1: Verzeichnisstruktur des Quelltext-Verzeichnisses

Das Quelldatei-Verzeichnis sollte entweder eine *main.rs* für ausführbare Programme oder eine *lib.rs* für Bibliotheken enthalten. Während der Paketmanager Cargo eine solche Benennung als Standardkonvention erwartet, kann bei manueller Nutzung des Compilers auch ein anderer Name für die Quelldatei vergeben werden.

Der Compiler startet in der Wurzeldatei und lädt weitere Module, die durch `mod module;` gekennzeichnet sind (ähnlich `#include "module.h"` in C/C++). Ein Modul kann dabei eine weitere Quelldatei oder ein ganzes Verzeichnis sein. Ein Verzeichnis wird aber nur als

gültiges Modul interpretiert, wenn sich eine *mod.rs*-Datei darin befindet. Um Datentypen und Funktionen aus einem Modul nutzen zu können, ohne deren kompletten Pfad bei jeder Nutzung auszuschreiben, können sie durch zum Beispiel `use module::functionality::Data;` in dem aktuellen Namensraum bekannt gemacht werden. Dies ähnelt einem `import` aus Java oder einem `using` aus C#.

Wie bereits angedeutet, wird in Rust nicht eine „Klasse“, Datenstruktur oder Aufzählung pro Datei erwartet, sondern eine Quelldatei entspricht einem Modul. Dieses umfasst in vielen Fällen wenige, aber mehrere Datenstrukturen, zugehörige Aufzählungen und Fehlertypen.

2.3.2 Als Crate

Eine „Crate“ (dt. Kiste/Kasten) erweitert den klassischen Aufbau um eine *Cargo.toml* Datei, in der Metainformationen zum Projekt hinterlegt werden. Durch die Benutzung des Werkzeugs „Cargo“ (dt. Fracht/Ladung) können Abhängigkeiten automatisch aufgelöst, heruntergeladen und compiliert werden.

Eine Crate kann entweder ein ausführbares Programm oder eine Bibliothek sein. Davon abhängig ist die Wurzeldatei *src/main.rs* (für ein ausführbares Programm) oder *src/lib.rs* (für eine Bibliothek). Mit dem Erzeugen einer Crate (`cargo new --bin meinProg` bzw. `cargo new --lib meineBib`) wird auch gleichzeitig `git`⁴ für das Verzeichnis initialisiert.

```
1 crate/
2 |-- Cargo.toml
3 |-- src/
4 |-- ...
```

Listing 2.2: Vereinfachte Verzeichnisstruktur einer „crate“

2.4 Hello World

```
1 fn main() {
2     println!("Hello World");
3 }
```

Listing 2.3: „Hello World“ in Rust

Der Programmcode in Listing 2.3 gibt auf der Konsole `Hello World` aus. Dass `fn` die Funktion `main` definiert und diese der Startpunkt des Programms ist, wird vermutlich wenig überraschend sein. Viel überraschender ist im Gegensatz eher das Ausrufezeichen in Zeile 2, da es auf den ersten Blick dort nicht hingehören sollte. In Rust haben Ausrufezeichen und Fragezeichen besondere Bedeutungen, weswegen die Verwendung in Zeile 2 so richtig ist.

Die Bedeutung des Fragezeichens dient zum schnelleren Auswerten von `Result<_, _>`-Werten und wird in Unterabschnitt 2.21.3 genauer erklärt. Das Ausrufezeichen kennzeichnet, dass der ansonsten augenscheinliche Funktionsaufruf tatsächlich ein Aufruf einer Makrofunktion ist.

Eine Funktion `println` gibt es nicht, auch keine aus C erwarteten Funktionen wie `printf`, `fputs` oder `sprintf`. Eine Ausgabe erfolgt durch das `println!` Makro, welches einen `String` durch Nutzung des `format!` Makros erstellt und formatiert. Daraufhin wird das `writeln!` Makro verwendet, um die formatierte Zeichenkette auf die Standardausgabe zu schreiben.

⁴ (dt. Blödmann) ist eine Software zur Versionierung von Quelldateien, entwickelt von Linus Torvalds 2005 [Wik18b].

2.5 Einfache Datentypen

Die Datentypen in Rust sind im Wesentlichen die üblichen Verdächtigen: `bool` für boolesche Ausdrücke; `char` für ein einzelnes Unicode Zeichen; `str` für eine Zeichenkette; `u8`, `i8`, `u16`, `i16`, `u32`, `i32`, `u64`, `i64`, (bald `u128`, `i128` [Mat16]) und `usize`, `isize` für ganzzahlige Werte; `f32`, `f64` für Fließkommazahlen in einfacher und zweifacher Präzision; Arrays und Slices [Rusg].

Ganzzahlige Datentypen mit einem führenden `u` sind vorzeichenlos (*unsigned*), vorzeichenbehaftete Datentypen (*signed*) sind dagegen mit einem `i` gekennzeichnet. Fließkommazahlen sind stattdessen mit einem führenden `f` (*floating point*) gekennzeichnet. Die darauf folgende Zahl gibt die Anzahl der Bits wieder, die für den Datentyp verwendet werden. Die einzige Ausnahme sind die ganzzahligen Datentypen `usize` und `isize`, da diese immer so groß sind, wie die Architektur der Zielplattform. Für die Indexierung eines Arrays oder einer Slice würden andere Datentypen, mit einer fest definierten Größe, keinen Sinn ergeben, da das Maximum an adressierbaren Elementen von der Architektur der Zielplattform abhängig ist.

Durch dieses angewandte Schema der Bezeichnung der Datentypen wird eine Verwirrung, wie zum Beispiel in C, unterbunden. Dort haben die primitiven Datentypen (`short`, `int`, `long`, ..) keine definierte Größe, sondern sind abhängig vom eingesetzten Compiler und der Zielplattform [DD13, S. 187]. Erst ab C99 wurden zusätzliche, aber optionale, ganzzahlige Datentypen mit fester Größe definiert [GD14, S. 141].

Konstanten können in Rust direkt einem Datentyp zugewiesen werden, indem dieser angehängt wird: `4711u16` ist vom Datentyp `u16`. Unterstriche dürfen an beliebiger Stelle Ziffern trennen, um die Lesbarkeit zu erhöhen: `1_000_000_f32`. Eine Schreibweise in Binär (`0b0000_1000_u8`), in Hexadezimal (`0xFF_08_u16`) oder in Oktal (`0o64_u8`) ist ebenso möglich. Konstante Zeichen und Zeichenketten können automatisch durch ein vorangestelltes `b` in Bytes gewandelt werden: `b'b'` entspricht `0x62_u8` und `b"abc"` entspricht `&[0x61_u8, 0x62_u8, 0x63_u8]`.

Arrays haben immer eine zur Compilezeit bekannte Größe und müssen auch immer mit einem Wert initialisiert werden (siehe Unterabschnitt 2.21.1). Dynamische Arrays auf dem Stack gibt es (noch? [Rust]) nicht, stattdessen wird auf die Vektor Implementierung der Standardbibliothek verwiesen (siehe Abschnitt 2.18). Die Notation für Arrays ist `[<Füllwert>; <Größe>]`, wobei die Größe ein konstanter Wert sein muss. `[0_u8; 128]` steht demnach für ein 128 Byte langes Array mit Werten vom Datentyp `u8`, das mit 0-en initialisiert ist.

„Slices“ (dt. Scheiben/Stücke) bezeichnet in Rust Referenzen auf Arrays oder auf Teilbereiche von Arrays und Slices. In einem so genannten „fat pointer“ wird der Startpunkt und die Größe der Slice gespeichert (siehe auch Abbildung 2.2 auf Seite 25). Hierdurch kann ein Zugriff außerhalb den Grenzen einer Slice oder eines Arrays verhindert werden, ein Buffer-Overflow ist in Rust daher nicht möglich.

Die Notation einer Slice ähnelt der eines Arrays: `&[<Datentyp>]`. Eine Slice kann zudem immer nur über eine Referenz angesprochen werden (siehe Abschnitt 2.6). Um eine Slice auf ein Array oder eine andere Slice zu erhalten, muss der Start- und Endindex des Teilbereiches angegeben werden. Falls kein Start- oder Endindex angegeben wird, wird das jeweilige Limit übernommen.

Folgendes Beispiel soll die Notation von Arrays und Slices verdeutlichen:

```
1 fn main() {  
2     let b : [u8; 10] = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9];  
3     for b in &b[2..5] {  
4         print!("{}", b);  
5     }  
6 }
```

Listing 2.4: Beispiel eines Arrays und einer Slice

Das in Listing 2.4 gezeigte Programm gibt auf der Konsole `2, 3, 4,` aus.

Variablen werden durch das `let` Schlüsselwort gebunden. Das heißt, der Variablen wird die Eigentümerschaft für den Wert zugewiesen. Ausnahmen können Datentypen mit dem Merkmal `Copy` bilden, da diese eine implizite Kopie erlauben (siehe Abschnitt 2.9). Anstatt eine Variable optional als unveränderlich zu kennzeichnen (`const` in C, `final` in Java), wird eine Variable in Rust optional als veränderlich gekennzeichnet (`mut`). Standardmäßig ist eine Variable unveränderlich.

Lokale Typinferenz

Da Rust ein statisches Typensystem mit lokaler Typinferenz besitzt, muss der Datentyp einer Variable nicht notiert werden, sondern kann automatisiert erkannt werden. Dies gilt aber nur lokal, also innerhalb von Funktionen und Closures. Parameterlisten und Rückgabewerte von Funktionen müssen die Datentypen explizit angeben (siehe Abschnitt 2.7).

```
1 fn main() {  
2     let a = 10_u32; // Datentyp wird durch Konstante bestimmt  
3     let b : u32 = a; // b muss vom Typ u32 sein  
4     let c = b;      // c ist vom Typ u32, weil b u32 ist  
5 }
```

Listing 2.5: Beispiel für lokale Typinferenz

2.6 Zusammengesetzte Datentypen

Die Programmiersprache Rust kennt neben den einfachen Datentypen (Abschnitt 2.5) weitere Möglichkeiten Daten zu organisieren:

- ein Tupel, das mehrere Werte namenlos zusammenfasst: `(f32, u8): a.0 = 1.0_f32,`
- eine Datenstruktur, die wie in C Datentypen namenbehaftet zusammenfasst: `struct Punkt { x: f32, y: f32 }: p.x = 1.0_f32,`
- und Aufzählungen: `enum Bildschirm { Tv, Monitor, Leinwand }.`

Im Vergleich zu C kann ein Eintrag in einem `enum` gleichzeitig Daten wie eine Datenstruktur oder ein Tupel halten, oder lediglich einen Ganzzahlwert repräsentieren.

Mit dem `type` Schlüsselwort können Aliase erstellt oder im Falle von FFI (siehe Abschnitt 2.22) aufgelöst werden: `type Vektor = (f32, f32);` Felder einer Struktur können zudem mit `pub` oder `pub(crate)` gekennzeichnet werden (siehe Abschnitt 2.11).

Seit Version 1.19 ist auch der Datentyp `union` in Rust verfügbar [Rus17]. Eine `union` kann aber nur in `unsafe`-Blöcken verwendet werden, da der Compiler eine ordnungsgemäße Nutzung nicht überprüfen kann. Für diese Abschlussarbeit hat der Datentyp aber keine Relevanz und wird daher nicht weiter erwähnt.

Referenzen

Auf alle Datentypen können Referenzen erstellt werden, um auf diese zuzugreifen, ohne sie zu konsumieren. In Rust spricht man dann oft davon, den Wert zu „leihen“, da sich der Eigentümer nicht ändert, sondern für den Gültigkeitsbereich der Referenz eine andere Variable auf den Wert verweist. Wie bei Variablen, wird zwischen Referenzen auf unveränderlichen und veränderlichen Werte unterschieden (siehe Abschnitt 2.20). Die Notation für Referenzen auf unveränderliche Werte ist `&<Datentyp>`. Erwartungsgemäß ist `&mut <Datentyp>` die Notation für Referenzen auf veränderliche Werte. Referenzen auf Referenzen sind möglich. Eine manuelle Dereferenzierung einer Referenz ist in den allermeisten Fällen nicht nötig, sondern wird vom Compiler vorgenommen. In Fällen, in denen dies nicht wie erwartet automatisch geschieht, kann eine manuelle Dereferenzierung durch den `*`-Operator erzwungen werden.

2.7 Funktionen, Ausdrücke und Statements

Funktionen werden durch `fn` gekennzeichnet, gefolgt von dem Funktionsnamen, der Parameterliste und zuletzt der Datentyp für den Rückgabewert. Selbst wenn kein expliziter Rückgabebetyp angegeben ist, wird formal `()` zurückgegeben; `()` entspricht etwa `void` aus bekannten Programmiersprachen. Die Parameterliste unterscheidet sich von bekannten Programmiersprachen wie C und Java, indem zuerst der Variablenname und darauf folgend der Datentyp notiert wird.

```
1 fn add(a: f32, b: f32) -> f32 {  
2     a + b  
3 }
```

Listing 2.6: Beispiel einer Funktion

Obwohl in Zeile 2 von Listing 2.6 kein `return` zu sehen ist, wird trotzdem das Ergebnis der Addition zurückgegeben. Dies liegt daran, dass in Rust vieles ein Ausdruck ist und somit einen Rückgabewert liefert [Rush]. Auch ein if-else ist ein Ausdruck und kann einen Rückgabewert haben. Ein bedingter Operator (`?:`) ist somit unnötig, da stattdessen ein if-else verwendet werden kann: `let a = if b { c } else { d };`.

2.8 Implementierung einer Datenstruktur

Zu einer Datenstruktur oder Aufzählung kann ein individuelles Verhalten implementiert werden. In dieser Kombination ähneln diese Konstrukte sehr einer Klasse aus bekannten objektorientierten Programmiersprachen, wie zum Beispiel Java, C# oder C++ (siehe auch 2.20).

Einen Konstruktor gibt es jedoch nicht; lediglich die Konvention, eine statische Funktion `new` stattdessen zu verwenden [Rusi]:

```
1 struct Punkt {  
2     x: f32,  
3     y: f32,  
4 }  
5  
6 impl Punkt {  
7     pub fn new(x: f32, y: f32) -> Punkt {  
8         Punkt { x, y }  
9     }  
10 }
```

Listing 2.7: Punkt Datenstruktur mit einem „Konstruktor“

Manchmal wird auch `Default` implementiert (siehe Abschnitt 2.9), wodurch eine statische Funktion `default()` als Konstruktor ohne Parameter bereitgestellt wird.

Da eine Funktionsüberladung nicht möglich ist, sollen stattdessen sprechende Name verwendet werden. Der `Vec<_>` der Standardbibliothek (siehe Abschnitt 2.18) bietet zum Beispiel zusätzlich `Vec::with_capacity(capacity: usize)` an, um einen Vektor mit einer bestimmten Kapazität zu initialisieren.

Funktionen, die sich auf eine Instanz beziehen, haben als ersten Parameter die Variable `self` (konsumierend), `&self` (lesend leihend) oder `&mut self` (exklusiv leihend) deklariert. Die `self`-Variable entspricht dabei dem `this` aus C++, C# oder Java: `fn x_eq_y(&self) -> bool { self.x == self.y }`. Ein großgeschriebenes `Self` bezieht sich auf den eigenen Typ. Deshalb könnte die Funktion aus Listing 2.7 auch folgende Signatur haben: `pub fn new(x: f32, y: f32) -> Self ...`. Dies ist aber selten und oft nur in generischem Code anzutreffen (siehe Abschnitt 2.9).

Für Funktionen können auch die Zugriffsmodifikatoren festgelegt werden (siehe Abschnitt 2.11).

2.9 Generalisierung durch Traits

Ähnlich wie Java oder C#, bietet Rust durch einen eigenen Typ die Möglichkeit, ein gewünschtes Erscheinungsbild zu generalisieren, ohne gleichzeitig eine Implementation vorzugeben. In Rust wird dieser Typ „Trait“ (dt. Merkmal) genannt.

Für Merkmale werden Funktionen in einem entsprechenden `trait <Name> { }`-Block ohne Rumpf deklariert. Optional kann auch ein Standardrumpf implementiert werden, der bei einer Spezialisierung überschrieben werden darf. Auch auf ein Merkmal kann ein Zugriffsmodifikator gesetzt werden (siehe Abschnitt 2.11).

Die Implementation eines Merkmals wird für jeden Datentyp in einem separaten Codeblock vorgenommen und entspricht der Notation `impl Merkmal for Datentyp { fn ... }`. Alternativ können Implementationen auch für ganze Gruppen von anderen Merkmalen vorgenommen werden: `impl<T> Merkmal for T where T: Clone { ... }` (entspricht: „implementiere `Merkmal` für all die, die `Clone`-bar sind“).

In Zukunft – oder jetzt in „nightly“ und hinter dem „feature gate“ `specialization` – wird es möglich sein, ein Standardverhalten für Gruppen zu implementieren und dieses, für einen speziellen Typ, zu überschreiben [Rusu].

Merkmale unterscheiden sich in ihrer Handhabung gegenüber anderen Datentypen, da sie im Allgemeinen keine bekannte Größe zur Compilezeit haben. Während dies in Programmiersprachen wie Java und C# automatisch durch die Darstellung abstrahiert und versteckt wird, hat ein Entwickler in Rust mehr Kontrolle über die Handhabung.

Dabei gibt es mehrere Vorgehensweisen:

- Die einfachste Art erfolgt über das Leihen mittels Referenz: `fn foo(bar: &Bar)` oder `fn foo(bar: &mut Bar)` – ein Unterschied zu anderen Datentypen ist nicht zu erkennen. Hierbei werden Funktionen dynamisch über eine „vtable“ aufgerufen, wodurch höhere Laufzeitkosten entstehen. In Zukunft soll dieser Syntax eventuell durch `fn foo(bar: &dyn Bar)` und `fn foo(bar: &mut dyn Bar)` ersetzt werden, um deutlicher auf den dynamischen Aufruf hinzuweisen [Rusv].
- Alternativ kann das Objekt, das das geforderte Merkmal implementiert, auf den Heap verschoben und anschließend davon die Eigentümerschaft übertragen werden. Dies ist möglich, da das Verschieben auf den Heap die Größe der `Box` nicht beeinflusst. Eine `Box` ist letztendlich nur ein Pointer auf einen Speicherbereich auf dem Heap. Ein Merkmal in einer `Box` wird „Trait-Object“ genannt und eine Funktionsdeklaration könnte so aussehen: `fn foo(bar: Box<Bar>)`.
- Die performanteste Alternative ist eine spezialisierte Funktion. Der Compiler dupliziert automatisch für jeden Datentyp die Funktion, setzt diesen ein und führt Optimierungen für den jeweiligen Datentyp durch (ähnlich einer Templateklasse in C++). In der Notation wird ein lokaler Typ deklariert, der als Bedingung ein oder mehrere Merkmale implementiert haben muss: `fn foo<T: Bar>(bar: T)`.

Eine Deklaration `fn foo(bar: Bar)` für das Merkmal `Bar` ist nicht möglich, da zur Compilezeit eine eindeutige Größe nicht bekannt ist. Der zu reservierende Speicher für die Variable kann nicht bestimmt werden, weswegen eine Übergabe über den Stack nicht möglich ist.

Im Folgenden werden oft anzutreffende und wichtige Merkmale aus der Standardbibliothek kurz erläutert:

- `Send`: Markiert einen Datentyp als zwischen Threads übertragbar. Automatisch für alle Datentypen implementiert, bei denen auch alle beinhalteten Datentypen von Typ `Send` sind. Manuelle Implementation ist nicht sicher [Rusj].
- `!Send`: Verhindert dagegen, dass ein Wert zu anderen Threads übertragen werden darf. Somit können ansonsten rein textuell beschriebene Beschränkungen, wie zum Beispiel für den OpenGL-Kontext, durch den Compiler überprüft und erzwungen werden.
- `Sync`: Markiert einen Datentyp als zwischen Threads synchronisierbar, d. h. mehrere Threads dürfen gleichzeitig lesend darauf zugreifen. `!Sync` verbietet dies hingegen. Wird automatisch für alle Datentypen implementiert, bei denen auch alle beinhalteten Datentypen von Typ `Sync` sind. Eine manuelle Implementation ist nicht sicher [Rusj].
- `Sized`: Verlangt eine zur Compilezeit bekannte Größe. `?Sized` erlaubt dagegen eine unbekannte Größe zur Compilezeit.

- `Copy`: Markiert einen Datentyp, der durch einfaches Speicherkopieren (etwa „memcpy“) vervielfacht werden kann. Verlangt, dass alle beinhalteten Datentypen auch `Copy` sind. Alle einfachen Datentypen sind bereits `Copy`.
- `Clone`: Markiert einen Datentyp, der vervielfacht werden kann, dies jedoch nicht durch Kopieren des Speichers möglich ist – zum Beispiel da der Referenzzähler von `Arc` oder `Rc` erhöht werden muss. Stellt die Funktion `clone` bereit, die dafür explizit aufgerufen werden muss. Verlangt für eine automatisierte Implementation, dass alle beinhalteten Datentypen auch `Clone` sind. Alle einfachen Datentypen sind bereits `Clone`.
- `Debug` und `Display`: Erzwingt die Implementation von Funktionen, um einen Datentyp als Text darzustellen. Entweder mit möglichst vielen Zusatzinformationen (`Debug`) oder auf das Wesentliche reduziert (`Display`). Verlangt für eine automatisierte Implementation, dass alle beinhalteten Datentypen auch `Debug` bzw. `Display` sind.
- `Default`: Erzwingt die Implementation einer statische Methode `default()`, die wie ein leerer Standardkonstruktor von Java oder C# wirkt: Erzeugung einer neuen Instanz mit Standardwerten. Verlangt für eine automatisierte Implementation, dass alle beinhalteten Datentypen auch `Default` sind.
- `PartialEq`: Verlangt die Implementation einer Funktion, um mit Instanzen des gleichen Typs verglichen werden zu können. Im Vergleich zu `Eq` erlaubt `PartialEq`, dass Typen keine volle Äquivalenzrelation haben. Dies ist zum Beispiel für den Vergleich von Fließkommazahlen wichtig, da laut IEEE754 `Nan` ungleich zu allem ist, auch zu sich selbst (`Nan != Nan`) [Wik18c][BO17, S. 272-275][Rusq].
- `Eq`: Erlaubt dem Compiler einen Vergleich auf Bit-Ebene durchzuführen, ungeachtet des Datentyps [Rusr].
- `PartialOrd`: Verlangt die Implementation einer Funktion, damit Instanzen des gleichen Typs sortiert werden können. Erlaubt aber auch, dass Werte zueinander nicht sortierbar sind. Dies ist zum Beispiel für Fließkommazahlen wichtig, da laut IEEE754 `Nan` nicht sortiert werden kann (weder `Nan <= 0` noch `Nan > 0` ergibt `true`) [Wik18c][BO17, S. 275-277][Russ].
- `Ord`: Erzwingt im Gegensatz zu `PartialOrd`, dass Werte zueinander immer geordnet werden können.
- `Drop`: Verlangt die Implementation einer Funktion, die kurz vor der Speicherfreigabe eines Objekts aufgerufen wird (ähnlich Destruktor aus C++).

Mit dem Attribut `#[derive(..)]` ist eine automatisierte Implementation genannter Merkmale oft möglich, insofern die jeweiligen Bedingungen erfüllt sind. So kann im allgemeinen `#[derive(Clone)]` genutzt werden, um eine Datenstruktur oder eine Aufzählung automatisch klonbar zu machen, oder `#[derive(Debug)]`, um automatisch alle Felder in Text wandeln zu können. Ein ergonomisches, aber auch Fehler reduzierendes Feature.

2.10 Closure

Mit Closures bietet Rust ein entsprechendes Sprachkonstrukt um Lambdas aus Programmiersprachen wie Java, JavaScript, C# und C++ darstellen zu können. Übergabeparameter befinden sich in der Notation zwischen zwei senkrechten Strichen, deren Typ nicht explizit angegeben werden muss. In geschweiften Klammern ist anschließend der Rumpf zu finden. Wenn der Rumpf nur eine Zeile groß ist, sind die geschweiften Klammern optional: `let adder = |a, b| a + b;`. Der Aufruf unterscheidet sich nicht von einem normalen Funktionsaufruf: `let sum = adder(1, 2);`.

Eine Closure ist eine automatisch generierte Datenstruktur, die eines der folgenden Merkmale automatisch implementiert:

- `Fn<Args>` mit `fn call(&self, arg: Args) -> Self::Output`: Ein mehrfacher Aufruf ist möglich, ohne dass Nebeneffekte auftreten, da die Eigenreferenz unveränderlich ist.
- `FnMut<Args>` mit `fn call_mut(&mut self, arg: Args) -> Self::Output`: Da die Eigenreferenz veränderlich ist, können Nebeneffekte auftreten.
- `FnOnce<Args>` mit `fn call_once(self, arg: Args) -> Self::Output`: Ein Aufruf ist wegen des Eigenkonsums nur einmalig möglich.

Closures in Rust sind sehr performant (siehe Unterabschnitt 2.21.7), weswegen eine Anwendung selbst in zeitkritischen Anwendungsfällen problemlos möglich ist [BO17, S. 310].

2.11 Zugriffsmodifikatoren

Zugriffsmodifikatoren erlauben es in Rust, Module, Datenstrukturen, Aufzählungen, Merkmale und Funktionen gegenüber Nutzern einer Crate und anderen Modulen sichtbar zu machen. Der standardmäßige Zugriffsmodifikator limitiert die Sichtbarkeit auf das Modul, indem die Deklaration stattgefunden hat und wird durch keine Notation eines Zugriffsmodifikators erreicht. Um die Sichtbarkeit auf die gesamte Crate zu erhöhen, wird ein `pub(crate)` vorangestellt. Mit `pub(super)` wird der entsprechende Typ nur für das hierarchisch darüber liegende Modul sichtbar und mit `pub(foo::bar)` kann die Sichtbarkeit auch auf ein spezifiziertes Modul limitiert werden. Mit `pub` ist die Deklaration für alle sichtbar.

Zugriffsmodifikatoren können auch vor `use` Anweisungen geschrieben werden, um entsprechende Datentypen zusätzlich unter einem neuen Namensraum bekannt zu machen.

2.12 Musterabgleich

Der `match` Ausdruck ist ein sehr mächtiges Werkzeug in Rust und entspricht einem stark erweiterten `switch` aus Programmiersprachen wie C, Java oder C#. Mit ihm ist es nicht nur möglich, einen Wert einer Aufzählung aufzulösen, sondern Muster inklusive Konstanten zu vergleichen und gleichzeitig auf eventuell beinhaltete Werte zuzugreifen oder diese zu konsumieren. In einem `match` wird immer der erste kompatible Codepfad ausgeführt.

```
1 fn main() {  
2     let value : Option<&str> = Some("text");  
3     match value {  
4         Some("test") => println!("Nur ein Test"),  
5         Some(value) => println!("Wert ist: {}", value),  
6         None => println!("Kein Wert"),  
7     };  
8 }
```

Listing 2.8: Kompletter `match` Ausdruck

Die Ausgabe des Programms aus Listing 2.8 ist `Wert ist: text`. In dem Beispiel ist `value` aus Zeile 2 und 3 `Some("text")`. Sowohl Zeile 4 als auch Zeile 5 prüfen auf die Variation `Some`, aber nur der Codepfad in Zeile 5 wird ausgeführt. Dies liegt an der zusätzlichen Prüfung für den beinhalteten Wert, der für den Codepfad in Zeile 4 mit `"test"` übereinstimmen müsste. Da eine Übereinstimmung nicht vorliegt, trifft als nächstes Zeile 5 zu, in der nur die Variation `Some` übereinstimmen muss. Die Variable `value` bindet bei dieser Übereinstimmung den Wert, um ihn für den Programmcode ansprechbar zu machen. Falls dies nicht nötig wäre, könnte stattdessen auch die Wildcard `_` verwendet werden.

Das `match` Statement von Rust verlangt, dass eine Musterabgleichung immer zu einem Ergebnis führt. Dementsprechend müssen entweder alle Varianten einer Aufzählung aufgeführt sein oder ein Standardpfad vorhanden sein `_ => { }`. Hiermit wird verhindert, dass, nachdem eine Aufzählung um eine Variation erweitert wurde, eine Musterabgleichung nicht um das neue Element ergänzt wurde.

Wenn nur ein konkreter Fall von Bedeutung ist, kann dies in der verkürzten `if let` Schreibweise notiert werden:

```
1 fn main() {  
2     let mut value : Option<u32> = Some(4);  
3     if let Some(ref mut value) = value {  
4         *value += 1;  
5     }  
6     println!("{:?}", value); // "Some(5)"  
7 }
```

Listing 2.9: Vereinfachter `if let` Ausdruck

Ein weiterer Unterschied von Listing 2.9 gegenüber Listing 2.8 ist in Zeile 3 das Schlüsselwort `ref`, wodurch der Konsum des Wertes verhindert wird. Das Schlüsselwort `mut` erlaubt zudem eine Änderung des Wertes, weswegen `value` in Zeile 4 vom Typ `&mut u32` ist. Die Dereferenzierung mit Addition wird somit ermöglicht. Auch hier kann die Wildcard verwendet werden: `if let Some(_) = value { println!("It's something!"); }`.

Weitere Möglichkeiten, Muster zu erkennen, sind ab Seite 221 in [BO17] in detaillierter Ausführung zu finden. Dazu gehören unter anderem die „guard expression“, „bindings“ und „ranges“. Aufgrund des Umfangs und die Irrelevanz für diese Arbeit wird hier auf eine weitere Vertiefung verzichtet.

