



HOCHSCHULE LANDSHUT

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

FAKULTÄT INFORMATIK

Bachelorarbeit

PROGRAMMIEREN IN RUST UND VERGLEICH MIT C/C++

Thomas Keck

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Dieter Nazareth

ERKLÄRUNG ZUR BACHELORARBEIT

Keck, Thomas

Hochschule Landshut Fakultät Informatik

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

.....
(Datum)

.....
(Unterschrift des Studierenden)

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 1.1 | Was ist Rust? | 2 |
| 2 | Rust toolchain | 3 |
| 2.1 | rustup | 3 |
| 2.2 | rustc | 4 |
| 2.2.1 | Grundlegende Verwendung | 4 |
| 2.2.2 | Lints | 4 |
| 2.3 | Cargo | 5 |
| 2.3.1 | Projektverwaltung | 5 |
| 2.3.2 | Veröffentlichung bei crates.io | 7 |
| 2.3.3 | Externe Tools | 10 |
| 3 | Programmierung mit Rust und Unterschiede zu C/C++ | 12 |
| 3.1 | Grundlagen | 12 |
| 3.1.1 | Variablen und Mutabilität | 12 |
| 3.1.2 | Datentypen | 14 |
| 3.1.3 | Funktionen | 17 |
| 3.1.4 | Kontrollstrukturen | 18 |
| 3.2 | Ownership | 21 |
| 3.2.1 | Funktionsweise von Ownership | 21 |
| 3.2.2 | Referenzen und Borrowing | 29 |
| 3.2.3 | Slice Typ | 32 |

1 Einleitung

1.1 Was ist Rust?

Rust ist eine quelloffene System-Programmiersprache, die sich auf Geschwindigkeit, Speichersicherheit und Parallelität konzentriert. Entwickler nutzen Rust für ein breites Spektrum an Anwendungsgebieten: Spiel-Engines¹, Betriebssysteme², Dateisysteme und Browserkomponenten. [Moz]

Eine aktive Gemeinschaft von Programmierern verwaltet die Codebasis und fügt fortlaufend neue Verbesserungen hinzu. Mozilla sponsert das Open-Source-Projekt.

Rust wurde von Grund auf neu aufgebaut und enthält Elemente aus bewährten und modernen Programmiersprachen. Es verbindet die ausdrucksstarke und intuitive Syntax von High-Level-Sprachen mit der Kontrolle und Leistung einer Low-Level-Sprache. Es verhindert Segmentierungsfehler und gewährleistet Threadsicherheit. Dadurch können Entwickler Code schreiben, der ehrgeizig, schnell und korrekt ist.

Rust macht die Systemprogrammierung durch die Kombination von Leistung und Ergonomie zugänglicher. Es bietet starke Features wie Zero-Cost-Abstraktionen, sichere Speicherverwaltung durch einen strengen Compiler und Typsystem sowie risikolose Nebenläufigkeit.

Große und kleine Unternehmen setzen Rust bereits ein, darunter:

- Mozilla, wichtige Komponenten von Mozilla Firefox Quantum.
- Dropbox, mehrere Komponenten wurden in Rust als Teil eines größeren Projekts geschrieben, um eine höhere Effizienz des Rechenzentrums zu erreichen.
- Yelp, Framework in Rust für Echtzeit A/B-Tests, welches auf allen Yelp-Websites und -Anwendungen verwendet wird.

¹<http://areweframeyet.com>

²z.B. Redox OS

2 Rust toolchain

Die Rust toolchain ist eine Sammlung von Werkzeugen, die dabei helfen, den Compiler aktuell zu halten und Projekte zu verwalten.

2.1 rustup

Das Rustup-Tool ist die empfohlene Installationsmethode für Rust. Das Tool ermöglicht zusätzlich die Verwaltung von verschiedenen Versionen, Komponenten und Plattformen. Um zwischen den Versionen stable, beta und nightly zu wechseln, kann auf der Kommandozeile eingegeben werden: [Rusb]

```
rustup install beta           # release channel
rustup install nightly
rustup update                 # update all channels
rustup default nightly       # switch to 'nightly'
```

Rust unterstützt auch das Kompilieren für andere Zielsysteme, dabei kann rustup helfen. So kann man beispielsweise MUSL verwenden:

```
# add target
rustup target add x86_64-unknown-linux-musl
# build project with target
cargo build --target=x86_64-unknown-linux-musl
```

Mit Hilfe von rustup können verschiedene Komponenten installiert werden, z.B.:

- rust-docs: Lokale Kopie der Rust-Dokumentation, um sie offline lesen zu können.
- rust-src: Lokale Kopie des Quellcodes von Rust. Autokomplettierungs-Tools verwenden diese Information.
- rustfmt-preview: Zur automatischen Code-Formatierung.

```
rustup component add rustfmt-preview
```

2.2 rustc

Der Compiler von Rust, er übersetzt den Quellcode in einen binären code, entweder als Bibliothek oder als ausführbare Datei. Die meisten Rust-Programmierer rufen rustc nicht direkt auf, sondern indirekt über Cargo. [Rusf]

2.2.1 Grundlegende Verwendung

Der Kommandozeilenbefehl für das Kompilieren mit rustc ähnelt dem eines C-Programms:

```
gcc    hello.c  -o helloC           # C program
rustc  hello.rs -o helloRust        # Rust program
```

Anders als in C muss nur der crate root¹ angegeben werden. Der Compiler kann mithilfe des Codes selbständig feststellen, welche Dateien er übersetzen und linken muss. Es müssen somit keine Objektdaten erstellt werden.