2.13 Schleifen

Rust kennt die Schleifen `for`, `while` und `loop`. Eine `do-while` Schleife, wie in anderen Programmiersprachen, gibt es dagegen nicht. Die einfachste dieser Schleife ist `loop { }`, da der Rumpf der Schleife ohne Bedingung wiederholt wird. Durch diesen Schleifentyp wird dem Compiler mehr über den eigentlichen Verwendungszweck mitgeteilt und bei der Codeanalyse anders bewertet als eine `while true { }` Schleife [Rusk]. Somit ist eine, auf den ersten Blick unverständliche Formulierung wie `while (true) { }` oder `for(;;) { }` unnötig. Listing 2.10 zeigt, dass eine `loop`-Schleife zusätzlich auch einen Wert zurück geben kann (`break` in Zeile 9).

```
1 const VERBOTENES_ZEICHEN : &str = "#";
2
3 fn main() {
4     let name = loop {
5         let name = ...; // Lese Zeile von stdin
6         if name.contains(VERBOTENES_ZEICHEN) {
7             println!("Versuchs nochmal");
8         } else {
9             break name;
10        }
11    };
12
13    println!("Gültiger Name: {}", name);
14 }
```

Listing 2.10: Beispiel Verwendung einer `loop` Schleife

Die `for` Schleife erwartet immer etwas iterierbares und entspricht damit einer `foreach` aus anderen Programmiersprachen. Eine inkrementelle Laufvariable, zum Beispiel für die Indizierung eines Arrays, wird durch das Iterieren über einen Zahlenstrahl dargestellt. In Listing 2.11 ist dies in Zeile 4 zu sehen, während in Zeile 8 direkt über die Werte des Arrays iteriert wird.

```
1 fn main() {
2     let array = [1, 2, 3, 4, 5, 6];
3
4     for i in 0..array.len() {
5         println!("Index: {}, Wert: {}", i, array[i]);
6     }
7
8     for a in &array {
9         println!("Wert: {}", a);
10    }
11 }
```

Listing 2.11: Beispiel Verwendung einer `for` Schleife

Die `while` Schleife ist die einfachste aller Schleifen, da das Verhalten dem aus anderen Programmiersprachen entspricht. Der Rumpf wird so lange wiederholt, wie die Bedingung `true` ergibt. Das Beispiel in Listing 2.12 gibt eine Sekunde lang wiederholend `Zeit noch nicht um` auf der Konsole aus.

```
1 fn main() {
2     let start = std::time::Instant::now();
3     while start.elapsed().as_secs() < 1 {
4         println!("Zeit noch nicht um");
5     }
6 }
```

Listing 2.12: Beispiel Verwendung einer `while` Schleife

Auch in `while` Schleifen können verkürzte Musterabgleichungen durchgeführt werden. Die Notation ähnelt dem `if let` und ist in Listing 2.13 zu sehen. Die eingelesene Zeile wird hierbei so lange wieder auf der Konsole ausgegeben, bis beim Einlesen ein Fehler auftritt.

```
1 use std::io::stdin;
2
3 fn main() {
4     let mut eingabe = String::new();
5     while let Ok(_) = stdin().read_line(&mut eingabe) {
6         println!("Eingabe: {}", eingabe.trim());
7         eingabe.clear();
8     }
9 }
```

Listing 2.13: Beispiel Musterabgleichung in einer `while` Schleife

2.14 Attribute

In Rust können Funktionen, Datentypen und manche Codeblöcke mit Attributen versehen werden, um dem Compiler weitere Informationen bereitzustellen. Attribute können dabei bestimmte Merkmale automatisiert implementieren (siehe Abschnitt 2.9), Unit-Tests markieren (siehe Abschnitt 2.15), Bibliotheken spezifizieren (siehe Abschnitt 2.22), „Tore zu Besonderheiten“ (engl. feature gates) öffnen (siehe Unterabschnitt 2.2.2) oder Zielplattformen spezifizieren [Rusl].

Ein Attribut folgt der Notation `#[<Name>(<optionale Parameter>)]`. So compiliert eine Funktion mit dem Attribut `#[cfg(unix)]` nur für Unix Systeme, ein Attribut `#[cfg(not(unix))]` lässt die Funktion dagegen für alle Systeme compilieren, die nicht ein Unix-System sind. Dies ermöglicht zum Beispiel mehrere Funktionen mit dem gleichen Namen, aber für unterschiedliche Plattformen zu schreiben. Der Compiler übernimmt dann nur die zur Zielplattform passende Funktion.

2.15 Unit- und Integrationstests

Unit-Tests und Integrationstests können in Rust ohne eine weitere Bibliothek durchgeführt werden. Für Unit-Tests müssen Module und Funktionen mit entsprechenden Attributen versehen sein, Integrationstests müssen im Verzeichnis `tests/` gespeichert sein [Rusm].

Unit-Tests sind per Konvention immer in der Datei mit der zu testenden Funktionalität zu finden. Diese privaten, inneren Module, die konventionell „tests“ benannt sind, werden durch das Attribut `#[cfg(test)]` markiert. Durch diese Markierung wird der beinhaltete Code nur für das Ausführen der Tests compiliert und spart bei normaler Compilation Zeit. `cargo test` führt alle auffindbaren Funktionen mit dem Attribut `#[test]`, leeren Parameterlisten und keinen Rückgabewerten aus. Die Makros `assert!(a)`, `assert_eq!(a, b)` und `assert_ne!(a, b)` prüfen Ergebnisse und lösen `panic!` aus (siehe Abschnitt 2.17), falls Ergebnisse nicht den erwarteten Werten entsprechen. Ein Test gilt als bestanden, wenn keine `panic!` ausgelöst wurde.

Integrationstests unterscheiden sich von Unit-Tests, da sie die eigene, zu testende Crate, als externe Crate betrachten. Dadurch kann nur auf öffentliche Bestandteile zugegriffen und unzureichende Zugriffsrechte aufgespürt werden. Module mit dem Attribut `#[cfg(test)]` innerhalb von Integrationstests machen keine Sinn, da Integrationstests nur für die Tests compiliert werden. Test-Funktionen sind jedoch weiterhin mit `#[test]` markiert.

2.16 Namenskonvention und Formatierung

Rust bietet einen offiziellen Styleguide, der u. a. eine Namenskonvention für Funktionen, Datentypen, Variationen und Variablen beinhaltet [Rusc]. Auch über die Formatierung und Einrückungen werden bevorzugte Arten aufgezeigt [Ruse].

```
1 enum MY_ENUM {  
2     AN_ENTRY ,  
3     ANOTHER_ENTRY ,  
4 }
```

Listing 2.14: Beispiel für eine nicht konforme Aufzählung

Der Compiler überprüft einige dieser Konventionen und warnt bei Nichteinhaltung. Das Beispiel in Listing 2.14 führt dabei zu den Warnungen in Abbildung 2.1. Von einer weiteren Vertiefung der verschiedenen Konventionen wird hier abgesehen, da diese sehr ausführlich und mit sprechenden Beispielen auf der offiziellen Website erklärt werden.

```
[warning]: type 'MY_ENUM' should have a camel case name such as 'MyEnum'  
[warning]: variant 'AN_ENTRY' should have a camel case name such as 'AnEntry'  
[warning]: variant 'ANOTHER_ENTRY' should have a camel case name such as 'AnotherEntry'
```

Abbildung 2.1: Hinweise des Compilers bezüglich der Aufzählung aus Listing 2.14

2.17 Niemals Nichts und niemals unbehandelte Ausnahmen

Rust kennt `NULL` (-Pointer) nicht und erlaubt auch keinen Zugriff auf nicht initialisierte Variablen (siehe Unterabschnitt 2.21.1), bietet aber einen `Option<_>` -Datentyp als Ersatz an. Dieser Datentyp erzwingt eine Prüfung vor dem Zugriff (siehe Unterabschnitt 2.21.2).

Für die Fehlerbehandlung wird nicht auf ein Exception-Handling zurückgegriffen, sondern ein eigener Datentyp angeboten, der entweder den Rückgabewert enthält, oder aber einen Fehler: `Result<_, _>` (siehe Unterabschnitt 2.21.3).

Durch den Fragezeichenoperator kann trotzdem ein ähnliches Verhalten wie beim Auftreten einer Ausnahme in Java oder C++ erzielt werden (siehe Unterabschnitt 2.21.3).

Ein besonderer Fehlertyp ist die Panik, denn sie bedeutet in den meisten Fällen ein Logikfehler im Programmcode, der zur Laufzeit nur schwer zu beheben ist. Eine Panik kann zum Beispiel beim Zugriffsversuch außerhalb der Grenzen einer Slice oder eines Arrays, beim Teilen durch 0, oder auch bei einem `.unwrap()` ausgelöst werden. Eine Panik durchläuft daraufhin, wie eine Exception in C#, Java oder C++, rückwärts alle Funktionsaufrufe und gibt den Speicher geordnet wieder frei, bis sie gefangen wird oder zuletzt der panische Thread endet. Falls dies im Main-Thread auftritt, wird danach der Prozess beendet. Wenn während einer Panik eine weitere Panik ausgelöst wird, verwandelt sich die Panik in einen nicht mehr aufzuhaltenden `abort` (dt. Abbruch), der den Prozess beendet [BO17, S. 145-147].

2.18 Standardbibliothek

Das Rust Entwicklerteam ist darum bemüht, die Standardbibliothek sehr leichtgewichtig zu halten. Nicht eindeutig als fundamental eingestufte Funktionalitäten werden lieber als Crate auf <https://crates.io> angeboten, anstatt sie in die Standardbibliothek zu übernehmen. Mit dieser Entscheidung soll auch eine Entwicklung unabhängig von den Releasezyklen von Rust ermöglicht werden [Rus15].

Die Standardbibliothek ist selbst eine Crate, auf die standardmäßige Abhängigkeit besteht. Für Fälle, in denen diese Abhängigkeit zu schwergewichtig ist, wie zum Beispiel

im Embedded-Bereich, kann diese Abhängigkeit durch das Attribut `#![no_std]` unterbunden werden. Daraufhin sind nur noch die in der `core`-Crate zur Verfügung gestellten, fundamentalen Sprachkonstrukte verwendbar.

In dieser Abschlussarbeit wird der volle Funktionsumfang der Standardbibliothek genutzt. Wichtige, aber auch bekannte Datentypen sind hierbei:

- **std::vec::Vec**: Ein Vektor (wie eine Liste), bei dem die Werte in einem dynamisch groß allokierten Speicherbereich auf dem Heap liegen. Ist **der** Ersatz für dynamische Arrays, da auch der `[]`-Operator überschrieben ist und sich daher ein Vektor wie ein Array oder eine Slice ansprechen lässt.

In Abbildung 2.2 ist das Speicherlayout eines **Vec** und einer **Slice** auf dem Stack und dem Heap abgebildet. Zu sehen ist, dass eine **Slice** direkt auf die Elemente eines **Vec** zeigen kann und sich daher von einem Array-Pointer aus C und C++ nur durch die angehängte Längeninformation unterscheidet.

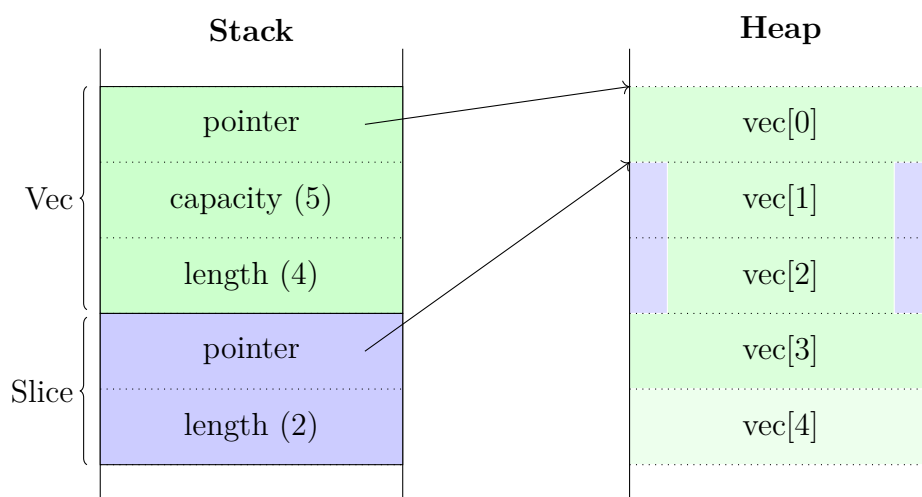


Abbildung 2.2: Speicherlayout Vec und Slice [BO17, S. 63]

- **std::boxed::Box**: Verweis auf einen Speicherbereich auf dem Heap eines beliebigen Datentyps. Erlaubt es, u. a. Eigentümerschaft über einen unbekannt großen Datentyp zu erlangen, da dies die Größe einer **Box** nicht beeinflusst (siehe Abschnitt 2.9). Eine **Box** kann mit einem immer gültigen Heap-Pointer aus C und C++ verglichen werden.
- **std::string::String**: Eine UTF-8 codierte, vergrößern- und verkleinerbare Zeichenkette auf dem Heap.
- **std::rc::Rc**: Erweitert die **Box** um einen Referenzzähler und ermöglicht somit augenscheinlich mehrere Eigentümer, mit der Limitierung, nur noch lesend auf den

beinhalteten Wert zugreifen zu können. Der beinhaltende Wert wird erst bei Lebensende der letzten **Rc** Instanz freigegeben. Verwendet einen mit wenig Mehraufwand verbundenen, nicht-atomaren Referenzzähler, weswegen eine **Rc** Instanz nicht zwischen Threads übertragen werden kann (**!Sync**, **!Send**).

- **std::sync::Arc**: Entspricht weitestgehend dem **Rc**, verwendet jedoch einen atomaren Referenzzähler. Dies ist zwar mit höheren Laufzeitkosten verbunden, erlaubt es aber, dass eine **Arc** Instanz zwischen Threads übertragen werden kann. Mehrere Threads können daher lesend auf den beinhalteten Wert zugreifen.
- **std::sync::Mutex**: Versichert einen threadübergreifenden, exklusiven Zugriff auf den beinhalteten Wert. In Rust schützt eine **Mutex** anstatt einen bestimmten Codeabschnitt die beinhalteten Daten [BO17, S. 486]. Ein Zugriff darauf ist erst möglich, nachdem andere Threads ausgesperrt werden konnten.
- **std::sync::RwLock**: Erlaubt mehreren Threads gleichzeitig lesend oder einem Thread schreibend auf den beinhalteten Wert zuzugreifen. Wie bei einer **Mutex** kann erst nach einem erfolgreichen Aussperren aller anderer Threads auf den geschützten Wert zugegriffen werden.

2.19 Speicherverwaltung

Rust benutzt ein „statisches, automatisches Speichermanagement – keinen Garbage Collector“ [Gil17]. Das bedeutet, die Lebenszeit einer Variable wird statisch während der Compilezeit anhand des Geltungsbereichs ermittelt (siehe Abschnitt 2.19). Durch diese statische Analyse findet der Compiler heraus, wann der Speicher einer Variable wieder freigegeben werden muss. Dies ist genau dann, wenn der Geltungsbereich des Eigentümers zu Ende ist. Weder ein Garbage Collector (GC), der dies zur Laufzeit nachverfolgt, noch ein manuelles Eingreifen durch den Entwickler (zum Beispiel durch `free(*void)`, wie in C/C++ üblich) ist nötig.

Falls der Compiler keine ordnungsgemäße Nutzung feststellen kann, wie zum Beispiel eine Referenz, die ihren referenzierten Wert überleben möchte, wird die Compilation verweigert. Dadurch wird das Problem des „dangling pointers“ verhindert, ohne Laufzeitkosten zu erzeugen (siehe Unterabschnitt 2.21.4).

Im folgenden Listing 2.15 wird beispielhaft Speicher auf dem Heap allokiert. Dieser wird ordnungsgemäß freigegeben, ohne manuell eine Freigabe einzuleiten.

```

1 fn main() { // neuer Scope
2     let mut a = Box::new(5); // 5 kommt auf den Heap
3     { // neuer Scope
4         let b = Box::new(10); // 10 kommt auch auf den Heap
5         *a += *b; // a ist nun 15
    }
}
```

```
6     } // Lebenszeit von b zu Ende, Speicher wird freigegeben
7     println!("a: {}", a); // Ausgabe: "a: 15"
8 } // Lebenszeit von a zu Ende, Speicher wird freigegeben
```

Listing 2.15: Geltungsbereich von Variablen

Eine Variable kann auch vorzeitig durch den Aufruf von `std::mem::drop(_)` freigegeben werden. Die optionale Implementation des `std::op::Drop`-Merkmals (siehe Abschnitt 2.9) kommt der Implementation des Destruktors aus C++ gleich.

2.20 Eigentümer- und Verleihprinzip

Bereits 2003 beschreibt Bruce Powel Douglass im Buch „Real-Time Design Patterns“, dass „passive“ Objekte ihre Arbeit nur in dem Thread-Kontext ihres „aktiven“ Eigentümers tätigen sollen [Dou03, S. 204]. In dem beschriebenen „Concurrency Pattern“ werden Objekte eindeutig Eigentümern zugeordnet, um so eine sicherere Nebenläufigkeit zu erlauben.

Diese Philosophie setzt Rust direkt in der Sprache um, denn in Rust darf ein Wert immer nur einen Eigentümer haben. Zusätzlich zu einem immer eindeutig identifizierbaren Eigentümer, kann der Wert auch ausgeliehen werden, um einen kurzzeitigen Zugriff zu erlauben; entweder exklusiv mit sowohl Lese- als auch Schreiberlaubnis, oder mehrfache mit nur Leseerlaubnis.

Eigentümerschaft kann auch übertragen werden, der vorherige Eigentümer kann danach nicht mehr auf den Wert zugreifen. Ein entsprechender Versuch wird mit einer Fehlermeldung durch den Compiler bemängelt.

Die statische Lebenszeitanalyse garantiert, dass es nur einen Eigentümer, eine exklusive Schreiberlaubnis oder mehrere Leseerlaubnisse auf eine Variable gibt. Da dies zur Compilezeit geschieht, ist eine Überprüfung zur Laufzeit nicht nötig. Die Anwendung dieser Philosophie resultiert dementsprechend in keinen zusätzlichen Laufzeitkosten.

```
1 fn main() {
2     let mut a = Box::new(1.0_f32); // Eigentümer der neuen
3                                     // Heap-Variable ist a
4
5     {
6         let b = &a; // a wird an b mit Lesezugriff verliehen
7         let c = &a; // a wird an c mit Lesezugriff verliehen
8
9         println!("a: {}", a); // "a: 1"
10        println!("b: {}", b); // "b: 1"
11        println!("c: {}", c); // "c: 1"
```

```

12      // let d = &mut a; // Nicht erlaubt: Es existieren
13      // verliehene Lesezugriffe
14
15      // *a = 7_f32; // Nicht erlaubt: Es existieren
16      // verliehene Lesezugriffe
17
18
19  } // Ende von b und c, a nicht mehr verliehen
20
21  {
22      let e = &mut a; // Leihe a mit Schreiberlaubnis
23      **e = 9_f32;    // Setze Inhalt von a
24
25      // println!("a: {}", a); // Nicht erlaubt: exklusiver
26      // Zugriff an e verliehen
27
28      println!("e: {}", e); // "e: 9"
29
30  } // Ende von e, a nicht mehr verliehen
31
32  println!("a: {}", a); // "a: 9"
33  let f = a; // Neuer Eigentümer der Heap-Variable ist f
34  // *a = 12.5_f32; // Nicht erlaubt: Nicht mehr Eigentümer
35  // *f = 12.5_f32; // Nicht erlaubt: f nicht veränderlich
36  println!("f: {}", f); // "f: 9"
37  }

```

Listing 2.16: Eigentümer und Referenzen von Variablen

Das Beispiel in Listing 2.16 zeigt verschiedene Möglichkeiten und Beschränkungen beim Verleihen und Übertragen von Werten.

Das Eigentümerprinzip unterbindet automatisch einen „dangling pointer“ (siehe Unterabschnitt 2.21.4) und kann Optimierungen erlauben, die, bei ansonsten unzureichend detaillierten Nachforschung in der jeweiligen API Dokumentation, schnell zu Laufzeitfehlern führen kann. Am Funktionskopf ist zum Beispiel eindeutig ablesbar, ob ein Wert von einer Funktion konsumiert wird. Falls der Wert in solch einem Fall weiterhin benötigt wird, muss eine Kopie veranlasst werden. Eine falsche Nutzung der API wird durch eine Fehlermeldung des Compilers bemängelt, anstatt eines zur Laufzeit unerwarteten Verhaltens.

`String::from_utf8(vec: Vec<u8>)` nimmt zum Beispiel einen `Vec<u8>` entgegen und konsumiert diesen. Der Aufrufer kann danach nicht mehr auf diesen zugreifen, da die Eigentümerschaft an die Funktion `from_utf8` übertragen wurde. Dies erlaubt der Funktion, den Speicherbereich des `Vec<u8>` für den `String` wiederzuverwenden, ohne neuen Speicher zu allokalieren oder zu kopieren [Rusd].

Das typische Problem, die Modifikation einer Kollektion während einer Iteration, wird durch das Eigentümerprinzip schon prinzipiell ausgeschlossen. Ein Wert kann während einer Iteration nicht hinzugefügt oder entfernt werden. Es kann kein exklusiver Zugriff für die Kollektion erlangt werden, da die Kollektion bereits lesend (oder exklusiv) an die Iteration verliehen ist. Eine `ConcurrentModificationException` (Java) wird deshalb nicht benötigt [BO17, S. 116].

2.21 Versprechen von Rust

„It’s not bad programmers, it’s that C is a hostile language“ [Qui, S. 54]

„I’m thinking that C is actively hostile to writing and maintaining reliable code“ [Qui, S. 129]

Rust wirbt mit Versprechen und Garantien, die dafür sorgen sollen, typische Fehler zu vermeiden. In einer perfekten Welt wären viele dieser Maßnahmen nicht nötig, da perfekte Wesen niemals einen Fehler machen und niemals etwas übersehen würden. Programmierer sind aber Menschen und Menschen machen Fehler. Deswegen hat Rust einige interessante Mechaniken eingeführt, bekannte Fehlerquellen zu unterbinden und erzwingt deren Einhaltung, indem andere Vorgehensweisen meist ausgeschlossen werden.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den wichtigsten und bekanntesten dieser Mechaniken.

2.21.1 Kein undefiniertes Verhalten

Bei der Entwicklung von Rust wird ein sehr großer Fokus darauf gelegt, keine undefinierten Zustände zu erlauben. Daher ist es normalerweise nicht möglich, ein undefiniertes Verhalten oder einen undefinierten Zustand zu erzeugen. Die Ausnahme bilden einige Fälle innerhalb von `unsafe` Blöcken, für zum Beispiel FFI (siehe Abschnitt 2.22). Für diese Fälle gibt es eine überschaubare Liste von Szenarien, aus denen ein undefinierter Zustand bzw. undefiniertes Verhalten resultieren kann [Rusn].

Als einfaches Beispiel eines undefinierten Zustandes in C ist eine Variable, die deklariert wurde, der aber noch keinen Wert zugewiesen wurde. In manchen Szenarien hat die Variable dann den Wert, der in diesem Moment an der entsprechenden Stelle im Speicher steht. In anderen Szenarien wird der Speicher vom Betriebssystem, Allokator oder von vom Compiler eingefügten Befehlen mit 0en gefüllt. Eine sichere Aussage ist nicht möglich. Sich darauf zu verlassen, dass neue Werte automatisch mit 0 initialisiert wurden, kann auf neuen Systemen oder mit anderen Compilern ein unvorhersehbares Verhalten provozieren.

Rust lässt deshalb keinen Zugriff auf Variablen zu, die nicht zuvor initialisiert wurden [BO17, S. 126]. Der Compiler stoppt mit einem Fehler:

```
error[E0381]: use of possibly uninitialized variable: 'a'
```

Abbildung 2.3: Der Compiler bemängelt die Nutzung einer nicht initialisierten Variable

2.21.2 Keine vergessene Null-Pointer Prüfung

„I call it my billion-dollar mistake. It was the invention of the null reference in 1965“ [Hoa09, Tony Hoare, QCon Software Konferenz in London, 2009]

Wie in Abschnitt 2.17 bereits erwähnt, kennt Rust keinen `NULL`-Pointer. Daher ist es auch nicht möglich, durch Nachlässigkeit auf den falschen Speicher zuzugreifen. Eine Referenz ist immer gültig. Für Fälle, in denen es situationsbedingt keinen gültigen Wert gibt, bietet Rust stattdessen den `Option<_>` Datentyp an. `Option<_>` ist eine Aufzählung, die entweder `None` ohne einen Wert, oder `Some(_)` mit einem Wert ist. Auf den Wert kann nicht zugegriffen werden, ohne zu prüfen, ob wirklich die Variation `Some(_)` vorliegt. Dies kann durch `match` oder verkürzt durch ein `if let Some(wert) = optional { /* tu etwas mit wert */ }` geschehen (siehe Abschnitt 2.12).

In vielen Fällen kann der `Option<_>` Datentyp in Maschinencode als `NULL`-Pointer dargestellt werden, weswegen durch diese Abstraktion keine weiteren Laufzeitkosten eingeführt werden [BO17, S. 100] (siehe Unterabschnitt 2.21.7).

2.21.3 Keine vergessene Fehlerprüfung

```
1 #include <stdio.h>
2
3 void main(void) {
4     FILE *file = fopen("private.key", "w");
5     fputs("42", file);
6 }
```

Listing 2.17: Negativbeispiel: Fehlende Fehlerprüfung in C

In Listing 2.17 sind mindestens zwei Fehler versteckt, die aber keinen Compileabbruch auslösen, sondern sich zur Laufzeit zeigen können. Der erste Fehler ist eine fehlende Überprüfung des Rückgabewertes von `fopen` in Zeile 4. Der Rückgabewert kann `NULL` sein, falls das Öffnen der Datei fehlgeschlagen ist. Der Versuch in die Datei zu schreiben in Zeile 5

kann daraufhin in einem Speicherzugriffsfehler resultieren und das Programm abstürzen lassen.

In Rust wird weder eine Ausnahme geworfen, noch ein Rückgabewert zurückgegeben, der ohne Prüfung verwendet werden kann:

```
1 use std::fs::File;
2 use std::io::Write;
3
4 fn main() {
5     match File::create("private.key") {
6         Err(e) => println!("Datei nicht erstellbar: {}", e),
7         Ok(mut file) => {
8             if let Err(e) = write!(file, "42") {
9                 println!("Konnte nicht in Datei schreiben: {}", e);
10            }
11        }
12    }
13 }
```

Listing 2.18: Positivbeispiel: Keine fehlende Fehlerprüfung in Rust

Der Rückgabewert von `File::open("private.key")` in Zeile 5 von Listing 2.18 ist vom Typ `Result<File, Error>`. Auf den eigentlichen Rückgabewert `File` kann nicht ohne eine Fehlerprüfung zugegriffen werden, da dies `Result` verhindert. Eine Fehlerprüfung kann wie in Zeile 5 mit einem `match` oder verkürzt durch ein `if let` wie in Zeile 8 geschehen.

Durch die statische Lebenszeitanalyse (siehe Abschnitt 2.19) in Rust ist der Geltungsbereich der `mut file` Variable bekannt, deshalb wird in dem Beispiel in Rust in Listing 2.18 die Datei auch wieder ordnungsgemäß geschlossen. Dies ist im C Beispiel in Listing 2.17 nicht der Fall. In einem größeren Programm könnte so zu unbekanntem Zeitpunkt das Limit an gleichzeitig geöffneten Dateien erreicht werden.

Da ein `match` oder ein `if let` für jeden Funktionsaufruf, der einen Fehler zurückgeben könnte, sehr umständlich und bereits für kleine Beispiele wie Listing 2.18 unübersichtlich wird, kann dies durch den Operator `?` abgekürzt werden. Dazu muss die Funktion, die den Operator verwendet, aber auch ein `Result` mit einem kompatiblen Fehlertyp zurückgeben. Ein Beispiel ist in Listing 2.19 zu sehen:

```
1 use std::fs::File;
2 use std::io::Write;
3 use std::io::Error;
4
5 fn main() {
```

```

6   if let Err(e) = schreibe_schluesssel("private.key", "42") {
7       println!("Fehler aufgetreten: {}", e);
8   }
9 }
10
11 fn schreibe_schluesssel(file: &str, content: &str) ->
    Result<(), Error> {
12     let mut file = File::create(file)?;
13     write!(file, "{}", content)?;
14     Ok(())
15 }

```

Listing 2.19: Verkürzte Fehlerbehandlung in Rust

2.21.4 No dangling pointer

Durch das Eigentümerprinzip wird eine typische Fehlerquelle aus C und C++ verhindert, bei der durch einen Pointer auf bereits deallokierten Speicher zugegriffen wird. Ein Verhalten ist hierbei nicht vorhersehbar. Es könnte einfach nur auf den als „frei“ markierten Speicherbereich zugegriffen werden, der noch die vorherigen Werte enthält. Es könnte aber auch auf den nun neu zugewiesenen Speicherbereich geschrieben und dabei Werte anderer Datenstrukturen überschrieben werden. Im besten Fall hat das Betriebssystem die Speicherseite dem Programm bereits entzogen und das Programm stürzt einfach nur ab.

Im Beispiel in Listing 2.20 wird durch eine fehlerhafte Implementierung der Funktion `klone_computer` ein „dangling pointer“ in C provoziert. Daraufhin wird versucht, mit dem gleichen Beispiel in Listing 2.21 ein „dangling pointer“ in Rust zu provozieren.

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
4
5  typedef struct Computer {
6      char* model;
7  } Computer;
8
9  Computer* erstelle_computer(char* model) {
10     Computer* computer = malloc(sizeof(Computer));
11     computer->model = malloc(strlen(model)+1);
12     strcpy(computer->model, model);
13     return computer;
14 }
15
16 Computer* klone_computer(Computer* original) {
17     Computer* klon = malloc(sizeof(Computer));
18     klon->model = original->model;
19     return klon;

```

```

20 }
21
22 void loesche_computer(Computer* computer) {
23     free(computer->model);
24     free(computer);
25 }
26
27 void main() {
28     Computer* c1 = erstelle_computer("Lenovo");
29     Computer* c2 = kclone_computer(c1);
30     printf("Model Nr1=%s, Nr2=%s\n", c1->model, c2->model);
31     loesche_computer(c1);
32     printf("Model Nr2=%s\n", c2->model);
33 }

```

Listing 2.20: Negativbeispiel: Fehlerhafter Klon in C

```

1 struct Computer<'a> {
2     model: &'a str,
3 }
4
5 fn erstelle_computer<'a>(model: &'a str) -> Computer<'a> {
6     Computer { model }
7 }
8
9 fn kclone_computer<'a>(original: &'a Computer) ->
10     Computer<'a> {
11     Computer { model: original.model }
12 }
13
14 fn loesche_computer(_: Computer) {
15     // löschen durch Konsum
16 }
17
18 fn main() {
19     // Zeichenkette auf dem Heap
20     let model = String::from("Lenovo");
21
22     let c1 = erstelle_computer(&model);
23     let c2 = kclone_computer(&c1);
24     println!("Model Nr1={}, Nr2={}\\n", c1.model, c2.model);
25
26     loesche_computer(c1);
27     println!("Model Nr2: {}", c2.model);

```


27 }

Listing 2.21: Negativbeispiel: Fehlerhafter Klon in Rust

Ein äquivalentes Beispiel zu dem C-Beispiel in Rust zu schreiben, ist schwierig. Das Feld „model“ in der C-Struktur ist beim Erstellen der Eigentümer der Zeichenkette (Datentyp `String` in Rust) und beim Klonen der Entleiher (Datentyp `&str` in Rust). Im Rust-Beispiel ist die Zeichenkette deswegen in Zeile 19 außerhalb der `erstelle_computer`-Funktion, da der Geltungsbereich ansonsten beim Verlassen der Funktion bereits zu Ende wäre und das Leihen an die Datenstruktur nicht möglich wäre. Dieser Unterschied ist gleichzeitig auch die Fehlerquelle im C-Beispiel.

Das Beispiel in Listing 2.21 entspricht dennoch weitestgehend dem Beispiel aus Listing 2.20, zumindest genügend, um zu zeigen, dass der Rust Compiler den Fehler erkennt und die Compilation abbricht (für Zeile 25):

```
error[E0505]: cannot move out of 'c1' because it is borrowed .
```

Abbildung 2.4: Der Compiler bemängelt den Versuch, eine Leihgabe länger als den Eigentümer leben zu lassen

2.21.5 Speichersicherheit

In Rust werden verschiedene Arten von Speichersicherheit garantiert. Zum einen wird niemals auf einen `NULL`-Pointer zugegriffen (siehe Unterabschnitt 2.21.2), zum anderen wird niemals auf einen bereits deallokierten Speicherbereich zugegriffen (siehe Unterabschnitt 2.21.4).

Die Speichersicherheit umfasst aber auch den Zugriff auf Puffer. So ist es nicht möglich einen Pufferüberlauf zu provozieren, da die Größe von einem Array und einer Slice immer bekannt ist. Der Compiler erzwingt eine Grenzüberprüfung beim Zugriff zur Laufzeit, falls die Einhaltung statisch nicht ersichtlich ist (Unterabschnitt 2.21.7).

Ein weiterer Punkt zur Speichersicherheit ist im Bereich der Nebenläufigkeit zu finden: Ein Datenwettlauf wird durch Anwendung des Eigentümerprinzips verhindert (siehe Unterabschnitt 2.21.6).

2.21.6 Sichere Nebenläufigkeit

Eine sichere Nebenläufigkeit wird in Rust durch das Eigentümerprinzip (siehe Abschnitt 2.20) in Kombination mit den `Send` und `Sync` Merkmalen (siehe Abschnitt 2.9) erreicht. Dabei ist diese sichere Nebenläufigkeit meist unsichtbar [BO17, S. 41], da der

Compiler eine unsichere und damit syntaktisch falsche Verwendung nicht übersetzt. Ein Rust Programm das compiliert, ist daher, in vielerlei Hinsicht, sicher in der Nebenläufigkeit. Einzig ein „Deadlock“ kann nicht statisch ermittelt und verhindert werden.

Eine Wettlaufsituation (englisch „race condition“) um einen Wert ist in Rust nicht möglich. Das Eigentümer- und Leihprinzip verhindert dies, denn es kann nur exklusiv schreibend auf einen Wert zugegriffen werden (siehe Abschnitt 2.20). Für einen Datenwettlauf muss dagegen, gleichzeitig zu einem schreibenden, ein lesender Zugriff erfolgen.

Datentypen, die einen gemeinsamen Zugriff auf veränderliche Werte ermöglichen (`Mutex`, `RwLock` und im erweiterten Sinne „channels“), liefern immer ein Ergebnis, ob der Versuch, einen exklusiven Schreib- oder Lesezugriff zu erhalten, erfolgreich war. Vor einer Fehlerauswertung kann die Sperre nicht genutzt werden (siehe Unterabschnitt 2.21.3). Ein Sperrversuch wird mit einem Fehler beantwortet, wenn ein vorheriger Thread die Sperre nicht ordnungsgemäß, sondern mit einer `panic!`, beendet hat. In diesem Fall wird ein `PoisonError` zurückgegeben, der einen direkten Zugriff auf den Wert verhindert. Damit wird darauf hingewiesen, dass der geschützte Wert aufgrund er `panic!` eventuell in keinem konsistenten Zustand mehr ist.

In Rust wird auf einen geschützten Wert durch eine gültige Sperre zugegriffen. Es wird nicht ein Codebereich exklusiv betreten, sondern ein Speicherbereich exklusiv genutzt. Ein Zugriff ohne gültige Sperre ist deshalb nicht möglich:

```
1 use std::sync::Mutex;
2
3 fn main() {
4     let mutex = Mutex::new(0);
5     let lock = mutex.lock();
6
7     if let Ok(mut counter) = lock {
8         *counter += 1;
9         println!("Zähler: {}", counter); // "Zähler: 1"
10    }
11 }
```

Listing 2.22: test2

2.21.7 Zero Cost Abstraction

Trotz der vielen verwendeten Abstraktionen möchte Rust dadurch möglichst keine weiteren Laufzeitkosten erzeugen. Beim Übersetzen werden deshalb viele Abstraktionen durch Optimierungen für den Maschinencode unsichtbar.

2.21.8 Optional

Der `Option<_>` Datentyp kann zum Beispiel in vielen Fällen als Pointer dargestellt werden, der bei `NULL` `None` und ansonsten `Some(_)` ist [BO17, S. 100]. Somit wird eine Überprüfung erzwungen, ohne dabei Laufzeitkosten erzeugt zu haben.

2.21.9 Referenzzähler

Ein weiteres Beispiel sind die Referenzzählertypen `Rc` und `Arc<_>`. Der Zähler ist im Heap direkt vor dem beinhalteten Wert und nicht in einem extra Speicherbereich, weshalb ein weiterer, indirekter Speicherzugriff mit Laufzeitkosten verhindert werden kann.

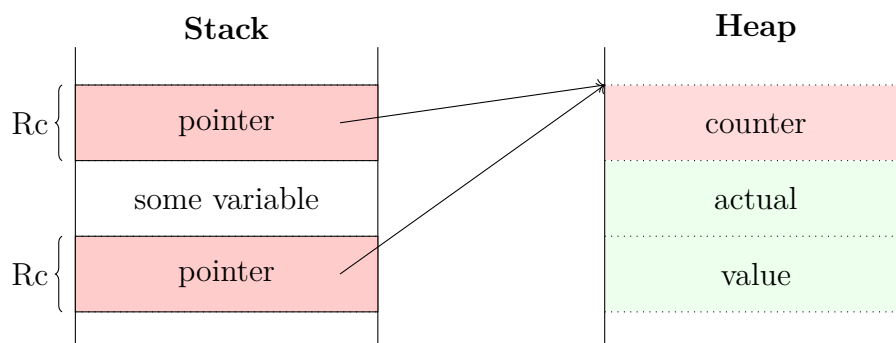


Abbildung 2.5: Speicherlayout Rc [BO17, S. 90-91]

2.21.10 Closures

Durch das Eigentümerprinzip (siehe Abschnitt 2.20) und die statische Laufzeitanalyse (siehe Abschnitt 2.19), sind Closures (siehe Abschnitt 2.10) so sicher wie ähnliche Sprachkonstrukte in Programmiersprachen mit GC und so performant wie Lambdas in Programmiersprachen wie C++. Closures können sogar schneller als Funktionspointer sein [BO17, S. 310], da ein „Inlining“ möglich ist und da sie auf dem Stack allokiert werden können. Der Compiler kann diese und weitere umfassende Optimierungen durchführen, wenn ihm der genaue Typ bekannt ist.

2.22 Einbinden von externen Bibliotheken

Externe Datentypen

Rust bietet durch das Foreign Function Interface⁵ (FFI) die Möglichkeit, Funktionalität anderer (System-)Bibliotheken zu nutzen. Entsprechende Strukturen und Funktionen werden durch einen `extern` Block oder im Falle von Strukturen stattdessen optional mit einem `#[repr(C)]` gekennzeichnet.

In einem Beispiel soll die Nutzung von Foreign Function Interface demonstriert werden.

```

1 typedef struct PositionOffset {
2     long position_north;
3     long position_east;
4     long *std_dev_position_north; // OPTIONAL
5     long *std_dev_position_east;  // OPTIONAL
6
7     // ...
8 } PositionOffset_t;

```

Listing 2.23: Ausschnitt von „PositionOffset“ (C-Code) aus der *libmessages-sys* Crate

Die Struktur in Listing 2.23 muss zur Nutzung in Rust zuerst bekannt gemacht werden. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Falls der Aufbau der Struktur nicht von Bedeutung ist, kann es ausreichen, den Datentyp lediglich bekannt zu machen: `#[repr(C)] struct PositionOffset;`. In diesem Fall können aber nur Referenzen und Raw-Pointer auf die Struktur verwendet werden.
- Falls der Aufbau wie in 2.22 unbedeutend ist, aber ausdrücklich auf einen externen Datentyp hingewiesen werden soll, kann dieser in einem `extern { }` Block bekannt gemacht werden: `extern { type PositionOffset; }` [Rusw]. Dies ist zum jetzigen Zeitpunkt aber nur in „nightly“ und hinter dem „feature gate“ `extern_types` möglich.
- Der Inhalt der Struktur ist von Bedeutung, da darauf zugegriffen oder in Rust eine Instanz werden soll. In diesem Fall ist eine komplette Wiedergabe der Struktur unumgänglich:

```

1 use std::os::raw::c_long;
2
3 #[repr(C)]
4 pub struct PositionOffset {

```

⁵ Beschreibt den Mechanismus wie ein Programm das in einer Programmiersprache geschrieben ist, Funktionen aufrufen kann, die in einer anderen Programmiersprache geschrieben wurden. [Wik18a]

```

5     pub position_north: c_long,
6     pub position_east: c_long,
7     pub std_dev_position_north: *mut c_long,
8     pub std_dev_position_east: *mut c_long,
9     // ...
10 }

```

Listing 2.24: Ausschnitt von „PositionOffset“ (Rust-Code) aus der *libmessages-sys* Crate

In Listing 2.24 ist die Struktur „PositionOffset“ deklariert, die durch das Attribut `#[repr(C)]` wie eine C-Struktur im Speicher organisiert wird. Damit die Struktur in Rust kompatibel zu der in C ist, müssen die Variablen von der selben Größe sein, ansonsten würde das Speicherlayout nicht übereinstimmen. Hierfür werden spezielle Datentypen (`c_long`, `c_void`, `c_char`, ...) angeboten, um die Kompatibilität mit verschiedenen Systemen und C-Compilern zu wahren.

Ein C-Pointer `*long` wird in Rust „Raw-Pointer“ genannt und entweder `*mut c_long` oder `*const c_long` geschrieben. Der Unterschied ist wie zwischen `&mut c_long` und `&c_long` und dient dem Rust Compiler zum Nachvollziehen, ob ein exklusiver Zugriff benötigt wird, oder nicht. Dies hilft zwar für die Fehlervermeidung durch eventuelle Compilefehler anstatt Laufzeitfehler, ist aber für die C-Funktion unbedeutend [Ruso]:

Referenz in Rust	Raw-Pointer in Rust	C-Pointer
<code>&mut c_long</code>	<code>*mut c_long</code>	<code>long*</code>
<code>&c_long</code>	<code>*const c_long</code>	<code>long*</code>

Abbildung 2.6: Vergleich Rust Raw-Pointer und Referenz zu C-Pointer

Externer Funktionsaufruf

Externe Funktionen müssen im Gegensatz zu externen Strukturen immer in einem `extern {}` Block deklariert sein.

```

1 use std::os::raw::c_void;
2
3 #[link(name = "messages", kind = "static")]
4 extern {
5     type asn_TYPE_descriptor_s;
6     type asn_enc_rval_t;
7
8     fn uper_encode_to_buffer(

```