2.2.2 Lints

Ein Lint ist ein Werkzeug, das zur Verbesserung des Quellcodes verwendet wird. Der Rust-Compiler enthält eine Reihe von Lints. Beim Kompilieren werden dadurch Warnungen oder Fehlermeldungen ausgegeben. Beispiel:

```
$ cat main.rs
fn main() {
    let x = 5;
}

$ rustc main.rs
warning: unused variable: 'x'
--> main.rs:2:9
   |
2  |     let x = 5;
   |         ^ help: consider using '_x' instead
   |
   = note: #[warn(unused_variables)] on by default
```

¹Quellcode-Datei mit der main() Methode

Das ist das `unused_variables` Lint. Es besagt, dass eine Variable eingeführt wurde, die nicht im Code verwendet wurde. Dies ist nicht falsch, es könnte jedoch ein Bug sein.

2.3 Cargo

Cargo ein Projektmanager für Rust. Damit können Abhängigkeiten heruntergeladen und verteilbare Pakete erstellt werden, welche auf crates.io² hochgeladen werden können. [Rusa]

2.3.1 Projektverwaltung

Projekte können mit Hilfe von Cargo erstellt werden, dabei entsteht eine bestimmte Ordnerstruktur mit einer `Cargo.toml` Datei sowie dem `crate root` im `src`-Ordner. Ein Projekt kann eine Applikation (binary) oder eine Bibliothek (library) sein. Der `crate root` ist bei einer Applikation immer „`main.rs`“ und bei einer Bibliothek „`lib.rs`“.

```
$ cargo new hello_world --bin          # --lib for library
      Created binary (application) 'hello_world' package
```

```
$ cd hello_world
$ tree .
```

```
.
├── Cargo.toml
└── src
    └── main.rs
```

1 directory , 2 files

Die `Cargo.toml` enthält alle wichtigen Metainformationen, die Cargo zum Kompilieren benötigt.

```
[package]
name = "hello_world"
version = "0.1.0"
authors = ["Thomas Keck <s-tkeckk@haw-landshut.de>"]
edition = "2018"
```

²Paketeregister der Rust-Community

[dependencies]

Die Informationen über den Author enthält Cargo von den Umgebungsvariablen `CARGO_NAME` und `CARGO_EMAIL`. In Rust gibt es sogenannte editions, welche in der Regel in einem zeitlichen Abstand von zwei oder drei Jahren veröffentlicht werden und, ähnlich wie in C, einen Standard festlegen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gibt es zwei Editionen: 2015 und 2018. Das Pendant in C wären die C-Standards wie z.B. C90, C99 oder C11.

Zudem können hier zusätzliche Bibliotheken angegeben werden, die Cargo automatisch von crates.io herunterlädt in in das Projekt einbindet. Cargo erstellt für genauere Informationen der Abhängigkeiten eine Datei `Cargo.lock`, diese sollte nicht manuell verändert werden, da sie von Cargo gepflegt wird. Mithilfe von Cargo können Tests gestartet werden, genauere Information dazu sind aus Kapitel 3.6 zu entnehmen.

Projekt-Layout

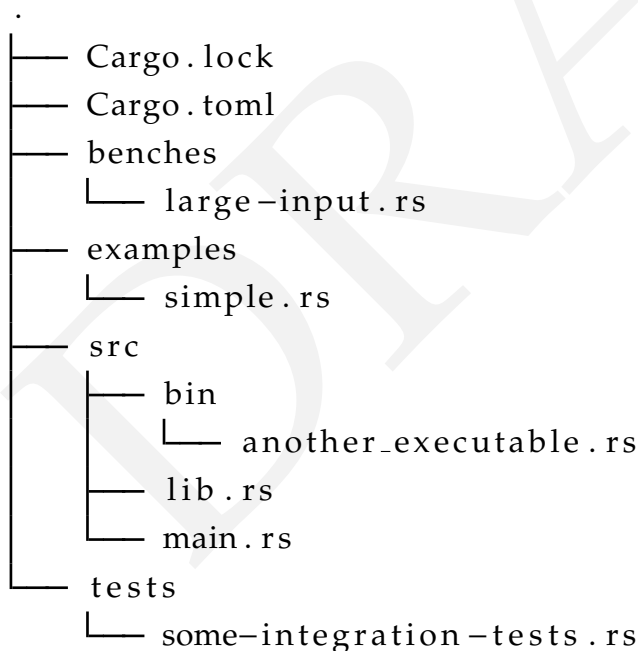


Abb. 2.1: Dateibaum eines Rust Projekts

- `Cargo.toml` und `Cargo.lock` werden im Wurzelverzeichnis des Projekts gespeichert