```

9      type_descriptor: *const asn_TYPE_descriptor_s,
10     struct_ptr: *const c_void,
11     buffer: *mut c_void,
12     buffer_size: usize,
13 ) -> asn_enc_rval_t;
14 }

```

Listing 2.25: Externe Funktionsdefinition der ASN.1 Funktion zum Enkodieren

Wie in Listing 2.25 zu sehen ist, können auch `extern {}` Blöcke mit Attributen (siehe Abschnitt 2.14) versehen werden. Zwingend ist bei der Verwendung einer `#[link(..)]` Attributs der Name der Bibliothek, auf die sich der im `extern {}` Block stehende Code bezieht. Optional kann auch wie in Listing 2.25 die Art der Verlinkung (dynamisch oder statisch) angegeben werden.

Die Art der Definition einer externen Funktion unterscheidet sich nicht von einer normalen Funktionsdefinition. Es sollten aber, wie in Abschnitt 2.22 beschrieben, zu C bzw. der externen Sprache kompatiblen Datentypen verwendet werden.

2.23 Unsafe

„To isolate unsafe code as much as possible, it’s a good idea to enclose unsafe code within a safe abstraction and provide a safe API“ [Rusp, The Rust Programming Language - Unsafe Rust]

In manchen Situationen kann der Rust Compiler ein ordnungsgemäßes Speichermanagement nicht nachweisen. So ist zum Beispiel nicht nachvollziehbar, wie eine externe Funktion (siehe Abschnitt 2.22) mit einem übergebenem Zeiger umgeht. Ebenso unklar ist, ob ein zurückgegebener Zeiger immer gültig (`&T`) oder auch ungültig (`NULL` / `Option<T>`) sein kann. Aus diesem Grund ist die Dereferenzierung von Zeigern als unsicher markiert. Eine Nutzung ist nur innerhalb `unsafe {}`-Blöcken möglich. Programmierer sollen dadurch besonders aufmerksam den (möglichst kleinen) Programmcode programmieren und prüfen.

Besondere Funktionen oder Datentypen, wie eine `Mutex`, die einen exklusiven Zugriff auf den inneren Wert ermöglicht, ohne selbst durch eine exklusive Referenz aufgerufen worden zu sein, sind nicht mit dem Eigentümerprinzip vereinbar. Die Implementation findet deswegen teilweise auch in `unsafe {}`-Blöcken statt - für die Speichersicherheit sind dann die Entwickler (der Standardbibliothek) verantwortlich.

2.24 Beispiele der Verwendung von Rust

Der womöglich bekannteste Einsatzzweck von Rust ist im Webbrowser Firefox. Mehrere Versuche die Layoutberechnung in C++ zu parallelisieren sind aufgrund schwer auffindbarer Fehlern abgebrochen worden [Gor17]. Eine Parallelisierung im aktuellen Projekt „Quantum“ in Rust ist dagegen mit ersten Erfolgen gekrönt [Ber17]

Dropbox erreicht „Hunderte Millionen von Geräten“ mit Rust und das GNOME Projekt ermöglicht die Integration von Rust Code [Gou17].

Chucklefish, ein unabhängiges Spielestudio in London [Chu], hat bereits im Oktober 2017 bekanntgegeben, dass ihr nächstes Spiel „Witchbrook“ anstatt in C++ in Rust geschrieben wird [kyr17]. Im April 2018 wurde hierzu ein Whitepaper veröffentlicht, in dem auch die Gründe für den Wechsel erläutert sind [Rus18a].

3 Systemrelevante Technologien

Dieses Kapitel erläutert weitere relevante Themen, die zur Umsetzung der hochperformanten, serverbasierten Kommunikationsplattform wichtig sind.

3.1 Echtzeitsysteme

Echtzeitsysteme zeichnen sich im Allgemeinen dadurch aus, eine Aufgabe in einem zuvor vorgegebenen Zeitraum bearbeiten zu können. Es existiert zu einer Aufgabe also immer eine Frist. Bei der Bewertung der Korrektheit eines Systems wird die Fähigkeit, eine Frist einhalten zu können, auch bewertet [But+06, S. 2]. Je nach Art des Echtzeitsystems wird diese Frist jedoch unterschiedlich gewichtet:

- Bei einem harten Echtzeitsystem kann eine Überschreitung der Frist einen katastrophalen Ausgang haben. Selbst im schlimmsten Fall darf diese Frist nicht überschritten werden. Deswegen wird in einem harten Echtzeitsystem die maximale Reaktionszeit dem Zeitraum bis zur Frist gegenübergestellt [Dou03, S. 75]. Ein Ergebnis nach Ablauf der Frist wird als nutzlos gewertet [Wan17, S. 2].

Zum Beispiel könnte eine zu späte Auswertung von Beschleunigungsdaten in einem Flugzeug zu einer verzögerten und mittlerweile falschen Reaktion und daraufhin zu einem Absturz führen [Lap04, S. 5].

- Bei einem weichen Echtzeitsystem resultiert die Überschreitung des vorgegebenen Zeitraums nicht in einer Katastrophe. Es wird die durchschnittliche Reaktionszeit dem Zeitraum bis zur Frist gegenübergestellt. Eine seltene und unter Last auftretende Überschreitung wird in Kauf genommen [Dou03, S. 76]. Das System führt in so einem Fall weiterhin seine Aufgaben aus, die Performance wird daraufhin aber als unzureichend eingestuft.

3.2 Mobile Edge Computing

Mobile Edge Computing (MEC) bezeichnet Recheneinheiten, die eine Cloud-ähnliche Umgebung am Rande des Mobilfunknetzes schaffen [Ins15, S. 4]. Wenn in dieser Arbeit auf MEC Bezug genommen wird, sind damit explizit direkt an der Basisstation angeschlossene Recheneinheiten gemeint. Dadurch, dass die Recheneinheiten direkt an einen Funkmast

angeschlossen sind, können sie Anfragen aus dem Abdeckungsbereich der Antenne deutlich schneller beantworten (Latenz kleiner 20ms) als Cloudlösungen (Latenz ca 100ms) [Sys17, S. 2]. Hierfür werden die Anfragen aus dem Mobilfunknetz direkt an die Recheneinheit weitergeleitet, anstatt über einen Provider eine Internetverbindung zu einer Cloudlösung aufzubauen.

Die Serverimplementierung des MEC-View Projekts wird in einer MEC-Recheneinheit ausgeführt, um die Sensordaten der Sensoren möglichst schnell an die Fahrzeuge des Abdeckungsbereichs des Funkmastes weiterleiten zu können.

3.3 ASN.1

„ASN.1 has a long record of accomplishment, having been in use since 1984. It has evolved over time to meet industry needs, such as PER support for the bandwidth-constrained wireless industry and XML support for easy use of common Web browsers.“ [ITUa]

Die Notationsform Abstract Syntax Notation One (ASN.1) ermöglicht es, abstrakte Datentypen und Wertebereich zu beschreiben [Jr93]. Die Beschreibungen können anschließend zu Quellcode einer theoretisch¹ beliebigen Programmiersprache compiliert werden. Beschriebene Datentypen werden dadurch als native Konstrukte dargestellt und können mittels einer der standardisierten (oder auch eigenen [ITUb]) Encodierungen serialisiert werden.

Um den Austausch zwischen verschiedenen Anwendungen und Systemen zu ermöglichen, sind durch die International Telecommunication Union (ITU) bereits einige Encodierungen standardisiert [ITU15a, S. 8]. Für diese Arbeit ist aber einzig der PER bzw. UPER Standard relevant, da der Server diese Encodierung verwenden muss, um mit den Sensoren und den Autos zu kommunizieren (siehe Anforderung in Abschnitt 4.2).

Andere, bekanntere Verfahren werden hier nur kurz erwähnt:

- **BER** (Basic Encoding Rules): Flexible binäre Encodierung [Wik18d], spezifiziert in X.690 [ITU15b] und ISO/IEC 8825-1 [Sta].
- **CER** (Canonical Encoding Rules): Reduziert BER durch die Restriktion, die Enden von Datenfelder speziell zu markieren anstatt deren Größe zu übermitteln und eignet sich gut für große Nachrichten [Wik18d], spezifiziert in X.690 [ITU15b] und ISO/IEC 8825-1 [Sta].
- **DER** (Distinguished Encoding Rules): Reduziert BER durch die Restriktion, Größeninformationen zu Datenfeldern in den Metadaten zu übermitteln und eignet sich gut für kleine Nachrichten [Wik18d], spezifiziert in X.690 [ITU15b] und ISO/IEC 8825-1 [Sta].

¹Es gibt keine Einschränkungen seitens des Standards, aber entsprechende Compiler zu finden erweist sich als schwierig (siehe Abschnitt 7.3)

- **XER** (XML Encoding Rules): Beschreibt den Wechsel der Darstellung zwischen ASN.1 und XML, spezifiziert in X.693 [ITU15c] und ISO/IEC 8825-4 [Sta].

PER und UPER

Die Packed Encoding Rule ist in X.691 [ITU15a] und ISO/IEC 8825-2 [Sta] spezifiziert. Sie beschreibt eine Encodierung, die Daten kompakt – also in wenigen Bytes – serialisiert. Zu PER sind mehrere Variationen spezifiziert, für diese Arbeit ist jedoch nur UPER (unaligned PER) von Bedeutung. Im Gegensatz zu anderen Variationen bestehen Datenbausteine in UPER nicht aus ganzen Bytes, sondern aus unterschiedlich vielen Bits. Eine serialisierte Nachricht ist deswegen nicht N-Bytes sondern N-Bits lang. An den resultierenden Bitstring dürfen 0-Bits angehängt werden, um diesen in einen Bytestring wandeln zu können. Durch dieses Verfahren ist die Nachricht noch kürzer darstellbar.

Für Funkverbindungen ist dies von besonderer Bedeutung, da sich alle Teilnehmer das gleiche Übertragungsmedium teilen. Das Einsparen von wenigen Bytes pro Nachricht und je Teilnehmer ermöglicht einen höheren Gesamtdurchsatz.

3.4 Test-Driven Development

„Failure is progress.“ [Bec03, S. 5]

Bei der testgetriebenen Entwicklung werden Tests in den Vordergrund gestellt. Die Implementierung einer neuen Funktionalität wird durch neue Tests, welche die Anforderung repräsentieren, eingeleitet. Erst nachdem ein Test erfolgreich feststellt, dass die geforderte Funktionalität noch nicht vorhanden ist, wird mit der Implementierung begonnen. Eine schnelle Implementierung hat hierbei die höchste Priorität und erlaubt temporär auch eine limitierende, „stinkende“ und naive Vorgehensweise [Bec03, S. 7]. Direkt im Anschluss wird ein Refactoring² durchgeführt, um die Qualitätsstandards wieder einzuhalten. Diese drei Phasen werden „red/green/refactor“ bezeichnet:

- **red**: Ein neuer Test wird erstellt, dieser stellt erfolgreich die Abwesenheit der Funktionalität fest, eine rote Fehlermeldung ist zu sehen.
- **green**: Der Test wird durch neuen Code zufriedengestellt; eine positive Ausgabe bestätigt dies. Eine schnelle Implementierung wird hierbei temporär einer hochwertigen bevorzugt [Bec03, S. 24], da ein erfolgreicher Test das Selbstvertrauen beim Refactoring stärkt und helfen würde, fehlerhafte Tests zu finden [Bec03, S. 152].
- **refactor**: Der neue Code wird aufgeräumt und verbessert, um den Qualitätsstandards gerecht zu werden.

²Verbesserung des Codes und der Struktur ohne Änderung der Funktionalität

Die Testgröße und der daraus resultierende Umfang der neuen Funktionalität wird durch die Zuversichtlichkeit des Entwicklers gesteuert [Bec03, S. 42]. Eine hohe Zuversicht führe zu größeren Tests, die etwas mehr Funktionalität auf einmal prüfen, während eine hohe Unsicherheit zu vielen kleinen Tests führen würden. Daraus resultiert, dass gerade komplexe Algorithmen mit vielen Tests abgesichert sein sollten. Bestehende Tests bilden ein Sicherheitsnetz, mit dem Fehler durch Änderungen detektiert werden können.

Testgetriebene Entwicklung verändert auch die Vorgehensweise bei der Implementation von Anforderungen. Anstatt zu fragen „wie würde ich das implementieren?“, wird überlegt „wie würde ich das testen?“ [Bec03, S. 39], womit auch implizit gefragt wird, wie die äußere Schnittstelle idealerweise aussehen sollen [Bec03, S. 4].

3.5 Funktionale Sicherheit

„Sicherheit“ ist im Deutschen kein eindeutiger Begriff. Sowohl „Sichersein vor Gefahr oder Schaden“ (*to be safe*), „Freisein von Fehlern oder Irrtümern“ (*to be confident*) oder „Schutz vor Gefahren, die von außen auf Systeme oder Personen einwirken“ (*security*) könnten mit „sicher sein“ gemeint sein [LPP11, S. 5-6]. Deswegen ist es wichtig, den Begriff „funktionale Sicherheit“ kurz zu ergründen.

Bei funktionaler Sicherheit (*safety*) geht es um die Betriebssicherheit, eine „Freiheit von unvermeidbaren Risiken“ [LPP11, S. 6]. Unvermeidbare Risiken sind in erster Linie Personenschäden, weswegen einheitliche Regularien in Normen wie der IEC 61508 bzw der DIN EN 61508 festgehalten sind. Für den Automobilbereich wurde die Norm in der ISO 26262 angepasst, um u. a. eine Einzelabnahme eines jeden Fahrzeuges, durch eine Gesamtabnahme des Produktes zu ermöglichen [LPP11, S. 14].

Durch die testgetriebene Entwicklung und der Verwendung von Rust und dessen Garantien (siehe Abschnitt 2.21), sollen Fehler reduziert und eine möglichst sichere Implementierung geschaffen werden. Eine Entwicklung nach ISO 26262 findet nicht statt, da dies zum einen nicht durch das Forschungsprojekt gefordert ist und zum anderen den Umfang dieser Bachelorarbeit überschreitet.

3.6 Asynchrone Kommunikation und Datenströme

„However, for high-performance servers, you’ll need to use asynchronous input and output.“ [BO17, S. 454]

Eine typische synchrone Kommunikation ist ein Funktionsaufruf. Zuerst werden die Parameter vorbereitet, dann die Funktion aufgerufen. Der weitere Code der aufrufenden Funktion wird nicht ausgeführt, bis der Aufruf der aufgerufenen Funktion beendet wurde.

Auch für Datenströme, zum Beispiel bei TCP-Verbindungen, bieten Standardbibliotheken der entsprechenden Programmiersprachen oft eine synchrone Kommunikation an. Hierbei beendet ein Funktionsaufruf für das Versenden oder Empfangen von Daten (bei TCP Bytes) erst, wenn die erwartete Anzahl an Elementen empfangen oder versendet wurde.

Für einen Client, der nur zu einem Server eine Verbindung aufbaut, ist diese Herangehensweise aufgrund der niedrigen Komplexität gut geeignet. Für einen Server, der mit vielen Datenströmen gleichzeitig kommunizieren muss, ist diese Herangehensweise nicht geeignet. Ein sequentieller Sendeaufruf würde die Latenz des Servers pro Client um einen von der Verbindungsgeschwindigkeit abhängigen Wert erhöhen. Einen Sende- und Empfangsthread je Client würde das Problem der Latenz lösen, jedoch aufgrund des je Thread benötigten Stacks und zusätzlichen Verwaltungsaufwand den Ressourcenverbrauch des Servers drastisch erhöhen.

Eine asynchrone Kommunikation ermöglicht dagegen die Kommunikation mit vielen Datenströmen gleichzeitig, ohne die zuvor erwähnten Probleme zu provozieren. Bei einem asynchronen Sende- oder Empfangsaufruf wird nicht auf dessen Fertigstellung gewartet, sondern in der darunterliegenden Implementation wird die Anfrage notiert, sobald wie möglich abgearbeitet und der Aufrufende bei Fertigstellung informiert. Das erlaubt dem Aufrufer dem nächsten Datenstrom Daten zuzusenden, ohne dass dies durch die Fertigstellung des ersten Aufrufs verzögert wird. Eine asynchrone Kommunikation erhöht jedoch die Komplexität des Aufrufers (hier: des Servers), da nun zusätzlich der Status einer Sende- und Empfangsanfrage nachverfolgt werden muss. Im Gegenzug wird die Verwaltung von vielen Datenströmen bzw. Verbindungen mit wenigen Threads ermöglicht.

4 Anforderungen

In diesem Kapitel sind die Anforderungen an das umzusetzende System gelistet. Die Anforderungen sind in funktionale und nichtfunktionale Anforderungen aufgeteilt.

Anforderungen, die mit einem **OPTIONAL** gekennzeichnet sind, sind keine Pflichtanforderungen, sondern mögliche Erweiterungen für das System. Eine Umsetzung wird trotzdem angestrebt, sofern die Zeitlimitierung für diese Bachelorarbeit dies ermöglicht.

4.1 Funktionale Anforderungen

Die hier gelisteten funktionalen Anforderungen beschreiben das gewünschte Verhalten des Systems [Gol12, S. 155].

4.1.1 Top-Level Requirement

- **Anforderung 1000: MEC-View-Server**

Die neue Implementation des MEC-View-Servers soll an Stelle der existierenden MEC-View-Server Implementation treten können. Empfangene Nachrichten von Sensoren sollen an den Algorithmus und dessen Ergebnisse an verbundene Fahrzeuge weitergeleitet werden.

4.1.2 Anforderungen

Kommunikation

- **Anforderung 2000: TCP Server**

Auf Port 2000 sollen neue TCP-Verbindungen angenommen werden. Jedem Client soll eine eigene TCP Verbindung zugewiesen sein.

Protokoll

- **Anforderung 2100: Client als Sensor**
Ein Client soll sich nach dem Verbindungsaufbau als Sensor registrieren können. Ein Client soll sich nicht mehrmals registrieren können. Vor einer Registrierung soll der Typ des Clients unbekannt sein und er soll nicht als Sensor agieren können.
- **Anforderung 2110: Client als Fahrzeug**
Ein Client soll sich nach dem Verbindungsaufbau als Fahrzeug registrieren können. Ein Client soll sich nicht mehrmals registrieren können. Vor einer Registrierung soll der Typ des Clients unbekannt sein und er soll nicht als Fahrzeug agieren können.
- **Anforderung 2120: Fahrzeug initialisieren**
Der Server soll dem Fahrzeug nach Registrierung alle bekannten Sektoren übermitteln.
- **Anforderung 2130: Sensor initialisieren**
Der Server soll dem Sensor nach Registrierung eine *UpdateSubscription*-Nachricht zusenden, um das Abonnement als aufgekündigt zu initialisieren.
- **Anforderung 2140: Sensoren abonnieren**
Sensoren sollen bei verbundenen Fahrzeugen abonniert sein.
- **Anforderung 2150: Sensoren deabonnieren**
Solange kein Fahrzeug verbunden ist, sollen die Sensoren nicht abonniert sein.
- **Anforderung 2160: Fahrzeug kann Umgebungsmodell abonnieren**
Ein Fahrzeug kann ein Abonnement für Umgebungsmodelle erstellen.
- **Anforderung 2170: Fahrzeug kann Abonnement aufkündigen**
Ein Fahrzeug kann ein bestehendes Abonnement für Umgebungsmodelle aufkündigen.

Nachrichtenverarbeitung

- **Anforderung 2200: Sensordaten weitergeben**
Empfangene Sensordaten sollen dekodiert und an den Fusionsalgorithmus übergeben werden.
- **Anforderung 2210: Umgebungsmodell weitergeben**
Ergebnisse des Fusionsalgorithmus sollen enkodiert und an die mit einem Abonnement verbundenen Fahrzeuge versendet werden.

Algorithmus

- **Anforderung 2300: Fusionsalgorithmus**

Der Dummy-Algorithmus „SampleAlgorithm“ der C++ Referenzimplementierung soll in Rust nachempfunden werden. Diese Implementation soll für jede eingehende *SensorFrame*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.2) eine *EnvironmentFrame*-Nachricht versenden. Aus der empfangenen *SensorFrame*-Nachricht soll hierzu lediglich der Zeitstempel in die *EnvironmentFrame*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.3) übertragen werden.

- **Anforderung 2310: OPTIONAL: Einbinden eines C++ Algorithmus**

Die C++ Referenzimplementierung definiert die Schnittstellen *Algorithmus*, *EventListener*, *UpdateQueue* und die Methode *AlgorithmFactory::Create*. Dadurch ist es der C++ Implementation möglich, wahlweise mit dem „Dummy“-Algorithmus oder mit dem Fusionsalgorithmus der Universität Ulm compiliert zu werden. Die Rust Implementation soll ebenfalls einen C++ Algorithmus, der diesen Schnittstellen entspricht, nutzen können.

Startparameter

- **Anforderung 2400: OPTIONAL: Startparameter für Logausgabe**

Ein Startparameter soll den Mindestlevel für Logausgaben auf der Konsole festlegen können. Gültige Level sind hierbei „err“, „warn“, „info“, „debug“ und „trace“. Nach dem Setzen eines Mindestlevel, sollen nur noch Ausgaben auf der Konsole erscheinen, die diesen Level oder einen höheren haben. Es gilt „err“ > „warn“ > „info“ > „debug“ > „trace“.

- **Anforderung 2410: OPTIONAL: Startparameter für die Netzwerkschnittstelle**

Ein Startparameter soll festlegen, auf welcher Netzwerkschnittstelle der Server auf eingehende Verbindungen lauscht. Bei keiner Angabe soll auf allen Netzwerkschnittstellen gelauscht werden (Standardwert 0.0.0.0).

- **Anforderung 2420: OPTIONAL: Startparameter für den TCP-Port**

Ein Startparameter soll festlegen, auf welchem TCP-Port der Server auf eingehende Verbindungen lauscht. Bei keiner Angabe soll auf dem TCP-Port 2000 gelauscht werden.

- **Anforderung 2430: OPTIONAL: Initialisierungsnachricht aus XML-Datei**

Ein Startparameter soll mit dem Pfad zu einer XER-Codierten Datei die *InitMessage*-Nachricht festlegen, die einem Fahrzeug nach dem Verbindungsaufbau zugesendet wird.

- **Anforderung 2440: OPTIONAL: Nur wenn der Dummy-Algorithmus geladen ist: Umgebungsmodell aus XML-Datei**

Ein Startparameter soll den Pfad zu einer XER-Codierten Datei festlegen, in der die *EnvironmentFrame*-Nachricht beinhaltet ist, die einem Fahrzeug zugesendet wird.

- **Anforderung 2450: OPTIONAL: Nur wenn der C++ Algorithmus geladen ist: Pfad an Algorithmus übergeben**

Ein Startparameter soll den Pfad zu einer Konfigurationsdatei festlegen. Dieser Pfad soll dem C++ Algorithmus beim Initiieren übergeben werden. Falls dieser Startparameter nicht angegeben wird, soll der Standardwert „/etc/MECViewServer/algorithmus.json“ übergeben werden.

4.2 Nichtfunktionale Anforderungen

Nichtfunktionale Anforderungen zeigen im Gegensatz zu funktionalen Anforderungen Rahmenbedingungen bei der Umsetzung des Systems auf [Gol12, S. 155].

Kontext

- **Anforderung 3000: Implementation in Rust**

Die Implementation des Servers soll in der Programmiersprache Rust vorgenommen werden.

- **Anforderung 3010: Kommunikationsprotokoll ist ASN.1/UPER**

Das Protokoll für die Kommunikation zwischen dem Server und den Clients soll ASN.1 mit der Encodierung UPER sein. Es sollen die bereits definierten Nachrichten verwendet und keine neuen Nachrichten definiert werden. Das Kommunikationsverhalten soll die Anforderungen der C++ Referenzimplementation erfüllen, sprich den Clients soll nicht ersichtlich sein, ob die Rust- oder die Referenzimplementation des Servers ausgeführt wird.

- **Anforderung 3020: Plattform MEC**

Die Implementation des Servers soll in kompilierter Form auf einem MEC Server mit dem Betriebssystem Ubuntu 16.04 LTS Server und der Architektur x86-64 ausführbar sein.

Reaktionsverhalten

- **Anforderung 3100: Reaktionszeit des Servers**

Die Implementation des Servers soll Nachrichten von 6 Videosensoren mit einem Nachrichtenintervall von 100ms, 7 Lidarsensoren mit einem Nachrichtenintervall von

50ms und zwei gleichzeitig verbundenen Fahrzeugen in unter 5ms beantworten können. Dies umfasst Nachricht dekodieren, Fusionsalgorithmus darbieten, Resultat enkodieren und versenden. Die Bearbeitungszeit des Fusionsalgorithmus zählt nicht dazu.

- **Anforderung 3110: Kein Echtzeitsystem**

Trotz vorgegebener Reaktionszeit wird das System nicht als hartes Echtzeitsystem gewertet. Eine Analyse für die maximale Reaktionszeit ist nicht verlangt. Stattdessen soll das System als weiches Echtzeitsystem gewertet werden, weswegen die durchschnittliche Reaktionszeit betrachtet wird.

Widerstandsfähigkeit

- **Anforderung 3200: OPTIONAL: Widerstand gegen Nachrichtenüberflutung**

Die Funktionalität des Servers gegenüber anderen Clients soll durch eine Überflutung von Nachrichten eines einzelnen Sensors nicht beeinträchtigt werden.

- **Anforderung 3210: OPTIONAL: Widerstand gegen Nachrichtenrückstau**

Die Funktionalität des Servers soll durch Fahrzeuge, für die sich ein Nachrichtenrückstau gebildet hat, oder von einzelnen langsamen Verbindungen nicht beeinträchtigt werden.

Qualität

- **Anforderung 3300: OPTIONAL: Continuous-Integration**

Eine Software zur kontinuierliche Integration soll fortlaufend den aktuellen Quellcode auf Übersetzungsfähigkeit überprüfen.

- **Anforderung 3310: OPTIONAL: Continuous-Integration mit Tests**

Eine Software zur kontinuierliche Integration soll fortlaufend den aktuellen Quellcode mittels Unit-Tests prüfen.

- **Anforderung 3320: OPTIONAL: Continuous-Integration liefert Artefakte**

Eine Software zur kontinuierliche Integration soll fortlaufend den aktuellen Quellcode übersetzen und diese Artefakte bereitstellen.

- **Anforderung 3330: Einhaltung des Styleguides**

Der Quellcode der Serverimplementation soll sich an den offiziellen Styleguide (siehe Abschnitt 2.16) halten.

5 Systemanalyse

In diesem Kapitel wird analysiert, wie sich das umzusetzende System in unterschiedlichen Situationen und gegenüber anderen Systemen verhalten muss. Um eine Gesamtübersicht über das System zu erhalten, wird zuerst ein Systemkontextdiagramm und Anwendungsfalldiagramme aufgezeigt, daraufhin eine Nachrichtenanalyse und eine Schnittstellenanalyse durchgeführt.

5.1 Systemkontextdiagramm

In Abbildung 5.1 ist das System „MEC-View Server“ abgebildet. Die Pfeile zeigen Kontroll- und Datenflüsse auf andere Systeme, mit denen eine Wechselwirkung stattfindet [Gol12, S. 501].

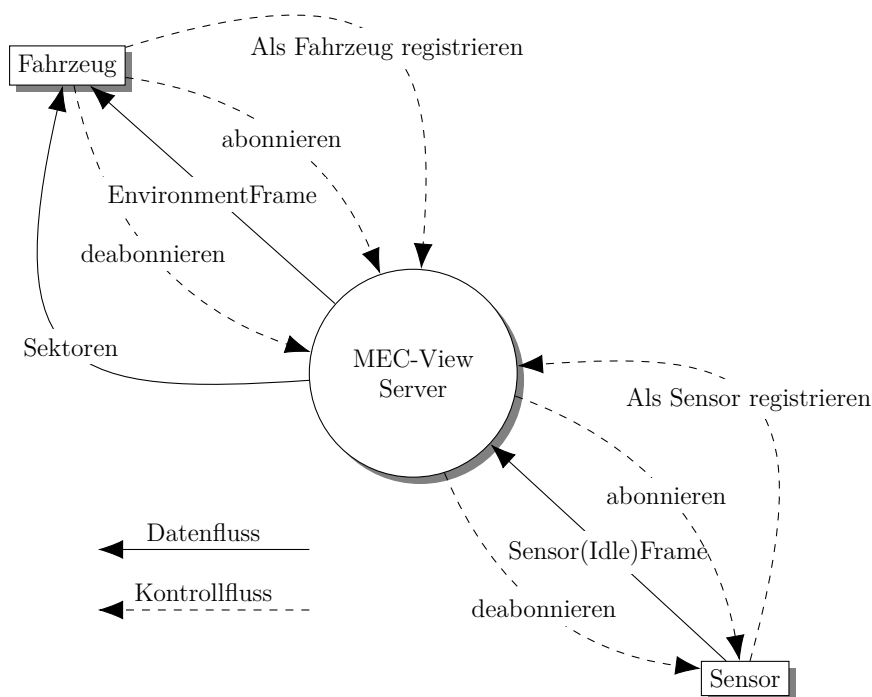


Abbildung 5.1: Systemkontextdiagramm

5.2 Gesamtübersicht der Anwendungsfälle

In diesem Kapitel werden die Kontroll- und Datenflüsse aus Abschnitt 5.1 genauer analysiert. Aufgrund des Umfangs ist dies in zwei Anwendungsfalldiagramme aufgeteilt.

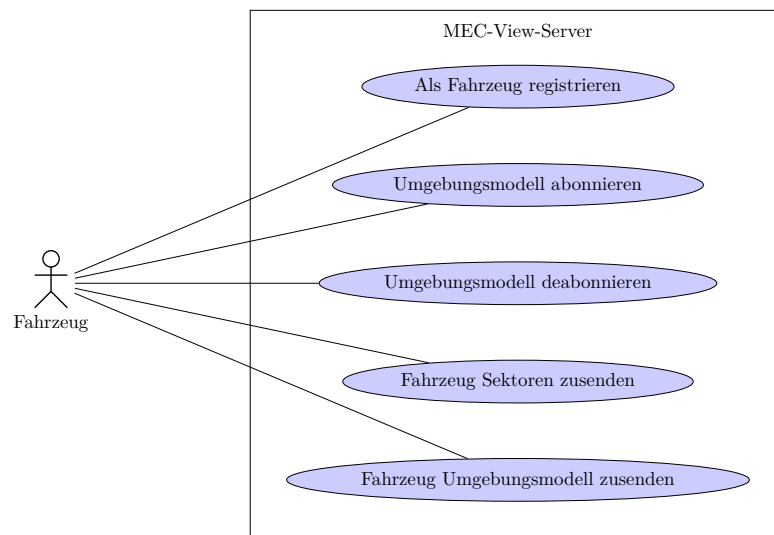


Abbildung 5.2: Anwendungsfalldiagramm des MEC-View-Servers für den Akteur „Fahrzeug“

Das Anwendungsfalldiagramm in Abbildung 5.2 zeigt die Funktionalität des Servers, die gegenüber einem Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden soll. Das folgende Anwendungsfalldiagramm in Abbildung 5.3 zeigt dagegen die Funktionalität, die einem Sensor zur Verfügung gestellt werden soll.

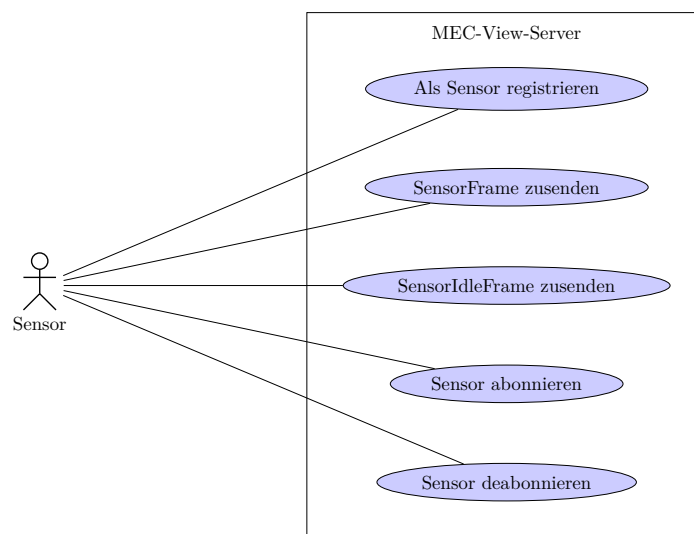


Abbildung 5.3: Anwendungsfalldiagramm des MEC-View-Servers für den Akteur „Sensor“

5.3 Beschreibung der Anwendungsfälle

Die einzelnen Anwendungsfälle aus Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 sollen in diesem Kapitel genauer erklärt werden.

5.3.1 Als Fahrzeug registrieren

Initiator:	Fahrzeug
Beteiligte Akteure:	Fahrzeug
Vorbedingung:	Noch nicht registriert
Basisablauf:	Ein neu verbundenes Fahrzeug kann sich dem Server gegenüber als Fahrzeug registrieren. Eine Registrierung kann für jede Verbindung nur einmal vorgenommen werden und wird durch die Übermittlung einer <i>ClientRegistration</i> -Nachricht durchgeführt (siehe Unterabschnitt 5.4.1).
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Das Fahrzeug kann alle weiteren, dem Fahrzeug zugeordneten, Use-Cases ausführen.

5.3.2 Umgebungsmodell abonnieren

Initiator:	Fahrzeug
Beteiligte Akteure:	Fahrzeug
Vorbedingung:	Ist als Fahrzeug registriert
Basisablauf:	Ein Fahrzeug kann das Umgebungsmodell abonnieren, woraufhin neue Modelle vom Server an das Fahrzeug übermittelt werden. Ein Abonnement wird durch eine <i>UpdateSubscription</i> -Nachricht aktualisiert (siehe Unterabschnitt 5.4.4).
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Neue Umgebungsmodelle werden an das Fahrzeug übermittelt.

5.3.3 Umgebungsmodell deabonnieren

Initiator:	Fahrzeug
Beteiligte Akteure:	Fahrzeug
Vorbedingung:	Umgebungsmodell ist abonniert
Basisablauf:	Ein Fahrzeug kann das Umgebungsmodell deabonnieren, woraufhin keine neuen Modelle mehr vom Server an das Fahrzeug übermittelt werden. Ein Abonnement wird durch eine <i>UpdateSubscription</i> -Nachricht aktualisiert (siehe Unterabschnitt 5.4.4).
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Es werden keine weiteren Umgebungsmodelle an das Fahrzeug übermittelt.

5.3.4 Als Sensor registrieren

Initiator:	Sensor
Beteiligte Akteure:	Sensor
Vorbedingung:	Noch nicht registriert
Basisablauf:	Ein neu verbundener Sensor kann sich dem Server gegenüber als Sensor registrieren. Eine Registrierung kann für jede Verbindung nur einmal vorgenommen werden und wird durch die Übermittlung einer <i>ClientRegistration</i> -Nachricht durchgeführt (siehe Unterabschnitt 5.4.1).
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Der Sensor kann alle weiteren, dem Sensor zugeordneten, Use-Cases ausführen.

5.3.5 SensorFrame zusenden

Initiator:	Sensor
Beteiligte Akteure:	Sensor
Vorbedingung:	Ist als Sensor registriert
Basisablauf:	Ein Sensor kann dem Server eine <i>SensorFrame</i> -Nachricht übermitteln. Der Server soll diese Nachricht dem Fusionsalgorithmus weiterleiten.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	–

5.3.6 SensorIdleFrame zusenden

Initiator:	Sensor
Beteiligte Akteure:	Sensor
Vorbedingung:	Ist als Sensor registriert, Sensor ist nicht abonniert.
Basisablauf:	Ein Sensor kann dem Server eine <i>SensorIdleFrame</i> -Nachricht übermitteln.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	–

5.3.7 Sensor abonnieren

Initiator:	MEC-View-Server
Auslöser:	Ein Fahrzeug hat sich registriert.
Beteiligte Akteure:	Sensor
Vorbedingung:	Ist als Sensor registriert
Basisablauf:	Der MEC-View-Server sendet eine <i>UpdateSubscription</i> -Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.4), um ein Abonnement zu erstellen.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Der MEC-View-Server erhält <i>SensorFrame</i> -Nachrichten und keine <i>SensorIdleFrame</i> -Nachrichten.

5.3.8 Sensor deabonnieren

Initiator:	MEC-View-Server
Auslöser:	Das letzte verbundene Fahrzeug hat die Verbindung getrennt.
Beteiligte Akteure:	Sensor
Vorbedingung:	Ist als Sensor registriert
Basisablauf:	Der MEC-View-Server sendet eine <i>UpdateSubscription</i> -Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.4), um ein Abonnement zu beenden.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Der MEC-View-Server erhält keine weiteren <i>SensorFrame</i> -Nachrichten, jedoch <i>SensorIdleFrame</i> -Nachrichten.

5.3.9 Fahrzeug Sektoren zusenden

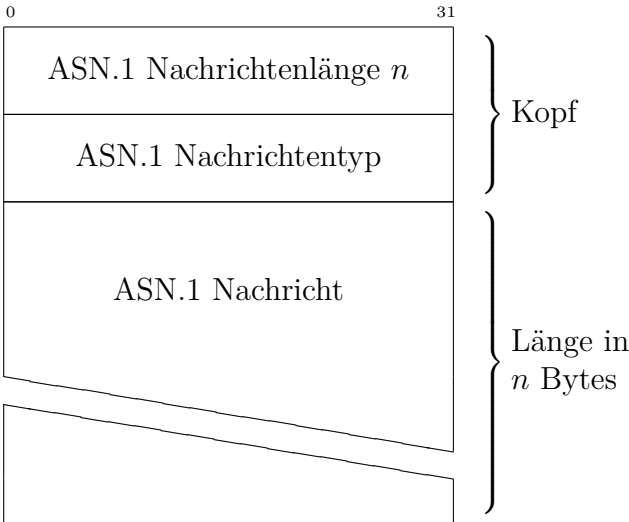
Initiator:	MEC-View-Server
Auslöser:	Das Fahrzeug hat eine <i>ClientRegistration</i> -Nachricht gesendet.
Beteiligte Akteure:	Fahrzeug
Vorbedingung:	Ist als Fahrzeug registriert, Sektoren noch nicht übermittelt
Basisablauf:	Der MEC-View-Server soll dem Fahrzeug einmalig nach Registrierung alle bekannten Sektoren in einer <i>InitMessage</i> -Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.5) zusenden.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	Sektoren können nicht erneut zugesendet werden.

5.3.10 Fahrzeug Umgebungsmodell zusenden

Initiator:	MEC-View-Server
Auslöser:	Der Algorithmus hat ein neues Umgebungsmodell erstellt.
Beteiligte Akteure:	Fahrzeug
Vorbedingung:	Fahrzeug ist abonniert
Basisablauf:	Der MEC-View-Server kann dem Fahrzeug Umgebungsmodelle mit <i>EnvironmentFrame</i> -Nachrichten (siehe Unterabschnitt 5.4.3) zusenden.
Alternativablauf:	–
Nachbedingung:	–

5.4 Nachrichtenanalyse

Eine ASN.1 Nachricht wird, wie in Abbildung 5.4 zu sehen, mit vorangestellten Kopfdaten versendet. Diese Kopfdaten enthalten die Länge der ASN.1 Nachricht und dessen Typ, der bei der Dekodierung beim Empfängers bekannt sein muss. Die Nachrichtenlänge und der Nachrichtentyp werden als 32-Bit lange und vorzeichenlose Ganzzahlen übermittelt und entsprechen damit dem Datentyp `u32` in Rust. Sie werden als „Big-Endian“ auf dem Datenstrom dargestellt.



Die Nachrichtenlänge gibt die Länge der ASN.1 Nachricht in Bytes an.

Abbildung 5.4: ASN.1 Nachricht mit Kopfdaten

Für den Nachrichtentyp sind nur die in Abbildung 5.5 gelisteten Werte gültig und werden im Anschluss erklärt.

Typ	Nachricht	Aus Sichtweise des Servers
0	„Nicht definiert“	–
1	ClientRegistration	eingehend
2	SensorFrame	eingehend
3	EnvironmentFrame	ausgehend
4	UpdateSubscription	bidirektional
5	InitMessage	ausgehend
6	RoadClearanceFrame	ausgehend
7	SensorIdleFrame	eingehend

Abbildung 5.5: Gültige ASN.1 Nachrichtentypen

5.4.1 ClientRegistration

Die ClientRegistration-Nachricht sendet der Client nach dem Verbindungsaufbau dem Server zu, um mitzuteilen, ob es sich um einen Sensor oder ein Fahrzeug handelt.

5.4.2 SensorFrame

Die SensorFrame-Nachricht wird vom Sensor an den Server versendet und beschreibt Objekte, die der Sensor erkannt hat.

5.4.3 EnvironmentFrame

Die EnvironmentFrame-Nachricht wird vom Server an das Fahrzeug versendet und enthält das Ergebnis des Fusionsalgorithmus.

5.4.4 UpdateSubscription

Die UpdateSubscription-Nachricht wird vom Server an den Sensor oder vom Fahrzeug an den Server gesendet. Der Server kann sich damit am Sensor an einem SensorFrame-Abonnement anmelden oder abmelden, während das Fahrzeug sich am Server am EnvironmentFrame-Abonnement anmelden oder abmelden kann.

5.4.5 InitMessage

Die InitMessage-Nachricht wird vom Server, nach einer Fahrzeuganmeldung, an das Fahrzeug gesendet und beinhaltet Koordinaten über die Sektoren, die die Sensoren beobachten.

5.4.6 RoadClearanceFrame

Die RoadClearanceFrame-Nachricht wird vom Server an das Fahrzeug versendet und kann Verkehrs-, Wetter- und andere Informationen über die Sektoren enthalten.

5.4.7 SensorIdleFrame

Die SensorIdleFrame-Nachricht wird vom Sensor in regelmäßigen Zeitintervallen an den Server versendet, wenn der Sensor nicht abonniert ist. Die Anwesenheit des Sensors wird somit festgestellt. Für diese Bachelorarbeit ist der Inhalt dieser Nachricht nicht relevant, lediglich ein fehlerfreies dekodieren muss sichergestellt sein. In der Referenzimplementierung des Forschungsprojekts wird dagegen versucht, mit dieser Nachricht eine Fehlfunktion des Sensors festzustellen.

5.5 Schnittstellenanalyse

In diesem Kapitel werden die Schnittstellen analysiert, über die der MEC-View-Server mit dem Sensor und dem Client kommuniziert. Für die Darstellung der Kommunikation mittels asynchronen Nachrichten werden Sequenzdiagramme verwendet. Aktionen in „loop“-Abschnitten werden so lange wiederholt, bis die erste darauf folgende Aktion eintritt. In den Diagrammen sind in geschweiften Klammern hinter den Nachrichtentypen für die Erläuterung relevante Attribute mit Namen und Wert aufgeführt. Unvollständige Aufzählungen sind mit zwei Punkten für irrelevante Attributen abgekürzt.

5.5.1 Sensor und MEC-View-Server

In der folgenden Abbildung 5.6 ist die Kommunikation zwischen einem Sensor und dem MEC-View-Server zu sehen.

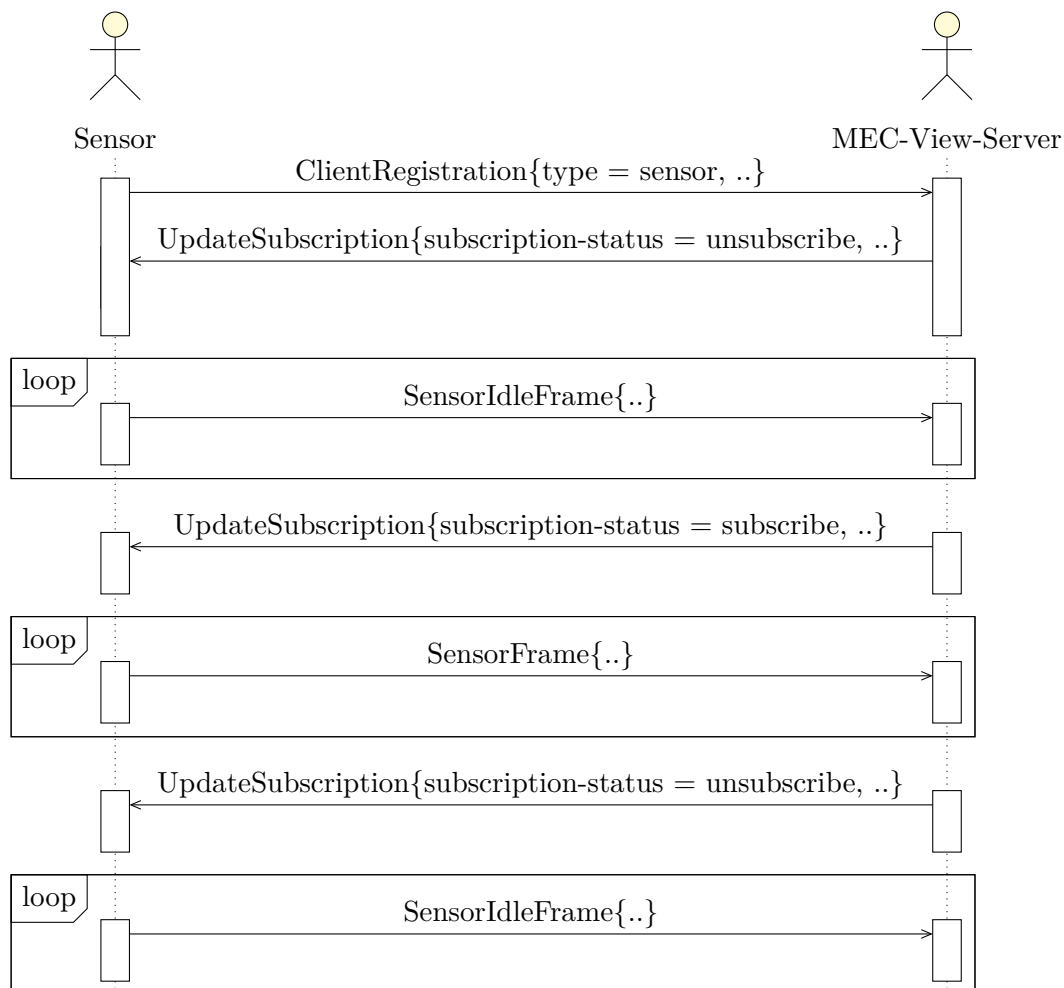


Abbildung 5.6: Kommunikation zwischen Sensor und MEC-View-Server

Nach Verbindungsaufbau versendet der Sensor eine *ClientRegistration*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.1), um sich am Server als Sensor zu registrieren. Der Server beantwortet dies mit einer *UpdateSubscription*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.4) um klarzustellen, dass kein Abonnement gewünscht ist. Der Sensor versendet darauf folgend in regelmäßigen Abständen *SensorIdleFrame*-Nachrichten (siehe Unterabschnitt 5.4.7). Nach unbekannter Zeit kann der Server ein Abonnement erstellen, indem eine entsprechende *UpdateSubscription*-Nachricht versendet wird. Daraufhin sendet der Sensor dem Server anstatt *SensorIdleFrame*-Nachrichten *SensorFrame*-Nachrichten (siehe Unterabschnitt 5.4.2) zu, bis dieser das Abonnement mit einer *UpdateSubscription*-Nachricht wieder aufkündigt.

5.5.2 Fahrzeug und MEC-View-Server

In der folgenden Abbildung 5.7 ist die Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und dem MEC-View-Server zu sehen.

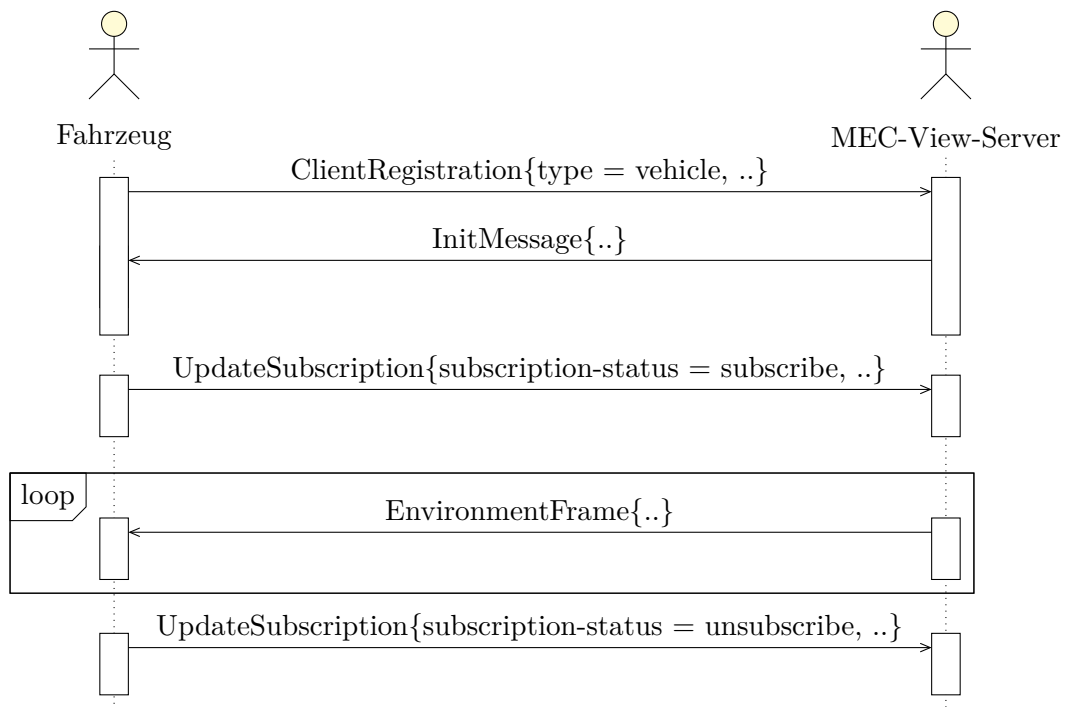


Abbildung 5.7: Kommunikation zwischen Fahrzeug und MEC-View-Server