- Quellcode-Dateien sind im src-Ordner vorgesehen
- Die Standarddatei für Bibliotheken ist src/lib.rs
- Die Standarddatei für ausführbare Programme ist src/main.rs
- Quellcode für sekundäre ausführbare Programme src/bin/*.rs
- Integrationstests im Ordner tests, Unit-Tests werden in die jeweilige Programmdatei geschrieben
- Beispiele im examples Ordner
- Benchmarks im benches Ordner

Wichtige Kommandozeilenbefehle für Cargo

Zum Kompilieren und Ausführen:

```
$ cargo build
$ ./target/debug/hello_world

$ cargo build --release           # optimized performance
$ ./target/release/hello_world

# alternative as one command
$ cargo run
```

Zum Testen:

```
# run all standard tests
$ cargo test

# run all tests marked as ignored
$ cargo test -- --ignored
```

2.3.2 Veröffentlichung bei crates.io

Das Paketregister der Rust-Community, genannt crates.io, ist ein Ort für Bibliotheken, die von verschiedenen Programmierern aus der Community verwaltet werden. Eine Veröffentlichung ist permanent. Das heißt, dass keine Versionsnummern

überschrieben werden können und somit der Code nicht gelöscht werden kann. Jedoch gibt es keine Begrenzung für die Anzahl der Versionen, die veröffentlicht werden können.

Vor der Veröffentlichung wird ein Account benötigt. Dazu muss mit einem Github-Account auf crates.io ein API-Token generiert werden. Danach kann man sich über einen Befehl auf der Kommandozeile anmelden:

```
$ cargo login abcdefghijklmnopqrstuvwxyz012345
```

Dieser Token wird anschließend in einem lokalen Verzeichnis gespeichert und sollte nicht mit anderen geteilt werden. Erneute Generierung eines Tokens ist möglich.

Mithilfe von Cargo werden eigene Bibliotheken paketiert, dabei entsteht eine *.crate-Datei im Unterverzeichnis target/package.

```
$ cargo package
```

Dabei ist zu beachten, dass es eine Beschränkung der Uploadgröße von 10 MB für *.crate-Dateien gibt. Um die Dateigröße einzuschränken, können Dateien exkludiert bzw. inkludiert werden, dazu stehen die Schlüsselwörter `exclude` (blacklisting) und `include` (whitelisting) in der Cargo.toml-Datei zur Verfügung:

```
[package]
# ...
exclude = [
    "public/assets/*",
    "videos/*",
]
```

bzw.

```
[package]
# ...
include = [
    "**/*.rs",
    "Cargo.toml",
]
```

Zu beachten ist, dass das Schlüsselwort `include`, wenn gesetzt, `exclude` überschreibt. Zum Hochladen muss nur noch folgender Befehl ausgeführt werden:

```
$ cargo publish
```

Dieser Befehl paketierte die Bibliothek automatisch, falls keine lokale crate-Datei gefunden wurde.

Zum Veröffentlichen einer neuen Version muss lediglich die Versionsnummer in der Cargo.toml verändert werden.

Verwalten eines crate.io basierten Pakets

Die Verwaltung eines Pakets geschieht in Rust primär auf der Kommandozeilenebene mit Cargo.

Wenn ein schwerwiegender Bug in einem bereits hochgeladenen Paket gefunden wurde, kann diese Version aus dem Index von crates.io entfernt, jedoch nicht gelöscht werden.

```
$ cargo yank --vers 1.0.1
$ cargo yank --vers 1.0.1 --undo # undo the yank
```

Diese Pakete können immer noch heruntergeladen und in andere Projekte eingebunden werden, die bereits an „yanked“ Pakete gebunden waren. Cargo lässt dies dies nicht bei neu erstellten Crates³ zu.

Ein Projekt wird meist von mehreren Entwicklern programmiert oder Besitzer des Projekts ändert sich im Laufe der Zeit. Folgende Befehle fügen neue Entwickler zu einem Projekt hinzu, welche dann in der Lage sind, auf crates.io zu veröffentlichen bzw. entfernen sie aus dem Projekt:

```
# "named" owner:
$ cargo owner --add my-buddy
$ cargo owner --remove my-buddy

# "team" owner:
# syntax: github:org:team
$ cargo owner --add github:rust-lang:owners
$ cargo owner --remove github:rust-lang:owners
```

Wenn ein Teamname angegeben wird, sind diese nicht befugt, neue „owner“ hinzuzufügen. Die Befehle yank und publish sind Teams jedoch erlaubt. Ist ein „named owner“ in einem Team, so sind alle Entwickler eines Teams als „named owner“ eingestuft.