Nach Verbindungsaufbau versendet das Fahrzeug eine *ClientRegistration*-Nachricht um sich am Server als Fahrzeug zu registrieren. Der Server beantwortet dies mit einer *InitMessage*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.5) mit Informationen zu bekannten Sektoren. Bis das Fahrzeug ein Abonnement mittels einer *UpdateSubscription*-Nachricht erstellt, werden keine weiteren Nachrichten ausgetauscht. Während eines gültigen Abonnements sendet der Server Umfeldmodelle in *EnvironmentFrame*-Nachrichten (siehe Unterabschnitt 5.4.3)

an das Fahrzeug. Durch eine *UpdateSubscription*-Nachricht kann das Fahrzeug jederzeit das Abonnement aufkündigen und erhält daraufhin keine weiteren *EnvironmentFrame*-Nachrichten.

5.5.3 Sensor, Fahrzeug und MEC-View-Server

In Abbildung 5.8 ist das Zusammenspiel des Sensors aus Abbildung 5.6, des Fahrzeugs aus Abbildung 5.7 und des MEC-View-Servers zu sehen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wurden die Nachrichtentypen durch Anweisungen ersetzt. Es ist zu erkennen, dass der Server bereits ein Abonnement gegenüber dem Sensor erstellt, sobald sich ein Fahrzeug registriert. Dieses Abonnement ist so lange gültig, wie zumindest ein Fahrzeug verbunden ist.

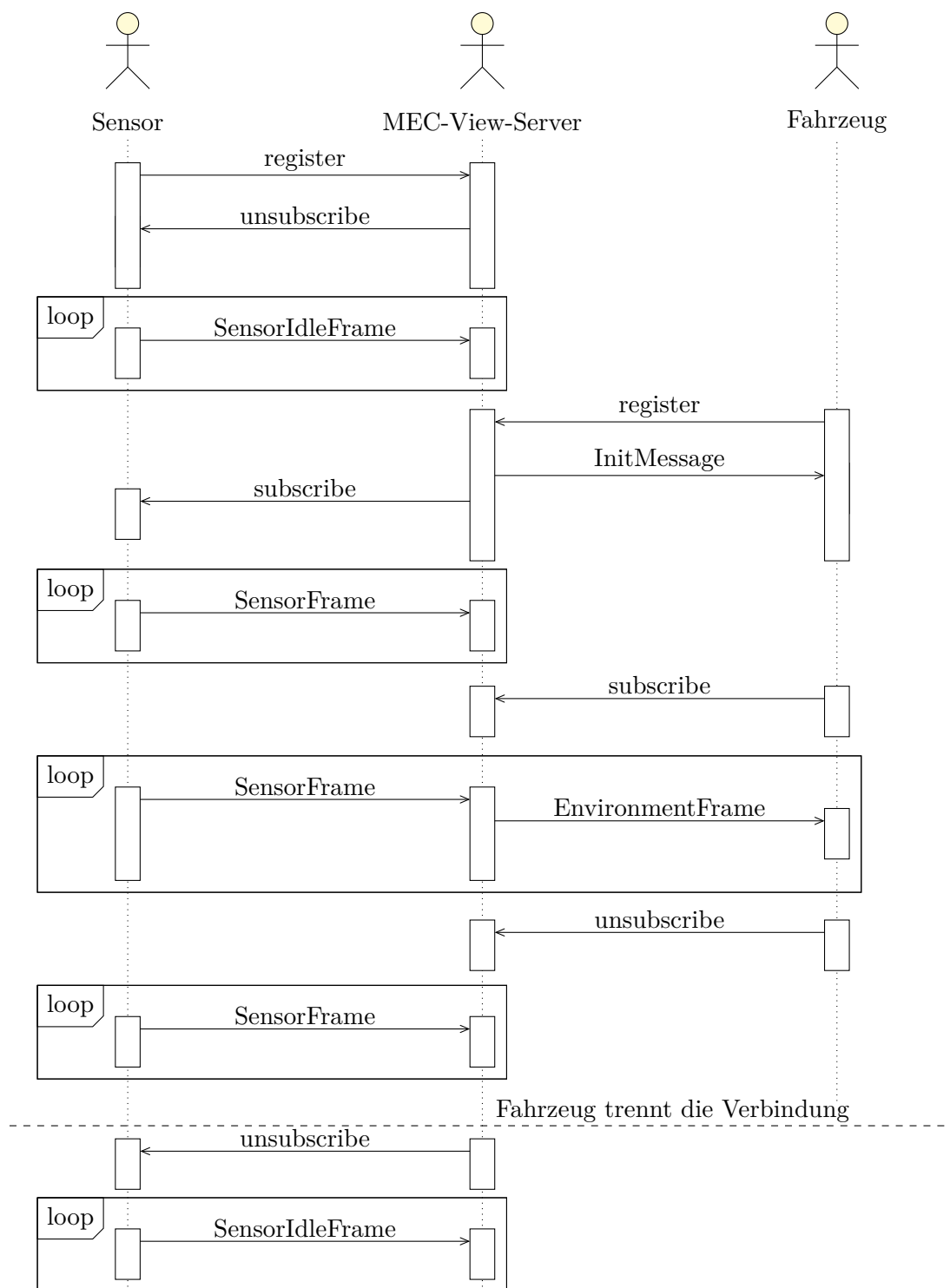


Abbildung 5.8: Interaktion des MEC-View-Servers mit einem Fahrzeug und einem Sensor

6 Systementwurf

In diesem Kapitel wird ein Entwurf für die Implementation des Systems aufgezeigt. Die Struktur des Systems wird durch einen Architekturentwurf visualisiert und die zu verwendeten Technologien erläutert.

6.1 Kein ASN.1 Compiler für Rust

Eine frühe Recherche hat ergeben, dass kein ASN.1 Compiler für Rust verfügbar ist. Mit *yasna*, *raisin* und *rust-asn1* wird teilweise ASN.1 Funktionalität in Rust zur Verfügung gestellt, aber keine dieser Crates unterstützt die benötigte UPER Codierung. Auch kann keine der genannten Crates die in ASN.1 Notation definierten Nachrichten in native Rust Datenstrukturen übersetzen. Die von der ITU genannten Compiler¹ unterstützen Rust auch nicht. Dieser Umstand erzwingt die Nutzung der C-Datenstrukturen, wie die Referenzimplementierung, mittels Foreign Function Interface (siehe Abschnitt 2.22). Zur besseren Kapselung ist die Einbindung der ASN.1 Nachrichten deswegen in mehreren Schritten in zwei Crates ausgelagert.

6.2 Framework Tokio

Das Framework Tokio wird als Grundlage für die Umsetzung der Architektur genutzt. Tokio² bietet eine „Laufzeit zum Schreiben von zuverlässigen, asynchrone und schlanke Anwendungen in Rust“ [Ler17].

Tokio nutzt die Crates *mio* und *Future*, um eine ereignisorientierte, asynchrone und daher nicht blockierende Ein-/Ausgabeplattform zu bieten. Bearbeitungsschritte sind in „Futures“ (dt. Zukunft, hier in etwa: „ein zukünftiger Wert“) aneinandergereiht und verpackt.

Neben den genannten technischen Funktionen ist hervorzuheben, dass das Framework von vielen Entwicklern aus dem Rust-Entwicklerteam mindestens mitentwickelt wird³. Aufgrund dessen ist ein hoher Grad an Qualität und Aktualität des Frameworks zu erwarten.

¹<https://www.itu.int/en/ITU-T/asn1/Pages/Tools.aspx>

²<https://crates.io/crates/tokio>

³u.a. Alex Crichton, Carl Lerche, Aaron Turon: <https://github.com/tokio-rs/tokio/graphs/contributors>

6.3 Architektur

In Abbildung 6.1 ist der Entwurf der Architektur visualisiert. Blau markierte Klassen haben als Aufgabengebiet die Kommunikation, grün markierte Klassen bilden die Geschäftslogik ab und rot markierte Klassen sind Spezialisierungen für ASN.1. Die folgenden ASN.1 Nachrichten sind aufgrund der Textlänge im Diagramm abgekürzt:

- **asn::CR**: *ClientRegistration*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.1),
- **asn::IM**: *InitMessage*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.5),
- **asn::US**: *UpdateSubscription*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.4),
- **asn::EF**: *EnvironmentFrame*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.3),
- **asn::SIF**: *SensorIdleFrame*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.7) und
- **asn::SF**: *SensorFrame*-Nachricht (siehe Unterabschnitt 5.4.2).

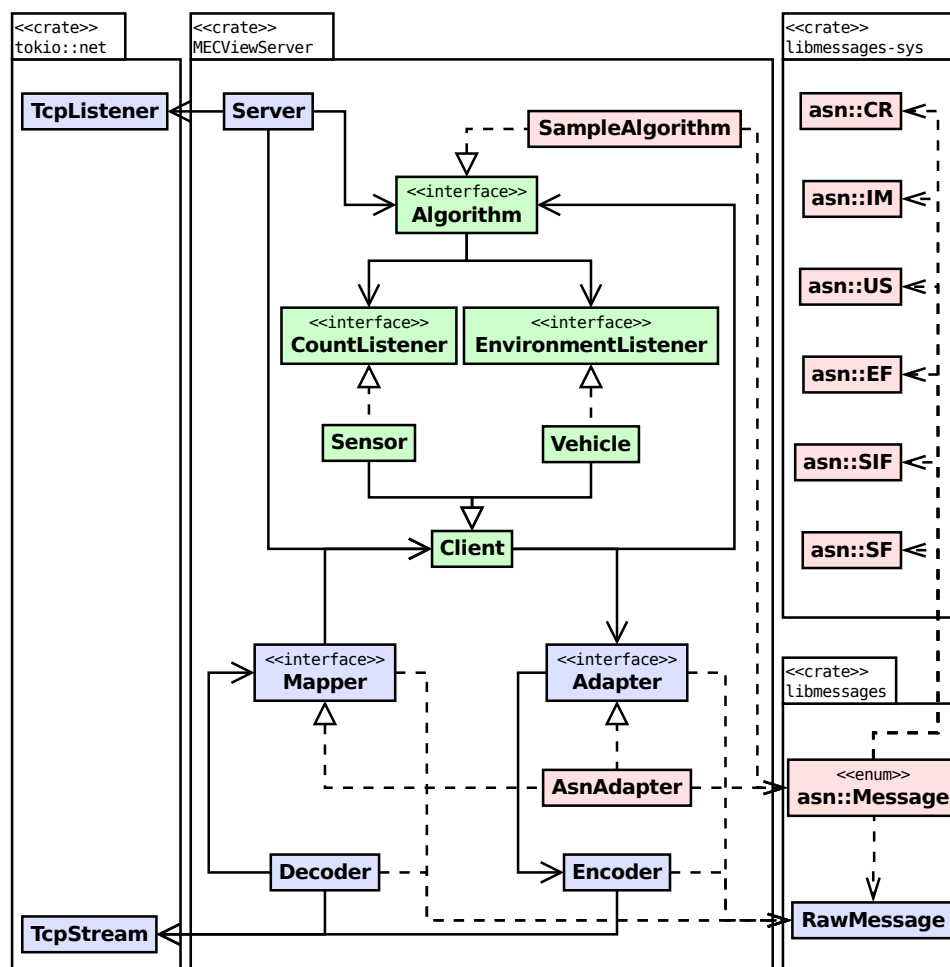


Abbildung 6.1: Architekturentwurf

Die grün und blau markierten Klassen aus Abbildung 6.1 haben keine direkten Abhängigkeiten zu den ASN.1 Nachrichtentypen. Klassen, die eine Nachricht weiterleiten müssen und deshalb einen Berührungspunkt mit diesen haben, verwenden *Generics* (so muss der Client *SensorFrame*-Nachrichten an den Algorithmus weiterleiten, den konkreten Typ jedoch nicht kennen). Lediglich durch die Nutzung in Kombination mit den ASN.1 Nachrichtentypen entstehen zur Compilezeit Abhängigkeiten, die aufgrund der Übersicht aber nicht eingezeichnet sind.

Die Klasse *RawMessage* aus der Crate *libmessages* ist eine Containerklasse, um binäre Daten mit Typindikatoren zwischen Decoder und Mapper und zwischen Encoder und Adapter auszutauschen. Die Klasse selbst hat keine weiteren Abhängigkeiten und ist von der eingesetzten Nachrichtentechnologie unabhängig. Die *asn::Message* soll Methoden bereitstellen, eine Instanz einer ASN.1 Nachricht in eine *RawMessage* zu serialisieren und eine Instanz einer ASN.1 Nachricht aus einer *RawMessage* zu deserialisieren.

Die Implementation ist in drei Crates aufgeteilt:

- **libmessages-sys:** Enthält Bindings für die ASN.1 Datenstrukturen und Funktionen der C-Bibliothek (siehe Abschnitt 2.22). Unsichere Funktionsaufrufe nach C, wie zur Serialisierung und Deserialisierung, sind durch sichere Rust Funktionen gekapselt. Eine ordnungsgemäße Allokation und Deallokation der Nachrichten wird hier sichergestellt.
- **libmessages:** Stellt Datenstrukturen und Implementationen bereit um unabhängig von der eingesetzten Nachrichtentechnologie eine Nachricht abbilden zu können. Hierzu wird in *RawMessage* der Kopf (siehe Abschnitt 5.4) und der binären Inhalt einer Nachricht dargestellt.

Zusätzlich ist in dieser Crate für jede verwendete Technologie (in dieser Bachelorarbeit nur ASN.1) die Wandlung zwischen einer *RawMessage* und einer entsprechenden Datenstruktur implementiert.

- **MECViewServer:** Enthält die Logik für den Sensor, das Fahrzeug und den Algorithmus und bündelt sie mit der Kommunikationslogik zu einem ausführbaren Kompilat.
- **tokio::net:** Diese Crate ist Teil des Frameworks von Tokio (siehe Abschnitt 6.2) und wird hier lediglich aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt. Anstatt die TCP-Klassen der Standardbibliothek zu nutzen, werden die erweiterten Versionen von Tokio genutzt. Die TCP-Klassen von Tokio können asynchron mittels *Futures* und Kanälen genutzt werden, wie es in der Standardbibliothek (noch [Rusx]) nicht möglich ist.

Erklärung Server

Der Server instanziiert beim Start einen konkreten Algorithmus, öffnet einen TCP-Port und wartet auf dem daraus resultierenden *TcpListener* auf neue Clients. Jedem neuen Client wird eine Referenz auf den Algorithmus übergeben und asynchron bearbeitet.

Erklärung Client, Sensor und Vehicle

Der Client hält eine Referenz auf einen Algorithmus und einen Adapter. Im Falle eines *Vehicles* kann ein *EnvironmentListener* am Algorithmus registriert werden, um neue Umgebungsmodelle zu erhalten. Im Falle eines *Sensors* kann ein *CountListener* am Algorithmus registriert werden, um über Änderungen bei der Anzahl der registrierten Fahrzeuge informiert zu werden.

Erklärung Adapter

Der Adapter bietet Schnittstellen, damit eine Client-Instanz Nachrichten versenden kann, ohne die eingesetzte Nachrichtentechnologie zu kennen. Hierzu wird der Client-Instanz Funktionen bereitgestellt, die von der Adapterimplementation in entsprechende Nachrichten übersetzt werden.

Erklärung Mapper

Der Mapper ruft für empfangene Nachrichten der eingesetzten Nachrichtentechnologie Funktionen der Client-Instanz auf und agiert somit als Gegenstück zum Adapter.

Erklärung Encoder / Decoder

Der Encoder schreibt *RawMessages* auf den TCP-Datenstrom, während der Decoder *RawMessages* vom TCP-Datenstrom liest. Hierzu wird eine Wandlung, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, vorgenommen.

Nachrichtentechnologie kapseln

Innerhalb der MECViewServer Crate sollen möglichst wenige Klassen die eingesetzt Nachrichtentechnologie kennen. Hierzu zählen die Algorithmus- (*SampleAlgorithmus*), Mapper- und Adapterimplementationen (*AsnAdapter*). Dies ist unumgänglich, weil sowohl der eingesetzte Algorithmus, der Mapper und der Adapter Felder einer Nachricht sowohl lesen als auch schreiben muss. Zudem muss der Server mindestens indirekt die eingesetzte Technologie kennen, um die richtigen und zueinander kompatiblen Algorithmus-, Mapper- und

Adapterimplementation zu instanziiieren. Weitere Klassen agieren dagegen unabhängig von der eingesetzten Nachrichtentechnologie.

6.3.1 Kommunikationsarchitektur

Um ein Mehrkernsystem effizient zu nutzen, arbeiten einige Klassen asynchron zueinander. Hierzu zählt der Server, der fortlaufend neue Verbindungen annimmt. Die daraus resultierenden Client-Instanzen bearbeiten asynchron eingehende Anfragen. Letztendlich aktualisiert auch der Algorithmus asynchron zu den Client-Instanzen und dem Server das Umfeldmodell.

Die Kommunikation zwischen einem TCP-Datenstrom und einer Client-Instanz soll mittels des „Channel Architektur Pattern“ [Dou03, S. 157] verwirklicht werden. Das Muster eignet sich besonders gut, da auf eingehende und ausgehende Datensätze eine immer gleiche Transformation angewandt werden muss:

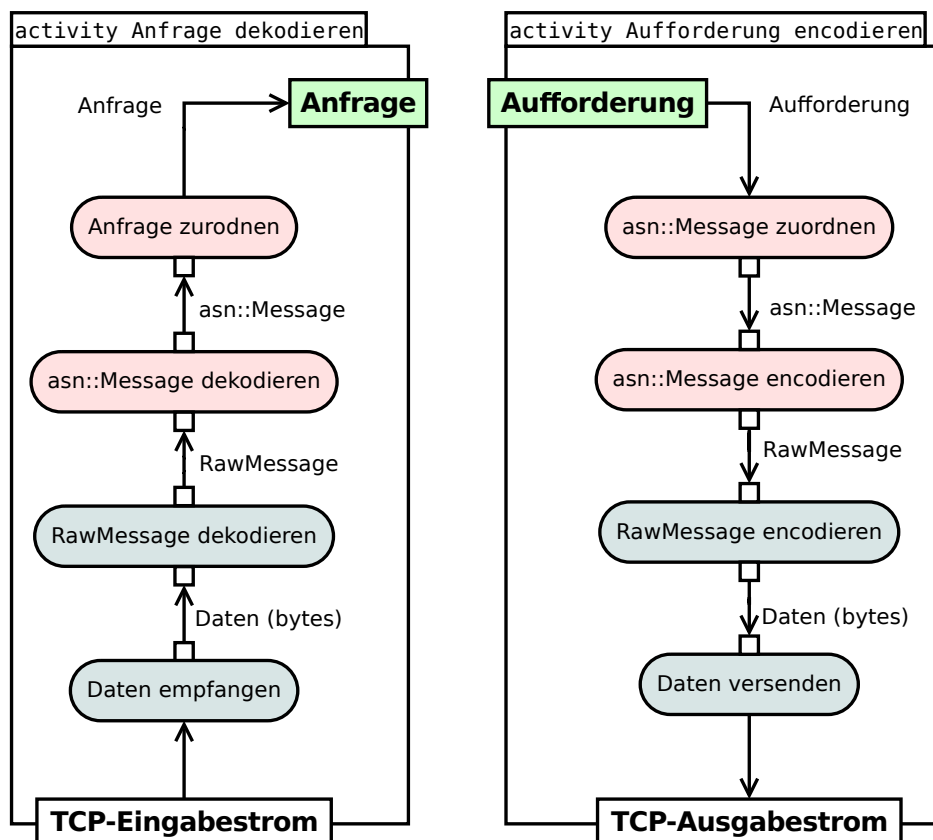


Abbildung 6.2: Aktivitätsdiagramme zum Dekodieren einer Anfrage aus dem TCP-Datenstrom (unten) und zum Versenden einer Aufforderung (oben).

Die Aktivitätsdiagramme in Abbildung 6.2 beschreiben die nötigen Transformationen, um eine empfangene Anfrage zu dekodieren und um eine Aufforderung zu encodieren und zu

versenden:

- **Daten empfangen:** Die eingehenden Daten (hier Bytes) müssen angesammelt werden, bis sie eine komplette Anfrage abbilden.
- **RawMessage dekodieren:** Die angesammelten Daten werden in eine RawMessage gewandelt. Nachrichtentyp und Inhalt werden hierbei extrahiert.
- **asn::Message dekodieren:** Aus dem Inhalt wird eine ASN-Nachricht des entsprechenden Typs dekodiert.
- **Anfrage zuordnen:** Die ASN-Nachricht wird einer Anfrage zugeordnet.
- **asn::Message zuordnen:** Die Aufforderung wird in eine ASN-Nachricht eingebettet.
- **asn::Message encodieren:** Die ASN-Nachricht wird in eine RawMessage encodiert. Der Nachrichtentyp wird entsprechend gesetzt.
- **RawMessage encodieren:** Die RawMessage wird in Bytes gewandelt.
- **Daten versenden:** Die Bytes werden über den TCP-Datenstrom versandt.

Nach dem „Channel Architektur Pattern“ ist eine sequentielle Bearbeitung zwischen dem TCP-Datenstrom und der Client-Instanz in jede Richtung als Kanal interpretierbar (sprich jedes Aktivitätsdiagramm aus Abbildung 6.2). Da jeder Zwischenschritt innerhalb eines Kanals lediglich vom Ergebnis des vorhergehenden abhängig ist, könnten die einzelnen Schritte parallel zueinander bearbeiten werden. Durch einen zusätzlich vorangestellten Multiplexer und nachfolgenden Demultiplexer könnten zudem mehrere Kanäle parallel die Client-Instanz oder den Datenstrom speisen. Hiervon wird in der ersten Implementierung jedoch abgesehen, da je Client keine derart große Datenflut erwartet wird. Stattdessen werden viele Clients erwartet, weshalb jeder Kanal eines Clients parallel zu den Kanälen anderer Clients ausgeführt werden soll.

Als Framework zur Umsetzung wird *Tokio* (siehe Abschnitt 6.2) verwendet. Durch die Kombinationsmöglichkeiten von *Futures* und nicht blockierenden Kommunikationskanälen ermöglicht es, ein System nach diesem Prinzip zu erstellen.

7 Implementierung

In diesem Kapitel wird auf Besonderheiten und Schwierigkeiten bei der Implementierung des Systems eingegangen. Optionale Anforderungen, die umgesetzt wurden, werden zudem erwähnt und die Umsetzung erklärt.

7.1 Continuous Integration mittels Jenkins

Um die nichtfunktionalen Anforderungen zur Qualität umsetzen zu können (Anforderung 3300, siehe Abschnitt 4.2), wird die Continuous Integration Software Jenkins genutzt. Nach jeder Aktualisierung des Quellcode-Repository wird eine neuer Compileversuch gestartet. In einem Jenkins-File ist hierzu die folgende Pipeline definiert:

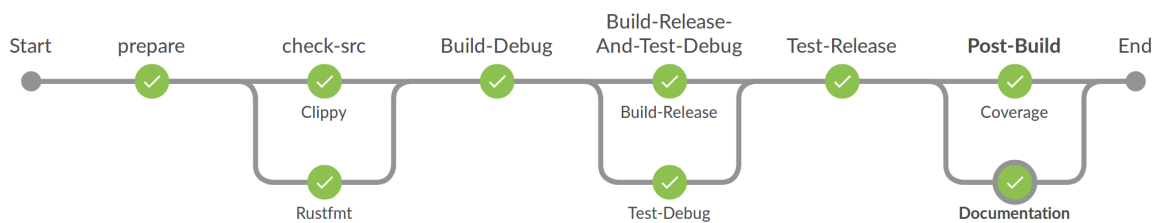


Abbildung 7.1: Jenkins Pipeline Graph

Im Folgenden sind die einzelnen Schritte genauer erklärt.

Schritt „prepare“

In diesem Schritt wird überprüft, ob die richtige Version von Rust installiert ist. Sowohl der Rust Compiler als auch Abhängigkeiten wie Cargo, Clippy oder Tarpaulin werden falls nötig in diesem Schritt nachinstalliert und aktualisiert.

Schritt „check-src“

Hier wird der Quellcode auf einen schlechten Programmierstil oder schlechte Programmierpraktiken durch Clippy und auf eine nicht standardkonforme Formatierung überprüft (Anforderung 3330, siehe Abschnitt 4.2). Ein erkannter Mangel resultiert in einem Abbruch und entsprechendem roten Icon auf der Projektseite auf Jenkins. Ein Quellcode, der diese Qualitätsstandards nicht erfüllt, wird somit schnellstmöglich abgelehnt.

Schritt „Build-Debug“

In diesem Schritt wird das Projekt im Debug-Modus compiliert. In einem Debug-Modus werden nahezu keine Optimierungen durchgeführt, weswegen die Ausführungsgeschwindigkeit meist mangelhaft ist. Im Falle eines Fehlers in einem Unit-Test, können aus einem Debug-Artefakt jedoch nützlich Informationen gewonnen werden.

Schritt „Build-Release-And-Test-Debug“

Wie der Name bereits vermuten lässt, wird in diesem Schritt das Projekt im Release-Modus übersetzt. Gleichzeitig wird das zuvor erstellte Debug-Artefakt auf Fehler überprüft, indem Unit-Tests ausgeführt werden (Anforderung 3310, siehe Abschnitt 4.2). Ein Release-Artefakt ist stark optimiert und ist für den Produktivbetrieb geeignet.

Schritt „Test-Release“

In diesem Schritt wird das Release-Artefakt mittels Unit-Tests auf Fehler überprüft. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass kein Fehler durch Optimierungen des Compilers aufgedeckt oder verursacht wurde. Des Weiteren soll kein Artefakt archiviert werden, das nicht auf Fehler überprüft wurde.

Schritt „Post-Build“

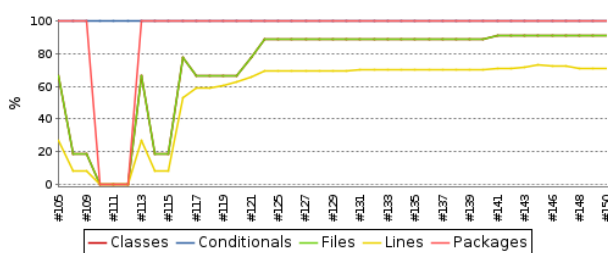
Dieser Schritt dient zur Zusammenstellung der Testabdeckung der Unit-Tests und der automatisierten Erstellung der Dokumentation.

Ergebnis des erfolgreichen Durchlaufs

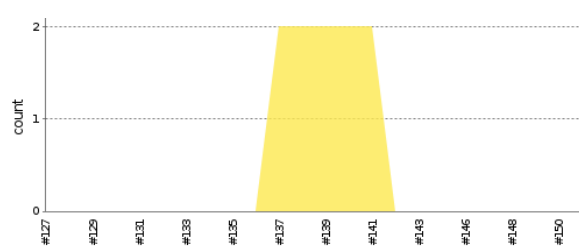
Jede Aktualisierung des Quellcode-Repository resultiert bei erfolgreicher Compilation und Durchlaufen der Tests in den folgenden Artefakten (Anforderung 3320, siehe Abschnitt 4.2):

- **Debug-Artefakt:** Compilation für eine manuelle Fehlersuche mit vielen auf den Quellcode bezogenen Symbolen und ohne Optimierungen durch den Compiler.
- **Release-Artefakt:** Kompilat mit Optimierungen für den Produktivbetrieb.
- **Testbericht:** Bericht über wie viele Zeilen, Dateien, Klassen und Verzweigungen durch die Unit-Tests getestet wurden.
- **Dokumentation:** Die aus dem Quellcode generierte Dokumentation inklusive der Dokumentationen der Abhängigkeiten.

Für jeden erfolgreichen Bauvorgang, werden die erhobenen Informationen in die folgenden Graphen auf der Projektseite auf Jenkins übernommen:



(a) Jenkins Coverage Graph



(b) Jenkins Warnings Graph

Abbildung 7.2a zeigt die Testabdeckung seit Aufzeichnungsbeginn. Die frühen und starken Schwankungen resultieren aus Testdurchläufen bei der Einrichtung des Graphen. Abbildung 7.2b zeigt Warnungen, die der Rust Compiler für die verschiedenen Builds ausgegeben hat.

Die Graphen starten bei unterschiedlichen Versionen, da sie nacheinander eingerichtet wurden.

7.2 Asynchrone Kommunikation

Wie bereits in Unterabschnitt 6.3.1 festgestellt, ist für eine hochperformante Kommunikationsplattform eine interne Parallelisierung fördernd. Die Kommunikation von den zueinander asynchron arbeitenden Klassen kann mit Hilfe von verschiedenen Entwurfsmustern umgesetzt werden.

Das „Message Queuing Pattern“ (dt. Nachrichten-Warteschlange-Muster) gilt als stabiles und einfach umzusetzendes Entwurfsmuster, um zwischen asynchron arbeitenden Klassen Nachrichten auszutauschen [Dou03, S. 207]. Der im Jahre 2003 von E. Douglas Jensen genannte Nachteil, Werte nur „by-value“ austauschen zu können [Dou03, S. 211], ist seit der Verfügbarkeit des `std::shared_ptr` ab C++11 nicht mehr relevant. Auch in Rust ist diese Einschränkung durch das Eigentümerprinzip und der Hilfsklassen `Arc` nicht gegeben. Das „Message Queuing Pattern“ soll daher für die interne Kommunikation zwischen *Algorithm* und *Client* bzw. zwischen *Algorithm* und *Sensor* und *Vehicle* verwendet werden

Nachrichtenkanäle

Mittels „channels“ (dt. „Kanäle“) können in Rust Mitteilungen zwischen vielen Auftraggebern und einem Empfänger ausgetauscht werden (andere Rust-Bibliotheken erlauben auch viele Empfänger, zum Beispiel „crossbeam-channel“¹). Der zu versendende Datentyp muss lediglich das Merkmal `Send` aufweisen (siehe Abschnitt 2.9):

```

1 use std::thread;
2 use std::sync::mpsc;
3
4 fn main() {
5     let (sender, receiver) = mpsc::channel();
6
7     let thread = thread::spawn(move || {
8         println!("Empfangen: {}", receiver.recv().unwrap());
9     });
10
11     sender.send("Hallo, Kanal!").unwrap();
12     thread.join().unwrap();
13 }
```

Listing 7.1: Beispiel für die Nutzung von Kanälen

Listing 7.1 zeigt ein einfaches Beispiel, wie ein asynchroner und sicherer Nachrichtenaustausch in Rust umgesetzt werden kann. Zur Laufzeit gibt das Beispielprogramm `Empfangen: Hallo, Kanal!` auf der Konsole aus.

¹<https://crates.io/crates/crossbeam-channel>

In Zeile 5 wird ein neuer Kanal erzeugt und ein Sende- und ein Empfängerteil zurückgegeben. Zwischen Zeile 7 und 9 wird ein neuer Thread erzeugt und der auszuführenden Closure (siehe Abschnitt 2.10) die Eigentümerschaft über den Empfänger übertragen (Schlüsselwort `move`). Der neue Thread wartet nach Start auf den Empfang einer neuen Nachricht und gibt diese anschließend auf der Konsole aus. In Zeile 11 sendet der Haupt-Thread über den Kanal dem anderen Thread einen Text² zu und wartet in Zeile 12, bis dieser beendet wurde.

Um nicht für jeden Datentyp einen neuen Kanal erstellen zu müssen, kann das „Command Pattern“ (dt. Kommando Verhaltensmuster) [Gol14, S. 153] verwendet werden, um über einen Kanal mehrere Aktionen zu befehligen. In Rust kann dies mit einem `enum` umgesetzt werden:

```

1 use std::thread;
2 use std::sync::mpsc;
3
4 enum Command {
5     Say(String),
6 }
7
8 impl Command {
9     fn execute(self) {
10         match self {
11             Command::Say(text) => println!("Say: {}", text),
12         }
13     }
14 }
15
16 fn main() {
17     let (sender, receiver) = mpsc::channel();
18
19     let thread = thread::spawn(move || {
20         let command: Command = receiver.recv().unwrap();
21         command.execute();
22     });
23
24     sender.send(Command::Say("Hallo, Kanal!".into())).unwrap();
25     thread.join().unwrap();
26 }

```

Listing 7.2: Beispiel für die Nutzung von Kanälen und des Kommando-Verhaltensmusters

²Um genau zu sein, ist der Wert vom Datentyp `&'static str`

In Listing 7.2 ist die Aktion, Etwas auf der Konsole auszugeben, als Variante `Say` in dem Kommando definiert. Für eine Instanz dieser Variante wird zudem ein `String` verlangt, der daraufhin innerhalb von `execute` in Zeile 11 ausgegeben wird.

Nach diesem Beispiel ist die Kommunikation zwischen dem *Algorithm*, dem *Client*, dem *Vehicle* und dem *Sensor* in der tatsächlichen Implementation realisiert (siehe Abbildung 6.1). In dem folgenden Listing 7.3 sind die Befehle zu sehen, die in der tatsächlichen Implementation an den Algorithmus versendet werden können.

```

1 enum Command<U: Send+Debug, I: Send+Debug+Sized+'static> {
2     Update(Box<U>),
3     Publish(RawMessage),
4     SubscribeEnvironmentModel(I, EnvironmentListener),
5     UnsubscribeEnvironmentModel(I),
6     SubscribeListenerCount(I, CountListener),
7     UnsubscribeListenerCount(I),
8     ActivateEnvironmentModelSubscription(I),
9     DeactivateEnvironmentModelSubscription(I),
10 }
```

Listing 7.3: Kommandos, die einem *Algorithm* zugesandt werden können

Ob eine Kommunikation zwischen zwei Klassen asynchron oder synchron stattfindet, sollte für die Implementation jedoch möglichst keine Rolle spielen. Zur Kommunikation mit anderen Klassen sollte es nur nötig sein, die entsprechende Schnittstelle zu kennen (Stichwort „loose coupling“ [Gol18, S. 49]). Die verwendete Kommunikationstechnologie (*Tokio*) und das Verhaltensmuster (Kommando) beziehen sich nicht mehr auf das Aufgabengebiet der Klassen. Durch eine Fassade kann das Erstellen eines Kommandos und das Übermitteln durch einen Kanal gekapselt und auf einen einfachen Methodenaufruf reduziert werden. Durch eine Implementation der Schnittstelle für den Sendeteil kann aber auch das „Proxy Pattern“ (dt. Stellvertreter-Strukturmuster) [Gol18, S. 137] umgesetzt werden, wodurch keine Änderung in der aufrufenden Klasse bemerkbar ist.

Da ein Beispiel aus der tatsächlichen Implementation zu groß für eine übersichtliche Erläuterung ist, wird das Beispiel aus Listing 7.1 und Listing 7.2 erneut aufgegriffen, um beispielhaft das Prinzip zu erklären.

Die neue Schnittstelle `EndPoint` definiert die Funktion `say`, um einen Text auf der Konsole auszugeben. Anschließend wird sie für den Sendeteil des Kanals implementiert, wodurch dieser quakt³ wie die `EndPoint`-Schnittstelle. Für Zeile 35 ist daher nicht erkenntlich, dass es sich um einen Kanal handelt.

³„Duck Typing“ [BO17, S. 44] in Rust teilweise möglich, dann aber ohne Laufzeitkosten. Auch genannt Ententest: „When I see a bird that walks like a duck and swims like a duck and quacks like a duck, I call that bird a duck.“ von James Whitcomb Riley [Wik17a]

Auf der Konsole wird `Say: Hallo, Proxy!` ausgegeben.

```
1 use std::thread;
2 use std::sync::mpsc;
3
4 enum Command {
5     Say(String),
6 }
7
8 impl Command {
9     fn execute(self) {
10         match self {
11             Command::Say(text) => println!("Say: {}", text),
12         }
13     }
14 }
15
16 trait EndPoint {
17     fn say(&self, text: &str);
18 }
19
20 impl EndPoint for mpsc::Sender<Command> {
21     fn say(&self, text: &str) {
22         self.send(Command::Say(text.into())).unwrap();
23     }
24 }
25
26 fn main() {
27     let (sender, receiver) = mpsc::channel();
28     let endpoint = &sender as &EndPoint;
29
30     let thread = thread::spawn(move || {
31         let command: Command = receiver.recv().unwrap();
32         command.execute();
33     });
34
35     endpoint.say("Hallo, Proxy!");
36     thread.join().unwrap();
37 }
```

Listing 7.4: Command und Proxy Pattern

In der tatsächlichen Implementierung wird innerhalb der `execute` Methode von `Command` eine entsprechende Methode in *Client* oder *Algorithm* aufgerufen.

Als weitere Leistungsoptimierung sind die Kommunikationspartner, wie der *Algorithm* für den *Client*, mittels generische Typen eingebettet (siehe Abschnitt 2.9). Dem Compiler ist hierdurch bekannt, welche Datentypen sich tatsächlich hinter den generischen Typen (*D* und *A* in Listing 7.5) verbergen und kann den Maschinencode trotz Abstraktion ungehindert optimieren⁴.

```
1 pub struct Client<
2     S: Debug + Send + Sized + 'static,
3     A: Algorithm<S, SocketAddr> + Sized + 'static,
4     D: Adapter + Send + 'static,
5 > {
6     adapter: D,
7     algorithm: A,
8     // ...
9 }
```

Listing 7.5: Ausschnitt aus der Datenstruktur *Client* zeigt generische Typen für *Algorithm* und *Adapter*

Ein „Trait-Object“ (siehe Listing 7.5), wie etwa `Box<Adapter>`, würde dagegen einen „vtable“ Zugriff zur Laufzeit erzwingen und eine Optimierung für den konkreten Datentyp unterbinden, da dieser meist nicht zur Compilezeit bekannt oder eindeutig ist.

⁴„Despite their flexibility, generic functions [and structs] are just as efficient as their nongeneric counterparts.“[BO17, S. 45]

7.3 ASN.1 via Bindgen einbinden

Wie bereits in Abschnitt 6.1 geschildert, existiert für Rust zum jetzigen Zeitpunkt kein ASN.1 Compiler, der die Nachrichtendefinition in nativen Rust-Code übersetzt. Aus diesem Grund müssen die selben C-Datenstrukturen und C-Funktionen genutzt werden, die auch die C++ Referenzimplementation nutzt. Mittels Foreign Function Interface (siehe Abschnitt 2.22) wird auf diese zugegriffen. Damit nicht für jeden Nachrichtentyp, eingebetteten Nachrichtenuntertyp und jede Funktion manuell eine Rust Deklaration geschrieben werden muss, wird Bindgen⁵ genutzt, um diese automatisch zu generieren.

Um wichtige Nachrichtentypen ohne `unsafe`-Blöcke instanziierten zu können, ist der unsichere Code in `Default` gekapselt worden. Für eine korrekte Deallokation des Nachrichtenrumpfes wurde bei diesen Nachrichtentypen zudem `Drop` implementiert. Als Beispiel dient die *ClientRegistration*-Nachricht in Listing 7.6:

```

1  #[macro_use]
2  extern crate log;
3  extern crate libc;
4
5  mod bindings;
6  pub use bindings::*;
7
8  use ::std::os::raw::c_int;
9
10 impl Default for ClientRegistration {
11     fn default() -> Self {
12         unsafe { ::std::mem::zeroed() }
13     }
14 }
15
16 impl Drop for ClientRegistration {
17     fn drop(&mut self) {
18         unsafe {
19             free_content(
20                 &mut asn_DEF_ClientRegistration,
21                 self,
22             );
23         }
24     }
25 }
26
27 pub unsafe fn free_content<T>(

```

⁵<https://crates.io/crates/bindgen>

```

28     asn_type: &mut asn_TYPE_descriptor_t,
29     value: &T,
30 ) {
31     free_struct(asn_type, value, true)
32 }
33
34 pub unsafe fn free_struct<T>(
35     asn_type: &mut asn_TYPE_descriptor_t,
36     value: &T,
37     only_content: bool,
38 ) {
39     trace!("asn_free type {:?}", asn_type);
40     asn_type
41         .free_struct
42         .expect("free_struct is NULL, library not loaded")(
43         asn_type as *mut asn_TYPE_descriptor_t,
44         value as *const T as *mut ::std::os::raw::c_void,
45         if only_content { 1 } else { 0 } as c_int,
46     );
47     trace!("freed");
48 }

```

Listing 7.6: Auszug aus *lib.rs* der *libmessages-sys* Crate

Die *ClientRegistration*-Nachricht aus Listing 7.6 wird selbst im Speicherbereich von Rust allokiert, während der Inhalt der Nachricht auf dem C-Heap erwartet wird. Dieser Mix ist nicht zu vermeiden, da die ASN.1 Funktionen zum Dekodieren der UPER-Nachrichten die inneren Datenstrukturen auf dem C-Heap anlegen. Dieser Mix ist nicht zu vermeiden, da die ASN.1 Funktionen zum Dekodieren der UPER-Nachrichten die inneren Datenstrukturen auf dem C-Heap anlegen, während eine Deallokation einer Heap-Variable in Rust (`Box`) nicht ohne erheblichen Aufwand⁶ beeinflusst werden kann.

Die Deklarationen, zusammen mit einer statischen Linkung mit der C-Bibliothek, ist in der *libmessages-sys* umgesetzt und entspricht damit der Rust-Konvention beim Einbinden externer Bibliotheken[Rusf]. Durch die Kapselung möglichst aller `unsafe` Operationen in *libmessages-sys* wird eine sichere Nutzung außerhalb dieser Crate ermöglicht. Das Prinzip, unsicheren Code in sichere Funktionen oder Abstraktionen zu kapseln, entspricht auch der Rust-Konvention zur Einbindung externer Bibliotheken⁷[Rusp].

⁶Die Deallokation müsste **manuell** und durch Nutzung von unsicherem Code erfolgen, ohne eine Hilfe durch den Compiler, ob dies immer an jeder Stelle umgesetzt wurde.

⁷„Creating a Safe Abstraction Over Unsafe Code“

Schwierigkeiten

Bei ersten Tests wurde schnell festgestellt, dass der Speicher, der durch C-Funktionen allokiert wurde, von C-Funktionen wieder freigegeben werden muss⁸. Falls innerhalb der C-Nachrichtentypen Rust-Heap referenziert, oder die C-Nachrichtentypen von Rust Funktionen freigegeben werden, wird der jeweilige Heap korumpiert. Ein späterer Versuch Speicher zu allokiieren endet in einem Deadlock-ähnlichen Zustand, bei dem der Allokator stehen bleibt.

⁸Kommentar: Das klingt im Nachhinein leider offensichtlicher als es ist.

7.4 C++ Algorithmus laden

Um die optionale Anforderung 2310 („Einbinden eines C++ Algorithmus“, siehe Abschnitt 4.1.2) umsetzen zu können, muss zuerst die Kommunikation innerhalb des C++ Servers mit dessen Algorithmus analysiert werden:

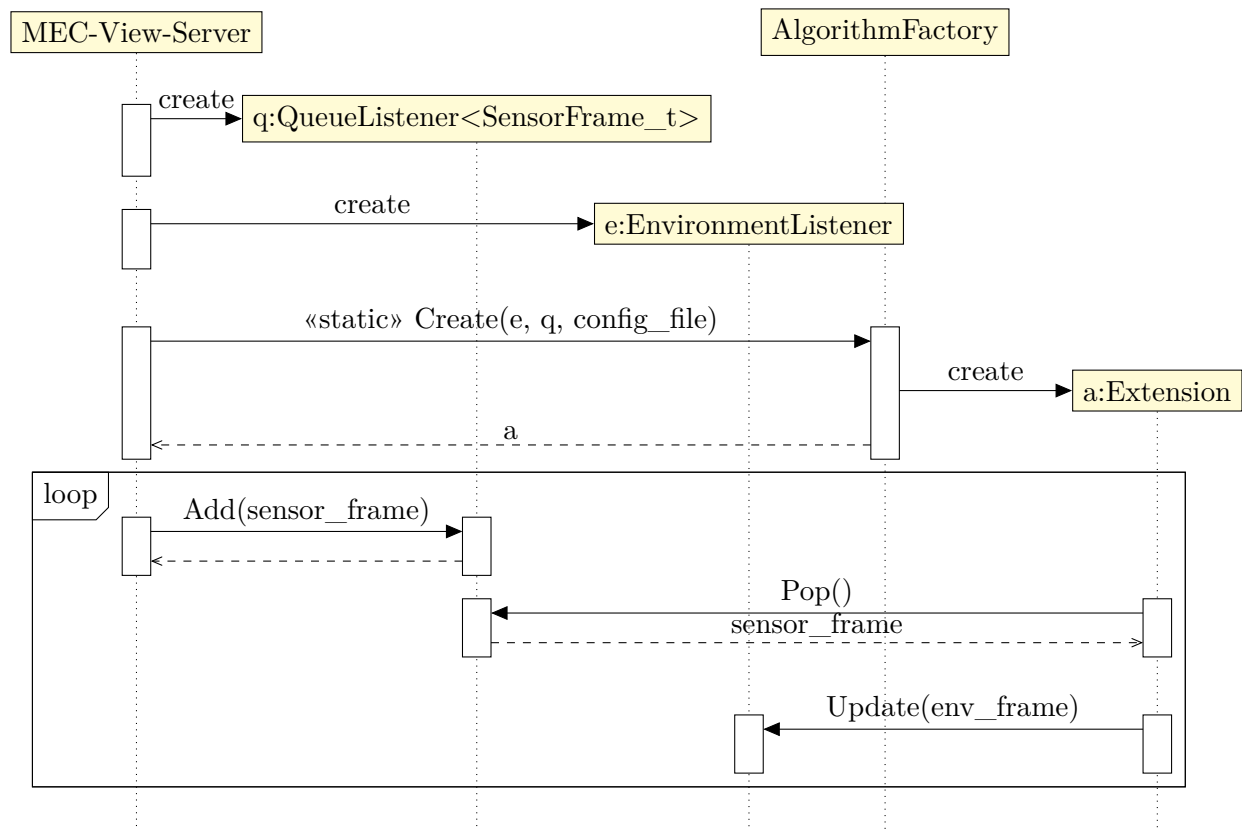


Abbildung 7.3: Instanziierung eines neuen Algorithmus in der C++ Implementation

In Abbildung 7.3 ist sowohl die Instanziierung des Algorithmus (Klasse *Extension*) als auch Übermittlung von *SensorFrame*- und *EnvironmentFrame*-Nachrichten (siehe Unterabschnitt 5.4.2 und Unterabschnitt 5.4.3) zu sehen. Die Kommunikation zwischen dem Algorithmus und der Außenwelt findet über den *QueueListener* und den *EnvironmentListener* statt. Neue *SensorFrame*-Nachrichten werden in den *QueueListener* eingefügt und zu einem späteren Zeitpunkt asynchron vom Algorithmus ausgelesen. Eine neue *EnvironmentFrame*-Nachricht übergibt der Algorithmus an den *EnvironmentListener*. Über diesen wird in der C++ Implementation anschließend die Nachricht an alle Fahrzeuge verteilt.

Die C++ Implementation reduziert durch dieses Vorgehen die direkte Kommunikation zwischen dem Server und dem konkreten Algorithmus auf den Aufruf von *Create*. Durch den Austausch dieser Methode kann ein anderer Algorithmus geladen werden.

Damit die Rust-Implementation den C++ Algorithmus instanziiieren kann, muss die Methode *Create* der Klasse *AlgorithmFactory* ordnungsgemäß aufgerufen werden. Ein gültiger *QueueListener* und *EnvironmentListener* muss zuvor erstellt werden. Der Fokus liegt somit auf den folgenden Klassen:

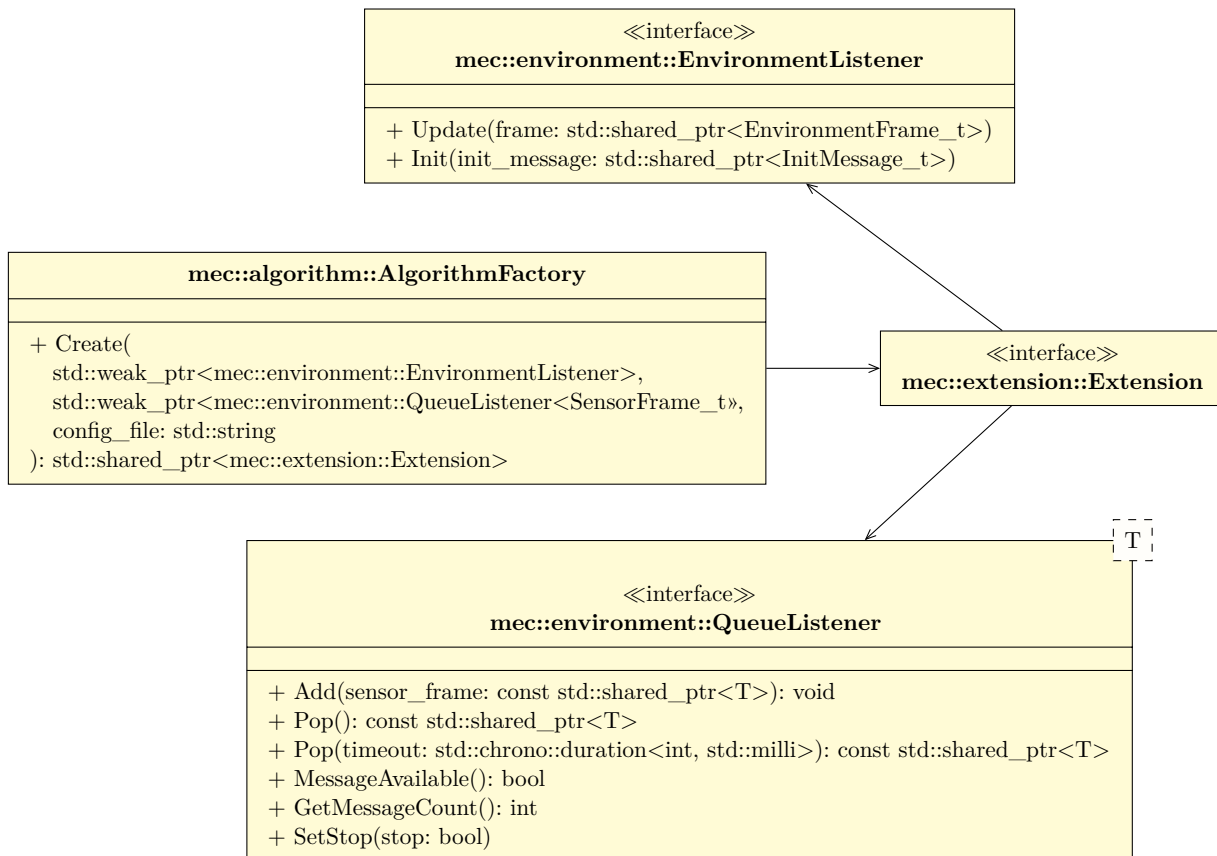


Abbildung 7.4: Abhängigkeiten zum Instanziiieren des C++ Algorithmus

Der C++ Algorithmus soll durch einen Adapter dem Merkmal des Rust *Algorithm* entsprechen, um eine Änderung im bestehenden Rust Code möglichst gering zu halten. Eine Änderung im C++ Quellcode des Algorithmus ist untersagt.

Im ersten Schritt wird der Methodenaufruf von *AlgorithmFactory::Create* in Rust zugänglich gemacht. Anschließend wird der nötige Adaptercode implementiert. Wegen der wachsenden Komplexität wird auch die Architektur erweitert und, aufgrund der nun höheren Anzahl an Klassen, in weitere Crates aufgeteilt. In Abbildung 6.1 ist die erweiterte Version zu sehen.

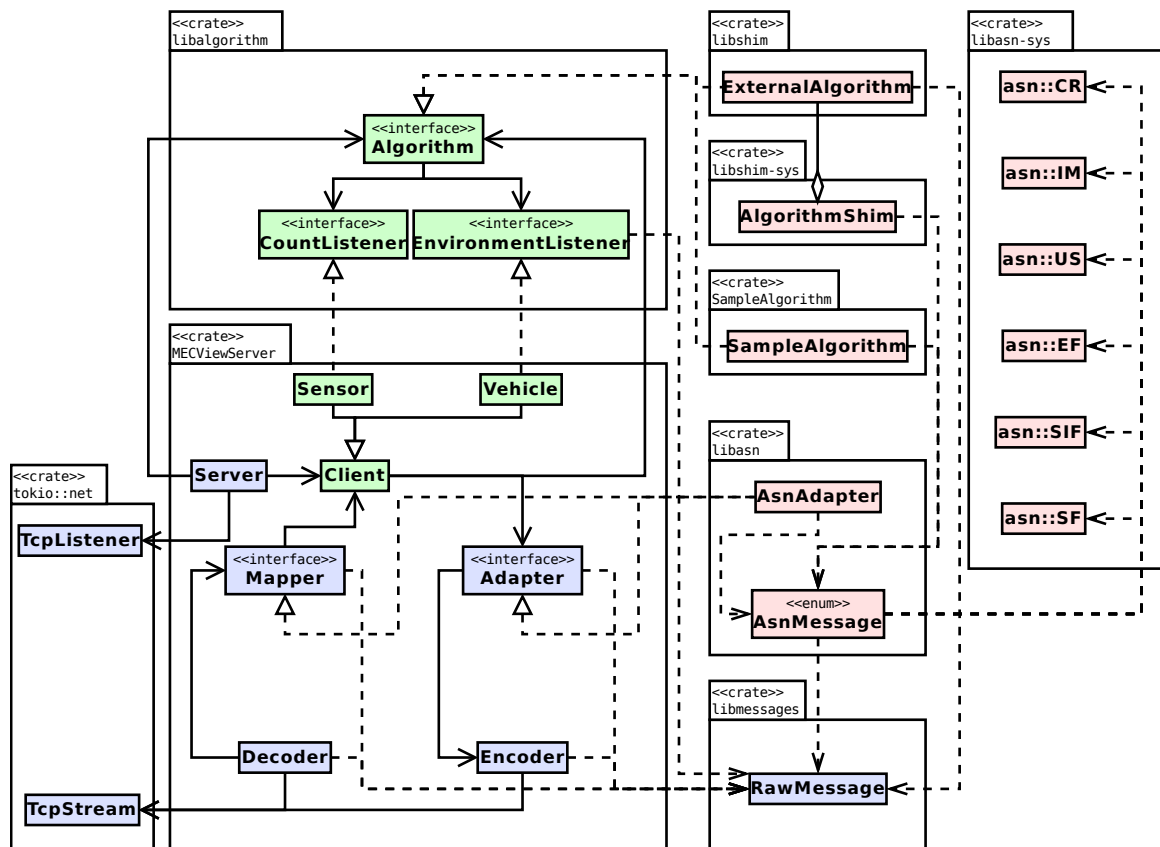


Abbildung 7.5: Architekturentwurf

Die *Algorithm*-, *CountListener*- und *EnvironmentListener*-Schnittstellen werden in eigene Crates verschoben. Die *asn::Message* wird in *AsnMessage* umbenannt und zusammen mit der *AsnAdapter*-Klasse in die neue Crate *libasn* verschoben. Auch der *SampleAlgorithm* wird in eine eigene Crate verschoben. Zwei weiteren Crates binden den externen C++ Algorithmus ein: *libshim-sys* um den C++ Code in Rust zugänglich zu machen (analog zu *libasn-sys*) und *libshim* für die Implementation der *Algorithm*-Schnittstelle mittels Adaptercodes.

Die neuen Abhängigkeiten zwischen den Crates sind in Abbildung 7.6 abgebildet.

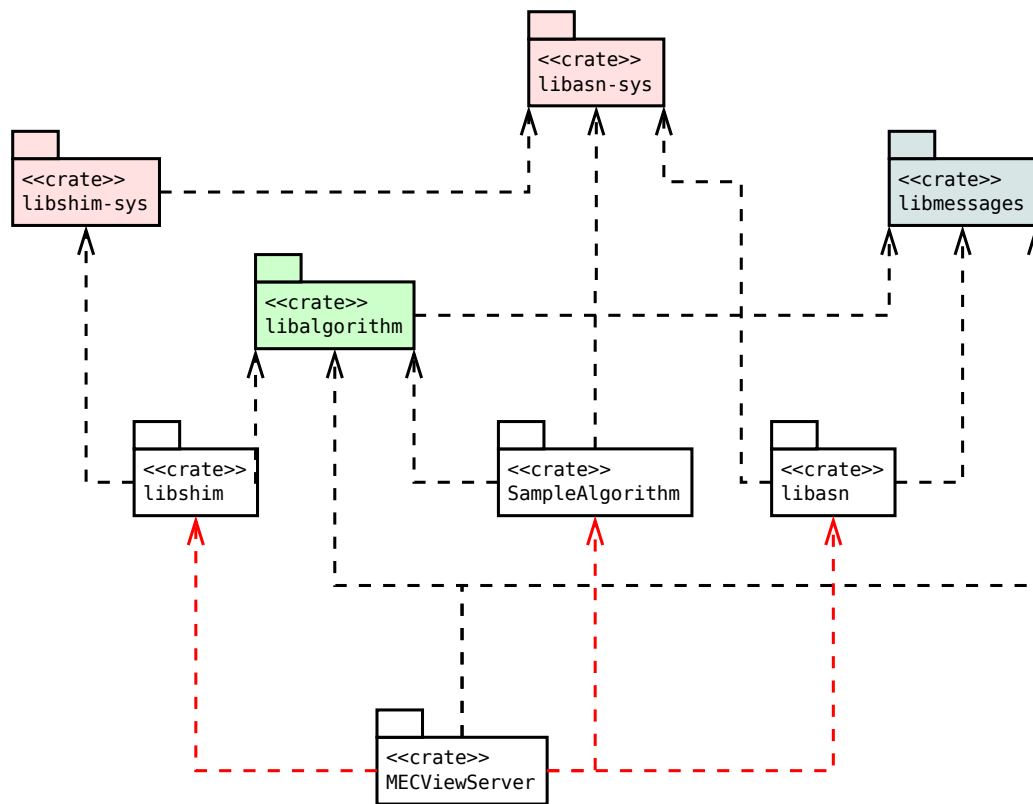
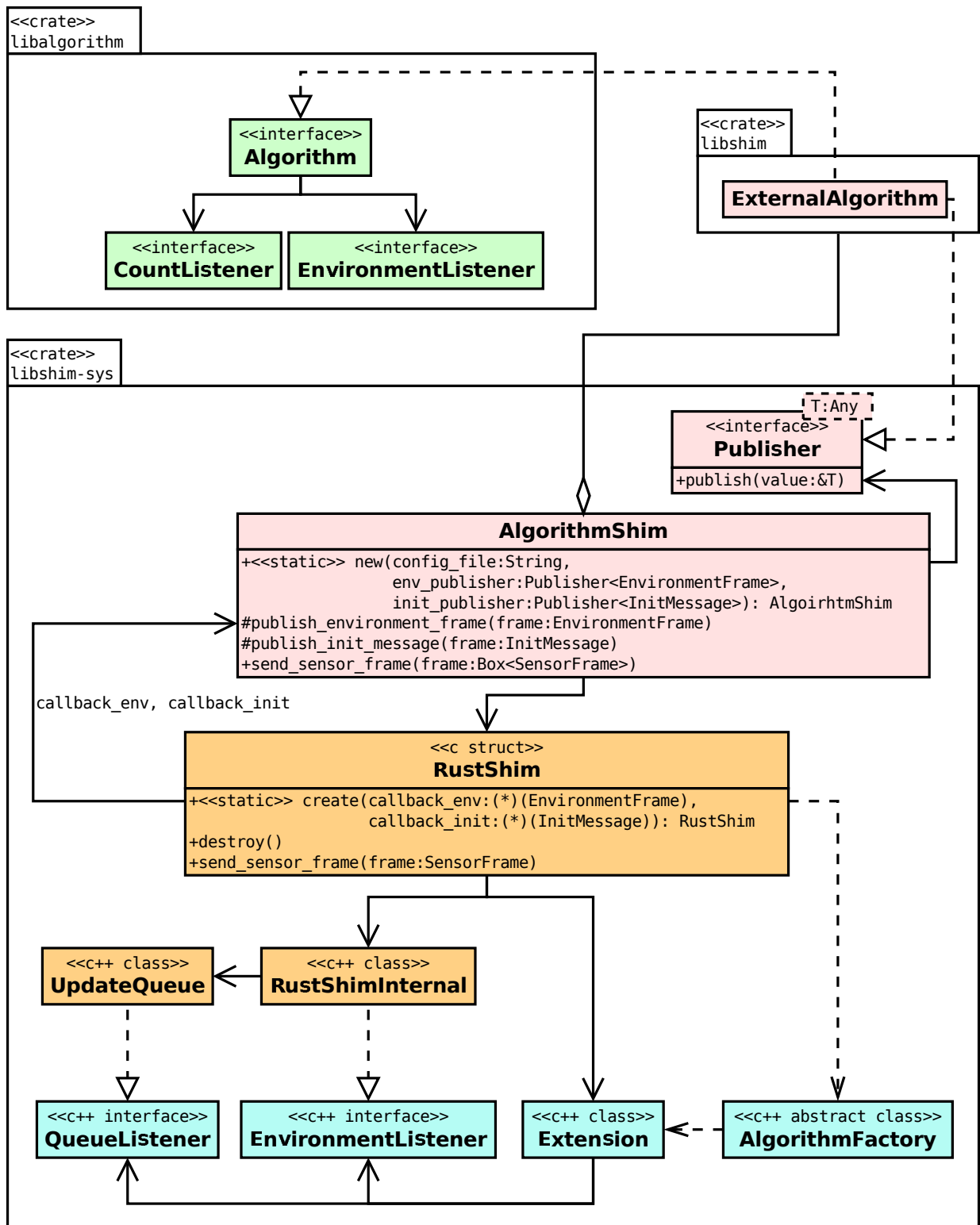


Abbildung 7.6: Architekturentwurf

Die roten Abhängigkeiten entstehen erst durch die Wahl einer Nachrichtentechnologie und des auszuführenden Algorithmus, und können durch die Instanziierung einer anderen Implementation in der *main*-Funktion der *MECViewServer*-Crate ausgetauscht werden.

Die Einbindung des C++ Quellcodes ist im Gegensatz zum C-Code der ASN.1 Nachrichten (siehe Abschnitt 7.3) deutlich schwieriger. Die Abhängigkeiten zu den Datentypen der Standardbibliothek (siehe Abbildung 7.4) und die Klassenhierarchie macht einen Zugriff aus Rust deutlich komplizierter und würde eine manuelle Pflege der *vtable* benötigen. Deswegen ist eine andere Herangehensweise ausgewählt worden. Weiterer C-Code soll den C++ Code über eine C-Datenstruktur kapseln und über C-Funktionen zugänglich machen (Stichwort Fassade, [Gol18, S. 700]). Ein Zugriff aus Rust heraus soll somit stark vereinfacht werden.

In Abbildung 7.7 ist hierzu eine Detailansicht der Crate *libshim-sys* dargestellt, inklusive C-Datenstrukturen und C++ Klassen.

Abbildung 7.7: Detailansicht der Crate *libshim-sys*

Die orange eingefärbten Klassen und Datenstrukturen aus Abbildung 7.7 stellen den nötigen Adaptercode dar. Die in türkis eingefärbten Klassen und Schnittstellen sind die aus der C++ Implementation stammende Klassen und Schnittstellen, die nicht verändert werden dürfen.

Für das Laufzeitverhalten sind die zusätzlichen Funktionsaufrufe durch den Adaptercode (*AlgorithmShim* zu *RustShim*, *RustShim* zu *RustShimInternal* und *RustShimInternal* zu *UpdateQueue*, gut zu sehen an der enormen Breite von Abbildung 7.9) als ungünstig eingestuft. Die Komposition von *AlgorithmShim* in *ExternalAlgorithm* soll dem Compiler ermöglichen, den Funktionsaufruf von *send_sensor_frame(frame: Box<SensorFrame>)* zu inlinen und so das Laufzeitverhalten zu verbessern.

In der Abbildung 7.8 wird aufgezeigt, wie der C++ Algorithmus instanziiert wird. Abbildung 7.9 zeigt wie eine *SensorFrame*-Nachricht weitergeleitet und mit einer *RawMessage* beantwortet wird. Zur Vereinfachung sind hierzu einige Schritte, wie die Registrierung des Fahrzeugs, zwischen den Abbildungen ausgelassen. Die Sequenzdiagramme sind mit den Hintergrundfarben aus den bisherigen Diagrammen eingefärbt, um eine Zuordnung der aufgezeigten Klassen zu vereinfachen.

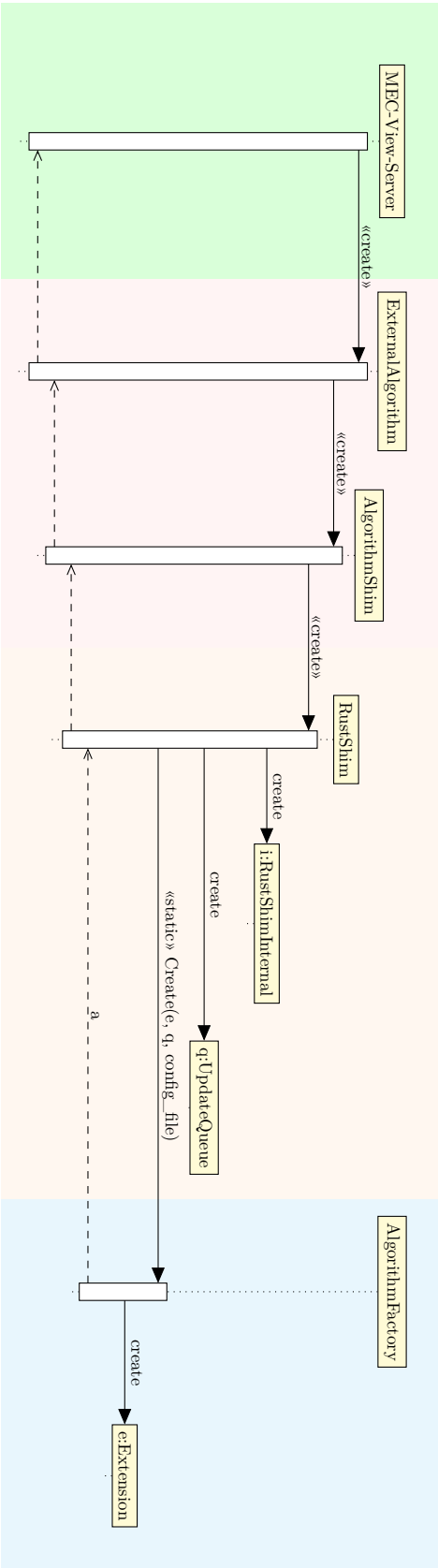


Abbildung 7.8: Instanziierung eines neuen C++ Algorithmus aus der Rust Implementation

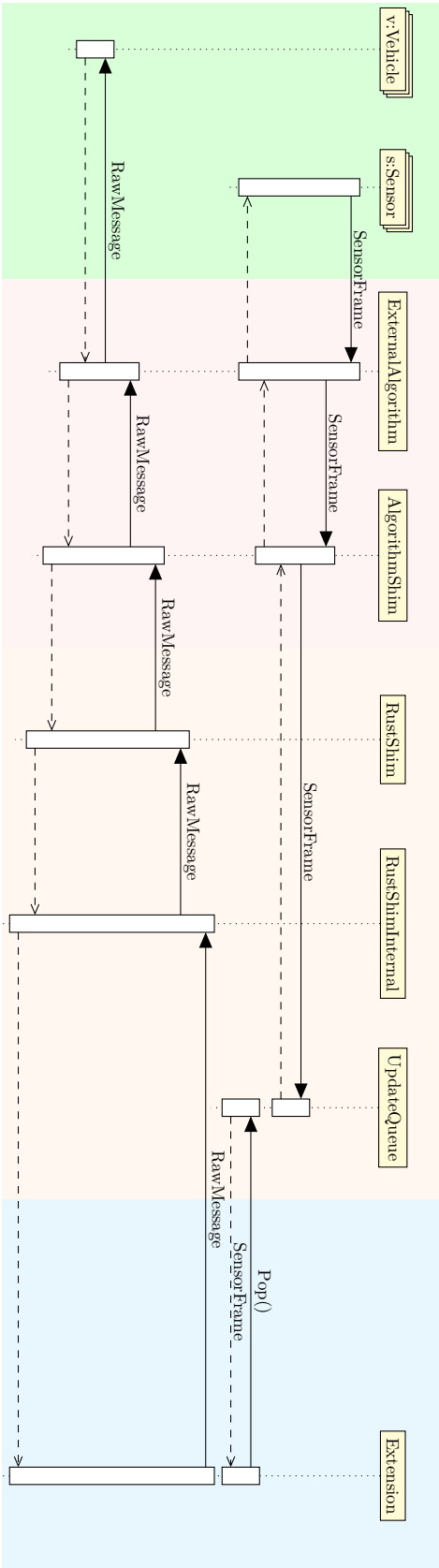


Abbildung 7.9: Kommunikation mit dem C++ Algorithmus

7.5 Startparameter

Alle in Kapitel 4 genannten optionalen Anforderungen für Startparameter sind erfolgreich umgesetzt worden. Die Ausgabe in Listing 7.7 zeigt alle möglichen Startparameter des Systems an.