³Bibliothek oder Paket in Rust

2.3.3 Externe Tools

Cargo versucht, die Integration von Tools von Drittanbietern zu vereinfachen, z.B. für IDEs oder anderen Build-Systemen. Dazu verfügt Cargo über mehrere Möglichkeiten:

- cargo metadata-Befehl
- message-format Argument
- benutzerdefinierte Befehle

Information über die Paketstruktur mit cargo metadata

```
$ cargo metadata
```

Dieser Befehl gibt im JSON-Format alle Metadaten über ein Projekt aus. Darunter befinden sich die Version des aktuellen Projekts sowie eine Liste der Pakete und Abhängigkeiten. Grobe Struktur:

```
{
  "version": integer ,
  "packages": [ {
    "id": PackageId ,
    "name": string ,
    "version": string ,
    "source": SourceId ,
    "dependencies": [ Dependency ],
    "targets": [ Target ],
    "manifest_path": string ,
  } ],
  "workspace_members": [ PackageId ],
  "resolve": {
    "nodes": [ {
      "id": PackageId ,
      "dependencies": [ PackageId ]
    } ]
  }
}
```

Informationen beim Kompilieren

Mit dem Argument `--message-format=json` können genauere Informationen beim Kompilieren herausgefiltert werden:

```
$ cargo build --message-format=json
```

Dadurch entsteht ein Output im JSON-Format mit Informationen über Compiler-Fehlermeldungen und -Warnungen, erzeugte Artefakte und das Ergebnis.

Benutzerdefinierte Befehle

Cargo ist so ausgelegt, dass es erweitert werden kann, ohne dass Cargo selbst modifiziert werden muss. Dazu muss ein Programm in der Form *cargo-command* in einem der `$PATH`-Verzeichnisse des Benutzers liegen. Anschließend kann es von Cargo aufgerufen werden mit „*cargo command*“. Wenn ein solches Programm von Cargo aufgerufen wird, übergibt es, wie es üblich ist, als ersten Parameter den Programmnamen. Als zweites die Bezeichnung des Programms (*command*). Alle weiteren Parameter in der Befehlszeile werden unverändert weitergeleitet.

Beispiel:

```
// cargo-listargs
use std::env;

fn main() {
    let args: Vec<_> = env::args().collect();
    println!("{:?}", args);
}
```

Obiges Programm gibt eine Liste der Parameter aus, die übergeben wurden. Es könnte auch in C programmiert sein, entscheidend ist, dass der Programmname in der richtigen Form ist.

```
$ ./cargo-listargs arg1 arg2
# ["/.cargo-listargs", "arg1", "arg2"]

$ cargo listargs arg1 arg2
# ["/path/to/cargo-listargs", "listargs", "arg1", "arg2"]
```

Im Internet gibt es zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments bereits über 40 benutzerdefinierte Befehle, die von der Rust-Community erstellt wurden. [Rusg]

3 Programmierung mit Rust und Unterschiede zu C/C++

In diesem Kapitel werden auf Unterschiede bei der Programmierung zwischen den Sprachen Rust und C/C++ eingegangen.

3.1 Grundlagen

Zu den Grundlagen einer jeden Programmiersprache gehört der Umgang mit Variablen und Datentypen, und Kommentarfunktionen. Kontrollstrukturen definieren die Reihenfolge, in der Berechnungen durchgeführt werden.

3.1.1 Variablen und Mutabilität

In Rust sind Variablen standardmäßig unveränderlich. Das ist einer von vielen Faktoren, die Programmierer helfen sollen, den Code so zu schreiben, dass die Sicherheit und Parallelität von Rust genutzt werden. [KN18]

Ein Beispiel in Rust:

```
fn main() {  
    let x = 5;  
    println!("The value of x is {}", x);  
    x = 6;  
    println!("The value of x is {}", x);  
}
```

Beim Kompilieren erscheint folgende Fehlermeldung:

```
error[E0384]: cannot assign twice to immutable variable  
  'x'  
--> src/main.rs:4:5  
    |
```



```

2 |      let x = 5;
  |      -
  |      |
  |      first assignment to 'x'
  |      help: make this binding mutable: 'mut x'
3 |      println!("The value of x is {}", x);
4 |      x = 6;
  |      ^^^^^ cannot assign twice to immutable variable

```

Das Beispiel zeigt, wie der Compiler dem Programmierer hilft, Fehler im Programm zu finden. Die Fehlermeldung weist darauf hin, dass die Fehlerursache darin liegt, dass auf eine unveränderliche Variable nicht ein zweites Mal zugewiesen werden darf.

Bei C oder C++ ist jede Variablendefinition standardmäßig veränderlich, das heißt bei gleicher Vorgehensweise würde folgendes C-Programm ohne Fehlermeldungen übersetzen:

```

#include <stdio.h>

int main()
{
    int x = 5;
    printf("The value of x is %d\n", x);
    x = 6;
    printf("The value of x is %d\n", x);
    return 0;
}

```

Das Schlüsselwort `const` kann verwendet werden, um Variablen in C/C++ konstant zu definieren.

```
const int x = 5;
```

Wird in C versucht, eine konstant definierte Variable zu verändern, indem ein Wert mit einem nicht konstanten Typ verwendet wird, ist das Verhalten nicht definiert. [ISO, p. 87]

Das Verhalten in Folgendem Beispiel ist somit nicht definiert:

```
#include <stdio.h>
```

```
int main()  
{  
    const int x = 5;  
    printf("The value of x is %d\n", x);  
    *(int *)&x = 6;  
    printf("The value of x is %d\n", x);  
    return 0;  
}
```

Ergebnis mit dem Clang Compiler in der Version 7.0.1 auf einem Linux System (keine Warnungen beim Kompilieren):

```
The value of x is 5  
The value of x is 5
```

Ergebnis mit dem GCC Compiler in der Version 8.3.1 auf einem Linux System (auch hier keine Warnungen):

```
The value of x is 5  
The value of x is 6
```

3.1.2 Datentypen

Jede Variable in Rust hat einen bestimmten Datentyp. In Rust wird unterschieden zwischen skalaren und zusammengesetzten Typen. Rust ist eine statisch typisierte Sprache. Das bedeutet, dass die Typen aller Variablen zur Kompilierzeit bekannt sein müssen. Der Compiler kann normalerweise ableiten, welcher Typ verwendet soll, basierend auf dem Wert und wie er verwendet wird. In Fällen, in denen viele Typen möglich sind, z.B. wenn ein String in einen numerischen Typ konvertiert werden soll, muss eine Typanmerkung wie folgt hinzugefügt werden:

```
let guess: u32 = "42".parse().expect("Not a number!");
```

Ohne Angabe des Typs gibt der Rust-Compiler eine Fehlermeldung aus.

Integer Typ

Ein Integer ist ein Datentyp für ganze Zahlen. Der Typ u32 gibt an, dass es sich um eine vorzeichenlose Ganzzahl handelt, vorzeichenbehaftete Ganzzahltypen beginnen mit „i“ an Stelle von „u“. Die Zahl gibt an, wie viel Speicherplatz sie beansprucht. Folgende Tabelle zeigt die Integertypen von Rust und C:

| | Rust | | C/C++ | |
|---------|--------|----------|------------|-------------|
| Länge | signed | unsigned | signed | unsigned |
| 8-bit | i8 | u8 | __int8_t | __uint8_t |
| 16-bit | i16 | u16 | __int16_t | __uint16_t |
| 32-bit | i32 | u32 | __int32_t | __uint32_t |
| 64-bit | i64 | u64 | __int64_t | __uint64_t |
| 128-bit | i128 | u128 | __int128_t | __uint128_t |
| arch | isize | usize | | |

Tab. 3.1: Integertypen in Rust und C/C++

Mit `short` und `long` sollen verschieden lange ganzzahlige Werte zur Verfügung stehen, soweit dies praktikabel ist; `int` wird normalerweise die natürliche Größe für eine bestimmte Maschine sein. `short` belegt oft 16 Bits, `long` 32 Bits und `int` entweder 16 oder 32 Bits. Es steht jedem Übersetzer frei, sinnvolle Größen für seine Maschine zu wählen, nur mit den Einschränkungen, dass `short` und `int` wenigstens 16 Bits haben, `long` mindestens 32 Bits, und dass `short` nicht länger als `int` und `int` nicht länger als `long` sein darf. [KR90]

Beispiel:

```
printf("%zu\n", sizeof(char));      // 1: 8-bit
printf("%zu\n", sizeof(short));    // 2: 16-bit
printf("%zu\n", sizeof(int));      // 4: 32-bit
printf("%zu\n", sizeof(long));     // 8: 64-bit
```

In Rust hängen die Typen `isize` und `usize` von der Art des Computers ab, auf dem das Programm ausgeführt wird: 64 Bits bei 64-Bit-Architektur und 32 Bits bei 32-Bit-Architektur.

In Rust wird standardmäßig der Integertyp `i32` verwendet. Dieser Typ ist im Allgemeinen der schnellste Typ, auch auf 64-Bit-Systemen. Die Typen `isize` und `usize` können zum indexieren von Arrays verwendet werden.

Weitere Typen in Rust

- Fließkomma-Typen: `f32` und `f64` (Standard ist `f64`)
- Boolean: `bool` `true` / `false`
- Zeichentyp `char`: Unicode, das heißt chinesische, japanische und koreanische

Zeichen, Emoji, Leerzeichen mit Nullbreite sind möglich

Tupel

Ein Tupel ist ein allgemeiner Weg, um einige andere Werte mit verschiedenen Typen zu einem Verbindungstyp zu gruppieren. Tupel haben eine feste Länge, das heißt sie können nicht größer oder kleiner werden nachdem sie deklariert wurden.

```
fn main() {  
    let tup: (i32, f64, u8) = (500, 6.4, 1);  
    let (x, y, z) = tup;  
    println!("The value of y is: {}", y);  
    println!("The value of z is: {}", tup.2);  
}
```

Arrays

Eine andere Möglichkeit, eine Sammlung mehrerer Werte zu haben, besteht in einem Array. Im Gegensatz zu einem Tupel muss jedes Element eines Arrays denselben Typ haben. Arrays in Rust unterscheiden sich von Arrays in einigen anderen Sprachen, da Arrays in Rust eine feste Länge haben, wie Tupel.

In Rust werden die Werte, die in ein Array gehen, als durch Kommata getrennte Liste in eckigen Klammern geschrieben:

```
let a = [1, 2, 3, 4, 5];
```

Arrays sind nützlich, um Daten auf dem Stack statt auf dem Heap zuweisen zu können oder um sicherzustellen, dass immer eine feste Anzahl von Elementen vorhanden sind. Ein Array ist jedoch nicht so flexibel wie der Vektortyp. Ein Vektor ist ein ähnlicher Auflistungstyp, der von der Standardbibliothek bereitgestellt wird und dessen Größe vergrößert oder verkleinert werden darf.