```

1  mecview_server 0.3.0
2  Michael Watzko <michael@watzko.de>
3  MECViewServer implementation in Rust
4
5  USAGE:
6      mecview_server [OPTIONS]
7
8  FLAGS:
9      -h, --help            Prints help information
10     -V, --version         Prints version information
11
12  OPTIONS:
13     -a, --algorithm <PATH>    The path to the algorithm
14                               configuration file [default:
15                               /etc/mecview/algorithm.json]
16     -u, --use <ALGORITHM>    The algorithm to use
17                               [default: sample]
18                               [possible values: sample, external]
19     -e, --environment-frame <PATH> The path to the EnvironmentFrame
20                               to send to the Vehicles
21     -v, --init-message <PATH> The path to the InitMessage to
22                               send to a Vehicle
23     -i, --interface <INTERFACE> Sets the interface to listen on
24                               [default: 0.0.0.0]
25     -l, --log <LEVEL>        Sets the log level of the server
26                               [possible values: trace, debug,
27                               info, warn, err]
28     -p, --port <NUMBER>     Sets the TCP listen port
29                               [default: 2000]

```

Listing 7.7: Hilfsinformationen der Rust-Implementierung mit allen möglichen Parametern

In der folgenden Übersicht sind die Startparameter aus den Anforderungen, eine kurze Erklärung und ein Beispiel gelistet.

- **Anforderung 2400: Startparameter für Logausgabe**

Mit dem Startparameter `-l <LEVEL>` (Kurzform) oder `--log <LEVEL>` (Langform) kann einer der folgenden Level gesetzt werden: `trace`, `debug`, `info`, `warn`, `err`.

Beispiel: `mecview_server --log trace`

- **Anforderung 2410: Startparameter für die Netzwerkschnittstelle**

Mit dem Startparameter `-i <INTERFACE>` (Kurzform) oder `--interface <INTERFACE>` (Langform) kann eine lokale Netzwerkadresse des Systems übergeben werden, auf

der für eingehende TCP-Verbindungen gelauscht werden soll.

Beispiel: `mecview_server -i 127.0.0.1`

- **Anforderung 2420: Startparameter für den TCP-Port**

Der Startparameter `-p <NUMBER>` (Kurzform) und `--port <NUMBER>` setzt den TCP-Port, den der Server verwendet, um auf neue Verbindungen zu lauschen.

Beispiel: `mecview_server --port 4711`

- **Anforderung 2430: Initialisierungsnachricht aus XML-Datei**

Mit dem Startparameter `-v <PATH>` (Kurzform) oder `--init-message <PATH>` (Langform) kann der Pfad zu einer in XML-Datei übergeben werden, aus der die zu verschickende *InitMessage*-Nachricht geladen wird.

Beispiel: `mecview_server --init-message scenario_5086.xml`

- **Anforderung 2440: Nur wenn der Dummy-Algorithmus geladen ist: Umgebungsmodell aus XML-Datei**

Mit dem Startparameter `-e <PATH>` (Kurzform) oder `--environment-frame <PATH>` (Langform) kann der Pfad zu einer in XML-Datei übergeben werden, aus der die zu verschickende *EnvironmentFrame*-Nachricht geladen wird.

Beispiel: `mecview_server -e Kreuzung_2.xml`

- **Anforderung 2450: Nur wenn der C++ Algorithmus geladen ist: Pfad an Algorithmus übergeben**

Der Startparameter `-a <PATH>` (Kurzform) und `--algorithm <PATH>` setzt den Pfad, der dem externen C++ Algorithmus bei der Initialisierung übergeben wird. Wenn der „Dummy“-Algorithmus verwendet wird, wird dieser Parameter ignoriert.

Beispiel: `mecview_server -a latency_measurement.json`

7.6 Resistenz gegenüber böswilligen oder defekten Clients

Die Anforderungen 3200 „Widerstand gegen Nachrichtenüberflutung“ und 3210 „Widerstand gegen Nachrichtenrückstau“ (siehe Abschnitt 4.2) beschreiben ein Szenario, bei dem sich im MEC-View-Server Nachrichten anstauen. Bei einem zu großen Rückstau könnte der Arbeitsspeicher ausgehen und weitere Versuche, Speicher zu allokatieren, würden fehlschlagen. Das bedeutet, die Erreichbarkeit des MEC-View-Servers kann durch einen böswilligen oder defekten Client beeinflusst werden. Um zu verhindern, dass sich zu viele Nachrichten anstauen, sind die Kanäle (siehe Abschnitt 7.2) zwischen Client und Algorithmus in ihrer Größe limitiert. Bei einem Versuch, diese Limitierung zu überschreiten, wird die Verbindung von dem betroffenen Client getrennt. Durch diese Maßnahme kann die Erreichbarkeit des MEC-View-Servers gewahrt werden.

8 Auswertung

In diesem Kapitel wird die Implementation des MEC-View-Servers in Rust mit der Referenzimplementation in C++ verglichen. Hierzu wird die Testumgebung aus dem C++ Projekt auch auf die Rust Implementation angewandt: Fahrzeuge und Sensoren werden simuliert und die Laufzeit für die Übermittlung von Nachrichten wird gemessen.

Im ersten Testszenario führt die Implementation in Rust einen in Rust geschriebenen „Dummy“-Algorithmus aus (siehe Anforderung 2300 in Abschnitt 4.1.2). Im zweiten Schritt wird stattdessen der „Dummy“-Algorithmus geladen, den auch die C++ Implementation benutzt.

8.1 Testumgebung

Die Testumgebung wird auf einem Ubuntu 16.04.4 LTS Server mit zwei Intel Xeon CPUs (E5-2620 v4 @ 2.10GHz) ausgeführt. Der CPU Governor wurde für alle Tests auf „performance“ gestellt, um Schwankungen in der CPU Taktung durch Energiesparmaßnahmen – und damit Verfälschungen der Testergebnisse – zu unterbinden. Eine derart überdimensionierte Hardware soll Unterschiede im Laufzeitverhalten besser aufzeigen, ohne der limitierende Faktor zu sein.

Für jede Kombination aus Sensoren, Fahrzeugen und Serverimplementierung werden 10 Tests durchgeführt. Bei jedem Test wird am Fahrzeug für jede empfangene Nachricht die Zeitdifferenz, seit dem Versand am Sensor, in eine Datei geschrieben. Nach einem Testdurchlauf wird die Anzahl an Nachrichten gezählt und der Durchschnitt für die Zeitdifferenzen gebildet.

Zu jedem Zeitpunkt wird maximal ein Test gleichzeitig auf dem System ausgeführt.

Um Latenzen durch das Netzwerk auszuschließen, werden auch die virtuellen Sensoren und Fahrzeuge auf dem gleichen Server wie die Serverimplementation ausgeführt und durch die Loopback-Netzwerkschnittstelle verbunden. Ein kurzer Test ergab hierbei einen Durchsatz von ca 40Gbit/s (mittels *iperf*) und eine Latenz von ca 24µs (mittels *ping*) auf der Loopback-Netzwerkschnittstelle. Auswirkungen auf die Testergebnisse sind damit vernachlässigbar klein.

Alle Implementationen sind im Release-Modus kompiliert und in der C++ Implementation ist das „RoadClearanceModule“ abgeschaltet.

8.2 Vorgehen

Das Vorgehen ist für alle Tests gleich und bis auf den Start des Servers durch ein Bash-Skript automatisiert. Lediglich die Anzahl an Fahrzeugen und Sensoren, die als Parameter an das Skript übergeben werden, variieren je Testdurchlauf (10 Tests). Das Vorgehen eines Tests sieht folgendermaßen aus:

- Server mit Log-Level „info“ starten, um den Server nicht durch unnötige Log-Ausgaben zu bremsen.
- Skript starten.
- Skript startet die Sensoren als Hintergrundprozesse.
- Skript pausiert für 2 Sekunden, um genügend Zeit für den Verbindungsaufbau der Sensoren einzuräumen.
- Skript startet die Fahrzeuge, die 5 Sekunden nach dem Verbindungsaufbau das Umfeldmodell für 60 Sekunden abonnieren.
- Skript wartet auf Prozessende der Fahrzeuge.
- Skript beendet alle Sensoren.
- Skript pausiert für 2 Sekunden, um dem Server genügend Zeit für den Verbindungsabbau der Sensoren und Fahrzeuge einzuräumen.
- Skript wiederholt alle Schritte ab Schritt 2, bis 10 Durchläufe ausgeführt wurden.

Für jedes Umfeldmodell, das von einem Fahrzeug empfangen wird, wird auf der Konsole die Latenz in ganzen Millisekunden ausgegeben. Diese Latenz wird anhand der Differenz zwischen dem Zeitstempel in der empfangenen Nachricht und der aktuellen Zeit errechnet. Alle ausgegebenen Latenzen werden mittels *Bash*-Pipe (und einem *grep* und *cut*) in eine Datei gespeichert. Der Client wird hierbei nicht durch den Dateizugriff gebremst, da dies asynchron im letzten Prozess der *Bash*-Pipe geschieht. Bei der Auswertung wird der Durchschnitt errechnet (mittels *awk*-Skript).

Für jeden Test werden 25 virtuelle Sensoren mit der Server-Instanz verbunden. Jeder dieser Sensoren versendet in Intervallen von 100ms eine *SensorFrame*-Nachricht. Hieraus resultieren 250 Nachrichten pro Sekunde. Die Anforderung 3100 (siehe Abschnitt 4.2) mit 200 Nachrichten pro Sekunde ($6 \cdot 10 + 7 \cdot 20$) ist somit übererfüllt. Für jede empfangene *SensorFrame*-Nachricht generiert der „Dummy“-Algorithmus eine *EnvironmentFrame*-Nachricht und überträgt in diese den Zeitstempel aus der *SensorFrame*-Nachricht. Für jede Implementation werden 10 Tests mit 1 bis inklusive 5 Fahrzeugen durchgeführt.

Zum Testzeitpunkt ist eine *SensorFrame*-Nachricht 517 Bytes groß und eine *EnvironmentFrame*-Nachricht 2153 Bytes groß. Dies stellt für den Server eine besondere Stresssituation dar. Im Produktivbetrieb und mit dem Fusionsalgorithmus der Universität Ulm werden *EnvironmentFrame*-Nachrichten nur alle 100ms an die Fahrzeuge versendet und nicht für

jede empfangene *SensorFrame*-Nachricht. Es wird erwartet, dass eine Serverimplementierung, die mit dieser Stresssituation umgehen kann, auch die Anforderung 3100 im Produktivbetrieb erfüllen kann.

8.3 Ergebnisse

In der Abbildung 8.1 sind auf der linken Seite die Messergebnisse dargestellt, die durch das in Abschnitt 8.2 beschriebene Vorgehen gesammelt wurden. Auf der rechten Seite ist für jede Implementation ein Boxplot für jeweils alle Latenzen aufgezeichnet. Aufgrund der Textlänge von „Rust mit C++ Algorithmus“ ist dies in der Abbildung durch „R++“ gekürzt.

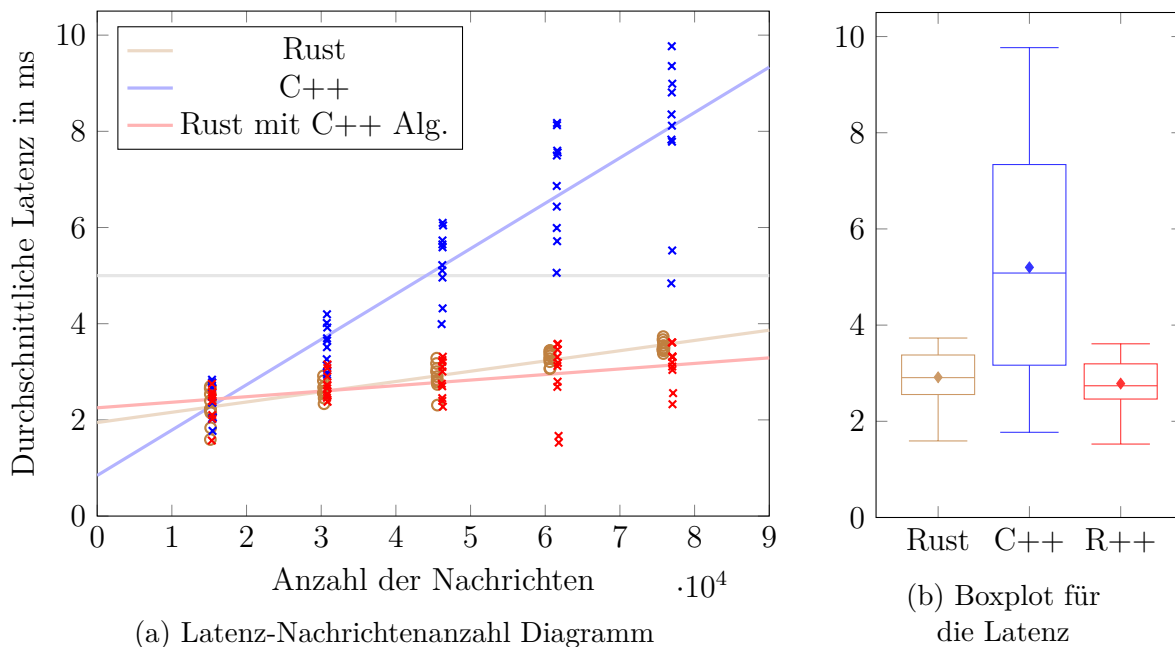


Abbildung 8.1: Laufzeitverhalten der MEC-View-Server Implementationen

Beschreibung

Die Y-Achse gibt die durchschnittliche Latenz in Millisekunden pro Nachricht und die X-Achse die Anzahl an Nachrichten für einen Test wieder. Braune Kreise markieren einzelne Testergebnisse mit der Rust Implementation, blaue Kreuze mit der C++ Implementation und rote Kreuze mit der Rust Implementation und dem C++ Algorithmus. Über alle Testergebnisse einer Implementation ist in der jeweiligen Farbe eine Trendlinie gelegt. Zudem verläuft eine waagrechte Gerade auf Höhe von 5ms. Sie markiert die maximale Latenz bei zwei Fahrzeugen (ca 30.000 Nachrichten) aus Anforderung 3100 (siehe Abschnitt 4.2).

Es sind 5 Gruppierungen je Implementation auf der X-Achse zu erkennen (bei etwa 15.000, 30.000, 45.000, 60.000 und 75.000 Nachrichten). Dies resultiert aus der unterschiedlichen Anzahl an Fahrzeugen und der deshalb multiplikativ wachsenden Gesamtanzahl an übermittelten Nachrichten. Auf der Y-Achse ist dagegen für jede Gruppe eine Streuung zu sehen. Während sich die Streuung bei der Rust Implementation mit zunehmenden Fahrzeugen eher verringert, steigt bei der C++ Implementation die Streuung deutlich. Jede Gruppierung einer Implementation hat zudem die Tendenz, eine höhere durchschnittliche Latenz wie ihre vorgehende Gruppe aufzuweisen. Dies ist durch die jeweilig steigende Trendlinie gut zu erkennen.

Die Rust und die C++ Implementierung weisen bei einem Client etwa die selbe durchschnittliche Latenz auf, während die Rust Implementation mit dem C++ Algorithmus hier eine leicht erhöhte Latenz aufweist. Die Trendlinie der C++ Implementation verläuft bei steigender Anzahl an Nachrichten deutlich steiler wie die Trendlinie der anderen zwei Implementationen. Bei zwei Fahrzeugen sind die beiden Rust Implementationen gleichauf und bei weiteren Fahrzeugen hat die Rust Implementation mit dem C++ Algorithmus eine geringere durchschnittliche Latenz wie die reine Rust oder die reine C++ Implementation.

Auswertung

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass sowohl die C++ Implementation als auch die Rust Implementationen, trotz erhöhtem Stress, die Anforderung 3100 (siehe Abschnitt 4.2) erfüllen. Im Gegensatz zur C++ Implementation erfüllen die Rust Implementationen dies auch noch bei mehr Fahrzeugen (getestet bis inklusive 5, die Trendlinie lässt aber noch mehr vermuten).

Der proportionale Anstieg der Reaktionszeit der C++ Implementation für jedes zusätzlich verbundene Fahrzeug (etwa 2ms bei einem Fahrzeug, kurz unter 4ms, 6ms, 8ms und 10ms bei 2, 3, 4 und 5 Fahrzeugen) lässt einen Fehler bei der Parallelisierung der Fahrzeuge vermuten. Der Versand von Nachrichten an die verbundenen Fahrzeuge scheint nicht parallel, sondern sequenziell ausgeführt zu werden. Vergleiche zwischen der Rust und C++ Implementierung bei mehr als einem verbundenen Fahrzeug sind daher wenig aussagekräftig.

Interessant ist der Verlauf der roten Linie (Rust mit C++ Algorithmus) zur braunen Linie (Rust Algorithmus). Eine Verschlechterung der Reaktionszeit, wie mit nur einem Fahrzeug (etwa 15.000 Nachrichten) gegenüber der reinen Rust Implementation war, durch die erhöhte Komplexität und die weitere Schicht zur Einbindung des C++ Algorithmus, zu erwarten gewesen. Eine ähnliche Reaktionszeit bei 1, gleiche Reaktionszeit bei 2 Fahrzeugen und bessere Reaktionszeit ab 3 Fahrzeugen ist dagegen unerwartet gewesen. Erst bei einer Codanalyse wurde klar, dass dies vermutlich daran liegt, dass der C++ Algorithmus parallel zum Rust Algorithmus-Adapter ausgeführt wird. Die Encodierung der Antwort (*EnvironmentFrame*-Nachricht nach *RawMessage*, etwa 130µs) wird daher asynchron zum

Aufbereiten der nächsten und Weiterleiten der vorherigen Nachricht an die Fahrzeuge ausgeführt.

Dieses weitere asynchrone Verhalten setzt eines der für das „Channel Architektur Pattern“ erwähnten Optimierungsmöglichkeiten um (siehe Unterabschnitt 6.3.1). Wie in [Dou03, S. 160] beschrieben, wird durch die parallele Verarbeitung von mehreren Elementen in einem Kanal (in diesem Fall der Kanal vom *AlgorithmAdapter* über den C++ Algorithmus zu den Fahrzeugen) die Verarbeitung einer hohen Datenmenge ermöglicht.

Eine Implementation in Rust scheint keinen auffallenden oder gravierenden Nachteil im Laufzeitverhalten gegenüber einer Implementation in C++ aufzuweisen. Das Szenario mit einem verbundenem Fahrzeug lässt dagegen vermuten, dass sich das Laufzeitverhalten der beiden Programmiersprachen sehr ähnelt. Auch lässt der geringe Anstieg der Rust-Kurven wenig Spielraum, um von einer ausgebesserten C++ Implementation auffallend stark übertrumpft zu werden, da kein oder ein negativer Anstieg der Kurve bei Erhöhung der Last aus logischen Gründen ausgeschlossen ist.

Nachtrag

Aufgrund der schwachen Aussagekraft des ersten Tests, wurde ein weiterer Test durchgeführt. Anstatt die Anzahl der Fahrzeuge zu variieren, wobei die C++ Implementation eine Schwäche zeigt, variiert die Anzahl der Sensoren bei nur einem verbundenem Fahrzeug. In der Abbildung 8.2a ist hierzu das Resultat für 10, 25, 50, 75 und 100 Sensoren zu sehen. Auch in diesem Test weisen die Rust-Implementationen ähnliche oder geringere Laufzeiten wie die C++ Implementation auf.

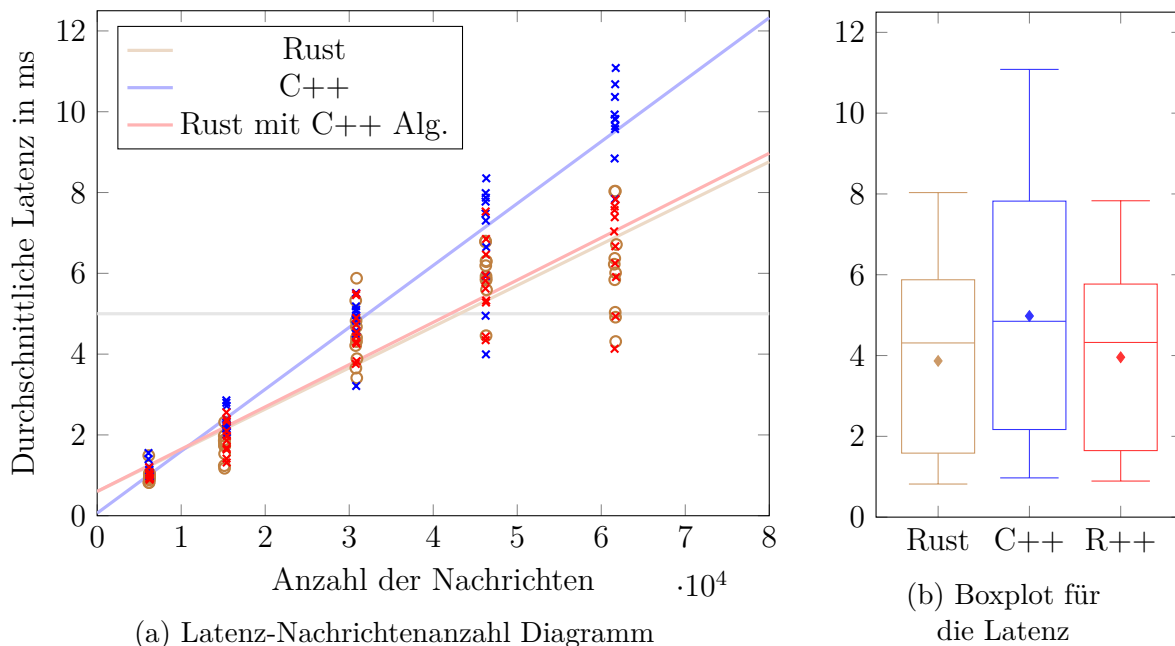


Abbildung 8.2: Laufzeitverhalten der MEC-View-Server Implementationen

9 Fazit

Rust wirbt mit dem verlockenden Versprechen, die Programmierung von sicheren, hoch parallelisierten und daher performanten Programmen zu ermöglichen. Diese Verlockungen in Kombination mit der guten Dokumentation der Standardbibliothek waren nötig, um die Einstiegshürde zu überwinden. Gerade zu Beginn der Arbeit fühlte es sich an, als wäre das größte Hindernis, ein nicht triviales Rust-Programm zu schreiben, der Compiler selbst. Änderungen im Quellcode mit direkt darauf folgenden erfolgreichen Compilevorgängen glichen Wundern.

Erst nach einer Eingewöhnungszeit „versöhnt“ man sich mit dem Compiler. Man beginnt zu verstehen, was grundsätzlich bemängelt wird und wie sich das Eigentümer- und Verleihprinzip in der Praxis auswirkt. Die Abwesenheit von fatalen Laufzeitfehlern hilft zudem, über die zusätzlichen Compilefehler hinwegzusehen. So ist die Rust-Implementierung des MEC-View-Servers nie aufgrund von Rust-Code abgestürzt – eine Aussage, die sich so nicht für die C++ Variante wiederholen lässt. Erst bei der Einbindung des C und C++ Codes zeigten sich kurzzeitig Speicherzugriffsfehler oder „double-frees“. Diese Kombination macht es einem erstaunlich deutlich, wie komfortabel die Garantien von Rust sind, wie schnell diese als selbstverständlich angesehen werden und wie gefährlich es ohne diese „normalerweise“ ist.

Die Ergebnissen aus Abschnitt 8.3 bestätigten die Erwartung, dass die Reaktionszeiten von Rust, denen von C++ ähneln und nicht deutlich schlechter ausfallen. Dass die Garantien von Rust jedoch überhaupt keine ersichtlichen Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten zu haben scheinen (Szenario mit einem Fahrzeug in Abbildung 8.1a und Abbildung 8.2a), ist trotz Erwartungshaltung angenehm überraschend gewesen.

Aufgrund der schnellen und umfangreichen Entwicklungszyklen (siehe Unterabschnitt 2.2.2), der bereits hohen Adaption (siehe Abschnitt 2.24) der jungen Programmiersprache und der starken Beliebtheit (siehe Kapitel 2), bleibt der Eindruck, dass die Programmiersprache Rust keine kurzzeitige Modeerscheinung ist. Weder im Laufzeitverhalten, Funktionsumfang oder Plattformunterstützung stößt man auf Argumente, die gegen eine Verwendung von Rust sprechen würden. Im Gegenteil, es macht sich das Gefühl breit, keine andere Programmiersprache könne die Anforderungen der funktionalen Sicherheit mit den Leistungsanforderungen aus dem echtzeitnahen Umfeld derart gut vereinen.

Literatur

- [Bec03] K. Beck. *Test-driven Development: By Example*. Kent Beck signature book. Addison-Wesley, 2003. ISBN: 9780321146533.
- [Ber17] Daniel Berger. *Firefox Quantum ist da: "Größtes Update aller Zeiten"*. *heise online*. Deutsch. 14. Nov. 2017. URL: <https://heise.de/-3889741> (besucht am 21.03.2018).
- [BO17] Jim Blandy und Jason Orendorff. *Programming Rust*. Fast, Safe Systems Development. O'Reilly Media, Dez. 2017. ISBN: 1491927283.
- [But+06] G.C. Buttazzo u. a. *Soft Real-Time Systems: Predictability vs. Efficiency: Predictability vs. Efficiency*. Series in Computer Science. Springer US, 2006. ISBN: 9780387281476.
- [Chu] Chucklefish. *About Us*. *Chucklefish Games*. Englisch. URL: <https://blog.chucklefish.org/about/> (besucht am 24.04.2018).
- [Cri15] Alex Crichton. *Rust Internals*. *PSA: Movement of rust-lang crates*. Englisch. 22. Sep. 2015. URL: <https://internals.rust-lang.org/t/psa-movement-of-rust-lang-crates/2671> (besucht am 03.04.2018).
- [DD13] P.J. Deitel und H. Deitel. *C for Programmers with an Introduction to C11*. Deitel Developer Series. Pearson Education, 2013. ISBN: 9780133462074.
- [Dou03] B.P. Douglass. *Real-time Design Patterns: Robust Scalable Architecture for Real-time Systems*. Addison-Wesley object technology series Bd. 1. Addison-Wesley, 2003. ISBN: 9780201699562.
- [fgi17] fgilcher. *Subreddit Rust*. *fgilcher kommentiert*. Englisch. 3. Nov. 2017. URL: https://www.reddit.com/r/rust/comments/7amv58/just_started_learning_rust_and_was_wondering_does/dpb9qew/ (besucht am 14.02.2018).
- [Gil17] Florian Gilcher. *GOTO 2017. Why is Rust Successful?* Englisch. 6. Dez. 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=-Tj8Q12DaEQ> (besucht am 21.02.2018).
- [Gol12] J. Goll. *Methoden des Software Engineering: Funktions-, daten-, objekt- und aspektororientiert entwickeln*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012. ISBN: 9783834824332.

- [Gol14] J. Goll. *Architektur- und Entwurfsmuster der Softwaretechnik: Mit lauffähigen Beispielen in Java*. SpringerLink : Bücher. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783658055325.
- [Gol18] J. Goll. *Entwurfsprinzipien und Konstruktionskonzepte der Softwaretechnik: Strategien für schwach gekoppelte, korrekte und stabile Software*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN: 9783658200558.
- [GD14] J. Goll und M. Dausmann. *C als erste Programmiersprache: Mit den Konzepten von C11*. SpringerLink : Bücher. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783834822710.
- [Gor17] Manish Goregaokar. *Fearless Concurrency in Firefox Quantum. The Rust Programming Language Blog*. Englisch. 14. Nov. 2017. URL: <https://blog.rust-lang.org/2017/11/14/Fearless-Concurrency-In-Firefox-Quantum.html> (besucht am 21.03.2018).
- [Gou17] Carol (Nichols || Goulding). *Two years of Rust. The Rust Programming Language Blog*. Englisch. 15. Mai 2017. URL: <https://blog.rust-lang.org/2017/05/15/rust-at-two-years.html> (besucht am 21.03.2018).
- [Grü17] Sebastian Grüner. „C ist eine feindselige Sprache“. *Der Mitbegründer des Gnome-Projekts Federico Mena Quintero ist nicht mehr besonders überzeugt von der Sprache C und empfiehlt aus eigener Erfahrung stattdessen Rust - vor allem für Parser*. Deutsch. 22. Juni 2017. URL: <https://www.golem.de/news/rust-c-ist-eine-feindselige-sprache-1707-129196.html> (besucht am 14.02.2018).
- [Hoa09] Tony Hoare. *Null References: The Billion Dollar Mistake*. Englisch. 25. Aug. 2009. URL: <https://www.infoq.com/presentations/Null-References-The-Billion-Dollar-Mistake-Tony-Hoare> (besucht am 06.03.2018).
- [Ins15] European Telecommunications Standards Institute. *Mobile Edge Computing. A key technology towards 5G*. Englisch. Sep. 2015. URL: http://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp11_mec_a_key_technology_towards_5g.pdf (besucht am 21.03.2018).
- [ITUa] International Telecommunication Union (ITU). *Introduction to ASN.1. ASN.1 Project*. Englisch. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/asn1/Pages/introduction.aspx> (besucht am 23.02.2018).
- [ITUb] International Telecommunication Union (ITU). *The Encoding control notation. ASN.1 Project*. Englisch. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/asn1/Pages/ecn.aspx> (besucht am 23.02.2018).
- [ITU15a] International Telecommunication Union (ITU). *Information technology – ASN.1 encoding rules. Specification of Packed Encoding Rules (PER)*. Englisch. Aug. 2015. URL: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12484-en?locatt=format:pdf&auth> (besucht am 23.02.2018).

- [ITU15b] International Telecommunication Union (ITU). *Information technology – ASN.1 encoding rules. Specification of Basic Encoding Rules (BER), Canonical Encoding Rules (CER) and Distinguished Encoding Rules (DER)*. Englisch. Aug. 2015. URL: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12483-en?locatt=format:pdf&auth> (besucht am 23.02.2018).
- [ITU15c] International Telecommunication Union (ITU). *Information technology – ASN.1 encoding rules. XML Encoding Rules (XER)*. Englisch. Aug. 2015. URL: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12489-en?locatt=format:pdf&auth> (besucht am 23.02.2018).
- [Jr93] Burton S. Kaliski Jr. *A Layman's Guide to Subset ASN.1, BER, and DER. An RSA Laboratories Technical Note*. Englisch. 1. Nov. 1993. URL: <http://luca.ntop.org/Teaching/Appunti/asn1.html> (besucht am 23.02.2018).
- [kyr17] kyren. *Hey, this is kyren from Chucklefish, we make and publish cool video games. One of our two next projects is currently being written in rust, and I'd like to talk to you about it!* Englisch. 23. Okt. 2017. URL: https://www.reddit.com/r/rust/comments/78bowa/hey_this_is_kyren_from_chucklefish_we_make_and/?limit=500 (besucht am 24.04.2018).
- [Lap04] P.A. Laplante. *Real-Time Systems Design and Analysis*. Wiley, 2004. ISBN: 9780471648284.
- [Lei17] Felix von Leitner. *Fefes Blog. D soll Teil von gcc werden*. Deutsch. 22. Juni 2017. URL: <https://blog.fefe.de/?ts=a7b51cac> (besucht am 14.02.2018).
- [Ler17] Carl Lerche. *tokio. Cargo: packages for Rust*. Englisch. 7. Mai 2017. URL: <https://crates.io/crates/tokio> (besucht am 07.05.2018).
- [LLVa] LLVM.org. *The LLVM Compiler Infrastructure Project. LLVM Overview*. Englisch. URL: <https://llvm.org/> (besucht am 19.02.2018).
- [LLVb] LLVM.org. *The LLVM Compiler Infrastructure Project. LLVM Features*. Englisch. URL: <https://llvm.org/Features.html> (besucht am 19.02.2018).
- [LPP11] P. Löw, R. Pabst und E. Petry. *Funktionale Sicherheit in der Praxis: Anwendung von DIN EN 61508 und ISO/DIS 26262 bei der Entwicklung von Serienprodukten*. dpunkt.verlag, 2011. ISBN: 9783898648981.
- [Mat16] Niko Matsakis. *GitHub. Tracking issue for 128-bit integer support (RFC 1504)*. Englisch. 2016. URL: <https://github.com/rust-lang/rust/issues/35118> (besucht am 05.03.2018).
- [Men] Federico Mena-Quintero. *Federico Mena-Quintero*. Englisch. URL: <https://people.gnome.org/~federico/> (besucht am 06.03.2018).
- [Ove18] Stack Overflow. *Stack Overflow Developer Survey 2018. Most Loved, Dreaded, and Wanted*. Englisch. 18. März 2018. URL: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2018#most-loved-dreaded-and-wanted> (besucht am 18.03.2018).

- [Qui] Federico Mena Quintero. *Replacing C library code with Rust. What I learned with librsvg*. Englisch. URL: <https://people.gnome.org/~federico/blog/docs/fmq-porting-c-to-rust.pdf> (besucht am 14.02.2018).
- [Rusa] Rust. *The Rust Programming Language*. Englisch. URL: <https://www.rust-lang.org/en-US/faq.html> (besucht am 16.02.2018).
- [Rusb] Rust. *The Rust Programming Language. Rust Platform Support*. Englisch. URL: <https://forge.rust-lang.org/platform-support.html> (besucht am 19.02.2018).
- [Rusc] Rust-Lang. *Naming conventions*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/1.0.0/style/style/naming/README.html> (besucht am 22.03.2018).
- [Rusd] Rust-Lang. *Rust. std::string::String*. Englisch. URL: https://doc.rust-lang.org/std/string/struct.String.html#method.from_utf8 (besucht am 22.03.2018).
- [Ruse] Rust-Lang. *Style Guidelines*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/1.0.0/style/README.html> (besucht am 23.02.2018).
- [Rus17] Rust-Lang. *Announcing Rust 1.19*. Englisch. 20. Juli 2017. URL: <https://blog.rust-lang.org/2017/07/20/Rust-1.19.html> (besucht am 08.03.2018).
- [Rus18a] Rust-Lang. *Chucklefish Taps Rust to Bring Safe Concurrency to Video Games. How Rust is providing a stable future for Chucklefish's games*. Englisch. 2018. URL: <https://www.rust-lang.org/pdfs/Rust-Chucklefish-Whitepaper.pdf> (besucht am 24.04.2018).
- [Rus18b] Rust-Lang. *GitHub. rust/Copyright*. Englisch. 2018. URL: <https://github.com/rust-lang/rust/blob/master/COPYRIGHT> (besucht am 12.03.2018).
- [Rusf] Rust-Lang/Book. *The Cargo Book. Build Scripts*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/cargo/reference/build-scripts.html> (besucht am 16.06.2018).
- [Rusg] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Primitive Types*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/first-edition/primitive-types.html> (besucht am 21.02.2018).
- [Rush] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Statements and expressions*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/reference/statements-and-expressions.html> (besucht am 05.03.2018).
- [Rusi] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Constructors*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/beta/nomicon/constructors.html> (besucht am 05.03.2018).
- [Rusj] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Send and Sync*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/beta/nomicon/send-and-sync.html> (besucht am 14.03.2018).

- [Rusk] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Loops*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/first-edition/loops.html> (besucht am 23.03.2018).
- [Rusl] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Conditional Compilation*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/first-edition/conditional-compilation.html> (besucht am 19.03.2018).
- [Rusm] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Test Organization*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/second-edition/ch11-03-test-organization.html> (besucht am 19.03.2018).
- [Rusn] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Behavior considered undefined*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/reference/behavior-considered-undefined.html> (besucht am 07.03.2018).
- [Ruso] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Unsafe Rust*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/second-edition/ch19-01-unsafe-rust.html#dereferencing-a-raw-pointer> (besucht am 20.02.2018).
- [Rusp] Rust-Lang/Book. *The Rust Programming Language. Unsafe Rust*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/book/second-edition/ch19-01-unsafe-rust.html> (besucht am 17.05.2018).
- [Rusq] Rust-Lang/Doc. *Rust. core::cmp::PartialEq*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/core/cmp/trait.PartialEq.html> (besucht am 08.03.2018).
- [Rusr] Rust-Lang/Doc. *Rust. core::cmp::PartialEq*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/core/cmp/trait.Eq.html> (besucht am 08.03.2018).
- [Russ] Rust-Lang/Doc. *Rust. core::cmp::PartialOrd*. Englisch. URL: <https://doc.rust-lang.org/core/cmp/trait.PartialOrd.html> (besucht am 08.03.2018).
- [Rust] Rust-Lang/RFCs. *GitHub. support alloca*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rfcs/issues/618> (besucht am 08.03.2018).
- [Rusu] Rust-Lang/RFCs. *GitHub. Tracking issue for specialization (RFC 1210)*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rust/issues/31844> (besucht am 12.03.2018).
- [Rusv] Rust-Lang/RFCs. *GitHub. dyn trait syntax*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rfcs/blob/master/text/2113-dyn-trait-syntax.md> (besucht am 12.03.2018).
- [Rusw] Rust-Lang/RFCs. *GitHub. Tracking issue for RFC 1861: Extern types*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rust/issues/43467> (besucht am 20.02.2018).
- [Rusx] Rust-Lang/RFCs. *GitHub. Add futures and task system to libcore*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rfcs/pull/2418> (besucht am 15.06.2018).

- [Rus15] Rust-Lang/RFCs. *Rust Lang crates*. Englisch. 29. Juli 2015. URL: <https://github.com/rust-lang/rfcs/blob/master/text/1242-rust-lang-crates.md> (besucht am 02.05.2018).
- [Sch13] Julia Schmidt. *Graydon Hoare im Interview zur Programmiersprache Rust*. Deutsch. 12. Juli 2013. URL: <https://www.heise.de/-1916345> (besucht am 16.02.2018).
- [Sta] International Organization for Standardization. *Publicly Available Standards*. Englisch. URL: <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html> (besucht am 19.03.2018).
- [Sys17] Fraunhofer-Institut Für eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK. *Echtzeitvernetztes Fahren mit LTE und Mobile Edge Computing*. Deutsch. Juni 2017. URL: <https://www.esk.fraunhofer.de/content/dam/esk/dokumente/PDB-Car2MEC-dt.pdf> (besucht am 19.03.2018).
- [Wan17] J. Wang. *Real-Time Embedded Systems*. Quantitative Software Engineering Series. Wiley, 2017. ISBN: 9781118116173.
- [Wik17a] Wikipedia. *Ententest — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 16. Juni 2018]. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ententest&oldid=172418924>.
- [Wik17b] Wikipedia. *LLVM — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=LLVM&oldid=169299719> (besucht am 19.02.2018).
- [Wik18a] Wikipedia. *Foreign function interface — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2018. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Foreign_function_interface&oldid=825105351 (besucht am 14.02.2018).
- [Wik18b] Wikipedia. *Git — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 22. März 2018]. 2018. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Git&oldid=174966615>.
- [Wik18c] Wikipedia. *NaN — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2018. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=NaN&oldid=824855938> (besucht am 08.03.2018).
- [Wik18d] Wikipedia. *X.690 — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2018. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=X.690&oldid=820700186> (besucht am 23.02.2018).
- [wit] withoutboats. *GitHub. Tracking issue for 128-bit integer support (RFC 1504)*. Englisch. URL: <https://github.com/rust-lang/rust/issues/35118#issuecomment-362689905> (besucht am 07.03.2018).

Abkürzungsverzeichnis

ASN.1 Abstract Syntax Notation One. 42

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2

GC Garbage Collector. 26, 36

ITU International Telecommunication Union. 42

MEC Mobile Edge Computing. 2, 41, 42

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über das Forschungsprojekt	2
2.1	Hinweise des Compilers bezüglich der Aufzählung aus Listing 2.14	24
2.2	Speicherlayout Vec und Slice [BO17, S. 63]	25
2.3	Der Compiler bemängelt die Nutzung einer nicht initialisierten Variable . .	30
2.4	Der Compiler bemängelt den Versuch, eine Leihgabe länger als den Eigen- tümer leben zu lassen	34
2.5	Speicherlayout Rc [BO17, S. 90-91]	36
2.6	Vergleich Rust Raw-Pointer und Referenz zu C-Pointer	38
5.1	Systemkontextdiagramm	53
5.2	Anwendungsfalldiagramm des MEC-View-Servers für den Akteur „Fahrzeug“	54
5.3	Anwendungsfalldiagramm des MEC-View-Servers für den Aktuer „Sensor“	54
5.4	ASN.1 Nachricht mit Kopfdaten	59
5.5	Gültige ASN.1 Nachrichtentypen	59
5.6	Kommunikation zwischen Sensor und MEC-View-Server	61
5.7	Kommunikation zwischen Fahrzeug und MEC-View-Server	62
5.8	Interaktion des MEC-View-Servers mit einem Fahrzeug und einem Sensor .	64
6.1	Architekturentwurf	66
6.2	Aktivitätsdiagramme zum Dekodieren einer Anfrage aus dem TCP- Datenstrom (unten) und zum Versenden einer Aufforderung (oben).	69
7.1	Jenkins Pipeline Graph	71
7.3	Instanziierung eines neuen Algorithmus in der C++ Implementation	82
7.4	Abhängigkeiten zum Instanzieren des C++ Algorithmus	83
7.5	Architekturentwurf	84
7.6	Architekturentwurf	85
7.7	Detailansicht der Crate <i>libshim-sys</i>	86
7.8	Instanziierung eines neuen C++ Algorithmus aus der Rust Implementation	88
7.9	Kommunikation mit dem C++ Algorithmus	88
8.1	Laufzeitverhalten der MEC-View-Server Implementationen	93
8.2	Laufzeitverhalten der MEC-View-Server Implementationen	95

Listings

2.1	Verzeichnisstruktur des Quelltext-Verzeichnisses	9
2.2	Vereinfachte Verzeichnisstruktur einer „crate“	10
2.3	„Hello World“ in Rust	10
2.4	Beispiel eines Arrays und einer Slice	12
2.5	Beispiel für lokale Typinferenz	12
2.6	Beispiel einer Funktion	14
2.7	Punkt Datenstruktur mit einem „Konstruktor“	14
2.8	Kompletter <code>match</code> Ausdruck	19
2.9	Vereinfachter <code>if let</code> Ausdruck	20
2.10	Beispiel Verwendung einer <code>loop</code> Schleife	21
2.11	Beispiel Verwendung einer <code>for</code> Schleife	21
2.12	Beispiel Verwendung einer <code>while</code> Schleife	22
2.13	Beispiel Musterabgleichung in einer <code>while</code> Schleife	22
2.14	Beispiel für eine nicht konforme Aufzählung	23
2.15	Geltungsbereich von Variablen	26
2.16	Eigentümer und Referenzen von Variablen	27
2.17	Negativbeispiel: Fehlende Fehlerprüfung in C	30
2.18	Positivbeispiel: Keine fehlende Fehlerprüfung in Rust	31
2.19	Verkürzte Fehlerbehandlung in Rust	31
2.20	Negativbeispiel: Fehlerhafter Klon in C	32
2.21	Negativbeispiel: Fehlerhafter Klon in Rust	33
2.22	test2	35
2.23	Ausschnitt von „PositionOffset“ (C-Code) aus der <i>libmessages-sys</i> Crate . .	37
2.24	Ausschnitt von „PositionOffset“ (Rust-Code) aus der <i>libmessages-sys</i> Crate	37
2.25	Externe Funktionsdefinition der ASN.1 Funktion zum Enkodieren	38
7.1	Beispiel für die Nutzung von Kanälen	74
7.2	Beispiel für die Nutzung von Kanälen und des Kommando-Verhaltensmusters	75
7.3	Kommandos, die einem <i>Algorithm</i> zugesandt werden können	76
7.4	Command und Proxy Pattern	77
7.5	Ausschnitt aus der Datenstruktur <i>Client</i> zeigt generische Typen für <i>Algorithm</i> und <i>Adapter</i>	78
7.6	Auszug aus <i>lib.rs</i> der <i>libmessages-sys</i> Crate	79
7.7	Hilfsinformationen der Rust-Implementation mit allen möglichen Parametern	89

[git] • master @ 56b9233 • 21. Juni 2018