Das Schreiben des Array-Typs erfolgt mit eckigen Klammern mit dem Typ der Element im Array gefolgt von einem Semikolon und die Anzahl der Elemente im Array:

```
let a: [i32; 5] = [1, 2, 3, 4, 5];
```

Eine ähnliche Schreibweise wird zum Initialisieren eines Arrays verwendet, das für jedes Element den selben Wert enthält. Dabei wird der Anfangswert, dann ein Semikolon und die Länge des Array angegeben:

```
let a = [3; 5];
```

Das Array mit dem Namen „a“ enthält 5 Elemente, die zunächst alle auf den Wert 3 gesetzt sind. Folgender Ausdruck erzeugt das gleiche Array:

```
let a = [3, 3, 3, 3, 3];
```

Ein Array ist ein einzelner Speicherbereich, der auf dem Stack reserviert ist. Es kann mithilfe der Indexierung wie folgt zugegriffen werden:

```
let a = [1, 2, 3, 4, 5];  
let first = a[0];  
let second = a[1];
```

Wird auf ein Element zugegriffen, das nicht innerhalb des Bereichs ist, beendet sich das Programm mit folgender Meldung:

```
thread 'main' panicked at 'index out of bounds: the len  
is 5 but the index is 10', src/main.rs:5:13  
note: Run with 'RUST_BACKTRACE=1' environment variable  
to display a backtrace.
```

Wenn in C oder C++ auf ein Element außerhalb des Bereichs eines Arrays zugegriffen wird, fällt dies beim Testen wesentlich weniger auf, da normalerweise das Programm weiter ausgeführt wird.

Das ist ein Beispiel der Sicherheitsprinzipien von Rust. Viele Low-Level-Programmiersprachen verzichten auf diesen Check, sodass ein ungültiger Speicherbereich indexiert werden kann. Rust verhindert dies durch sofortiges Beenden des Programms.

3.1.3 Funktionen

In Rust werden Funktionen und Variablennamen als Konvention in snake case geschrieben. Ein Programm, das eine Beispielfunktion enthält:

```
fn main() {  
    println!("Hello , world!");  
    another_function(42);  
}  
fn another_function(n: i32) {  
    println!("Another function with number {}. ", n);  
}
```

Eine Funktion mit Parameter enthält den Namen der Variable sowie den Typen mit einem Doppelpunkt getrennt. Bei mehreren Parametern werden diese durch Komma getrennt.

Bei Funktionen mit Rückgabewerten muss am Ende des Funktionskörpers der Rückgabewert als Expression ohne Semikolon stehen. Wenn eine Funktion früh beendet werden soll, kann ein `return` mit Rückgabewert benutzt werden. Der Rückgabotyp der Funktion muss mit einem Pfeil(`->`) angegeben werden.

```
fn main() {  
    let result = add(12, 34);  
    println!("The result is {}", result);  
}  
fn add(n1: i32, n2: i32) -> i32 {  
    n1 + n2  
}
```

3.1.4 Kontrollstrukturen

Kontrollstrukturen definieren die Reihenfolge, in der Berechnungen durchgeführt werden. Die Entscheidung, ob Code ausgeführt werden soll oder nicht, abhängig davon, ob eine Bedingung wahr ist, und die Entscheidung, wiederholt Code auszuführen, während eine Bedingung wahr ist, sind grundlegende Bausteine in den meisten Programmiersprachen. Die häufigsten Konstrukte, mit denen der Ausführungsfluss von Rust-Code gesteuert werden kann, sind `if`-Ausdrücke und -Schleifen.

`if`-Anweisungen

Mit `if-else`-Anweisungen werden Entscheidungen formuliert. Der `else`-Teil ist optional. Beispiel:

```
if number < 5 {  
    println!("condition was true");  
} else {  
    println!("condition was false");  
}
```

Diese Anweisungen sind syntaktisch wie in C oder C++, mit dem Unterschied, dass keine Klammern bei der Expression benötigt werden.

In Rust muss der Typ der Expression ein Boolean sein. Folgendes Programm wird also nicht übersetzt:

```
fn main() {  
    let number = 3;  
    if number {                               // type must be bool  
        println!("number was three");  
    }  
}
```

C und C++ prüfen bei einer if-Anweisung mit einem Integer Wert nur, ob dieser den Wert 0 hat. Da in Rust ein Boolean Typ benötigt wird, muss das Programm umgeschrieben werden:

```
fn main() {  
    let number = 3;  
    if number != 0 {  
        println!("number was something other than 0");  
    }  
}
```

Mehrere Bedingungen können auch in Rust in einer else if-Anweisung behandelt werden:

```
let number = 6;  
  
if number % 4 == 0 {  
    println!("number is divisible by 4");  
} else if number % 3 == 0 {  
    println!("number is divisible by 3");  
} else if number % 2 == 0 {  
    println!("number is divisible by 2");  
} else {  
    println!("number is not divisible by 4, 3, or 2");  
}
```

In Rust ist die if-Anweisung eine Expression, somit kann es verwendet werden, um z.B. Werte von Variablen zu definieren:

```
let condition = true;  
let number = if condition {
```

```
    5
} else {
    6
};
```

Da Rust eine statisch typisierte Sprache ist, muss der Typ beim Kompilieren bekannt sein. Das heißt, dass bei letzteren `if`-Anweisung der Typ einheitlich sein muss. Im letzten Beispiel war `number` vom Typ `i32`.

Schleifen

Rust hat drei Arten von Schleifen: `loop`, `while` und `for`.

Loop-Schleifen führen Code so oft aus, bis sie explizit gestoppt werden mit dem Schlüsselwort `break`. Schleifen können in Rust auch als Expression verwendet werden, wenn an dem `break` ein Wert angefügt wird:

```
fn main() {
    let mut counter = 0;
    let result = loop {
        counter += 1;
        if counter == 10 {
            break counter * 2;    // loop returning 20
        }
    };
    println!("The result is {}", result);
}
```

`while`-Schleifen gibt es auch in C und C++. Sie funktionieren auch in Rust entsprechend.

```
fn main() {
    let a = [10, 20, 30, 40, 50];
    let mut index = 0;
    while index < 5 {
        println!("the value is: {}", a[index]);
        index = index + 1;
    }
}
```


Das Programm gibt alle Werte aus dem Array aus. Alternativ kann hier mit einer for-Schleife gearbeitet werden. For-Schleifen funktionieren in Rust anders als in C oder C++, sie gleichen eher einer for-each-Schleife aus Java. Das heißt, dass der Code für jedes Element aus einer Sammlung einmal ausgeführt wird.

```
fn main() {  
    let a = [10, 20, 30, 40, 50];  
    for element in a.iter() {  
        println!("the value is: {}", element);  
    }  
}
```

Mit for-Schleifen kann in Rust die Sicherheit des Codes erhöht werden, da dadurch Zugriffe außerhalb eines Arrays verhindert werden.

3.2 Ownership

Ownership ist ein einzigartiges Merkmal von Rust. Es ermöglicht Speichersicherheit zur Kompilierzeit ohne die Notwendigkeit eines Garbage Collectors. Daher ist es wichtig, das Ownership-Prinzip als Programmierer zu verstehen. In diesem Kapitel wird Ownership und damit zusammenhängende Eigenschaften wie Borrowing, Slices und wie Rust Daten im Arbeitsspeicher ablegt beschrieben.

3.2.1 Funktionsweise von Ownership

Alle Computerprogramme müssen Arbeitsspeichermanagement betreiben. Manche Sprachen benutzen einen Garbage Collector, welcher während der Programmausführung nach nicht mehr benutzten Speicher sucht und diesen frei gibt. In anderen Sprachen muss der Programmierer explizit Speicher zuweisen und freigeben. Rust geht anders vor: Speicher wird durch ein System von Besitz und einen Satz an Regeln gestützt, welches der Compiler zur Kompilierzeit überprüft, sodass das Programm zur Laufzeit nicht gebremst wird.

Regeln

- Jeder Wert in Rust hat eine Variable, die als Eigentümer bezeichnet wird.
- Es kann immer nur ein Besitzer gleichzeitig sein.

- Wenn der Besitzer den Gültigkeitsbereich verlässt, wird der Wert gelöscht.

Beispiel: String

Um die Eigentumsregeln zu veranschaulichen, ist ein komplexerer Datentyp notwendig als die, die in Unterabschnitt 3.1.2 behandelt wurden, denn diese werden auf dem Stack gespeichert. In diesem Beispiel sollen Daten, die auf dem Heap gespeichert werden, betrachtet werden um zu veranschaulichen, wie Rust weiß, wann diese Daten zu bereinigen sind. Hierfür wird im Folgenden der Typ `String` verwendet. Diese Aspekte gelten auch für andere komplexe Datentypen, die von der Standardbibliothek bereitgestellt werden.

Wenn ein Rust-Programm eine Eingabe von einem Benutzer speichern möchte, muss ein Datentyp verwendet werden, welche eine variable Länge haben kann. Einen solchen String kann man in Rust zum Beispiel mit der `from`-Funktion erstellen:

```
let mut s = String::from("hello");
s.push_str(", world!");           // appends a literal
println!("{}", s);               // 'hello , world!'
```

Um einen veränderlichen String zu erzeugen, muss Speicherplatz auf dem Heap zugewiesen werden, welcher zu Kompilierzeit unbekannt ist. Das heißt:

1. Speicherplatz muss vom Betriebssystem zur Laufzeit bereitgestellt werden.
2. Der Speicherplatz muss wieder freigegeben werden, wenn der String nicht mehr benötigt wird.

Der erste Teil wird manuell vom Programmierer initiiert, beim Aufruf von `String::from`.

Der zweite Teil geschieht automatisch (durch die Methode `drop`), sobald die Variable, die es besitzt, den Gültigkeitsbereich verlässt, zum Beispiel am Ende des Blocks.

```
{
    let s = String::from("hello");
    // s is valid from this point forward

    // doo stuff with s
}                                // this scope is now over, and s is
                                // no longer valid
```

In C++ wird dieses Muster der Freigabe von Ressourcen am Ende der Lebensdauer eines Elements manchmal als *Ressourcenbelegung ist Initialisierung* (*Resource Acquisition Is Initialization*, kurz *RAII*) bezeichnet. [Str15, p. 71]

Dieses Muster hat einen tiefgründigen Einfluss auf die Schreibweise von Rust-Code. Es mag einfach erscheinen, aber das Verhalten von Code kann in komplizierten Situationen unerwartet sein, wenn mehrere Variablen die Daten verwenden sollen, die auf dem Heap zugewiesen wurden.

Variablen und Daten: Move

Mehrere Variablen können in Rust auf unterschiedliche Weise mit denselben Daten interagieren. Ein Beispiel mit Integer:

```
let x = 5;
let y = x;
```

Hier wird der Wert 5 an die Variable `x` gebunden und anschließend eine Kopie von `x` an die Variable `y` gebunden. Denn Integer haben eine feste Größe im Speicher und können auf dem Stack gespeichert werden.

Beispiel mit String:

```
let s1 = String::from("hello");
let s2 = s1;
```

Dies sieht dem vorherigen Code sehr ähnlich, aber die Funktionsweise ist nicht dieselbe, denn Strings werden in Rust im Heap gespeichert.

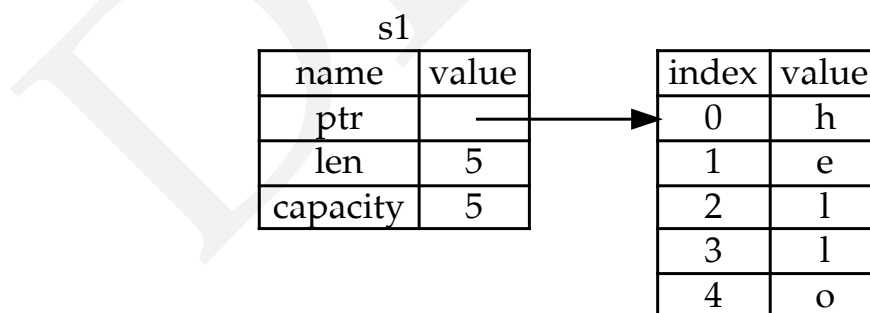


Abb. 3.1: Repräsentation des Speichers eines String

Abbildung 3.1 zeigt die Bestandteile von String. Er besteht aus drei Teilen, zu sehen in der linken Tabelle: einen Pointer auf den Speicher, der den String enthält, die Länge und die Kapazität. Diese Datengruppe wird auf dem Stack gespeichert.

Auf der rechten Seite befindet sich der Speicher auf dem Heap, der den Inhalt enthält.

Bei der Zuweisung von `s1` zu `s2` werden nur die String-Daten kopiert, das heißt der Pointer, die Länge und die Kapazität, welche sich auf dem Stack befinden. Die Daten des Heaps werden nicht kopiert.

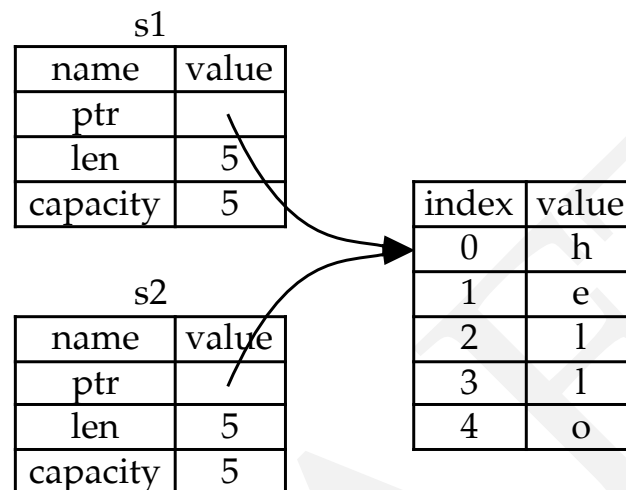


Abb. 3.2: Repräsentation des Speichers eines String: Kopie auf dem Stack

Wenn Rust eine vollständige Kopie gemacht hätte, würden die Daten wie auf Abbildung 3.3 aussehen. Und die Operation `s2 = s1` kann hinsichtlich der Laufzeitleistung sehr teuer sein, wenn die Daten auf dem Heap groß wären.

Sobald eine Variable außerhalb des Gültigkeitsbereichs gelangt, wird der Speicher aus dem Heap gelöscht. Aber da Abbildung 3.2 zwei Variablen zeigt, die auf den selben Speicherbereich im Heap zeigen, würde zwei mal der Speicherbereich freigegeben werden. Das ist bekannt als „double free“-Error und kann zu Speicherbeschädigungen und möglicherweise zu Sicherheitsanfälligkeiten führen.

Um die Speichersicherheit zu gewährleisten, hält Rust `s1` für ungültig und muss somit nichts löschen, wenn `s1` den Gültigkeitsbereich verlässt.

Das hat zu Folge, dass `s1` nicht mehr genutzt werden kann, nachdem es `s2` zugewiesen wurde:

```
let s1 = String::From("hello");
let s2 = s1;

println!("{}", world!, s1);
```

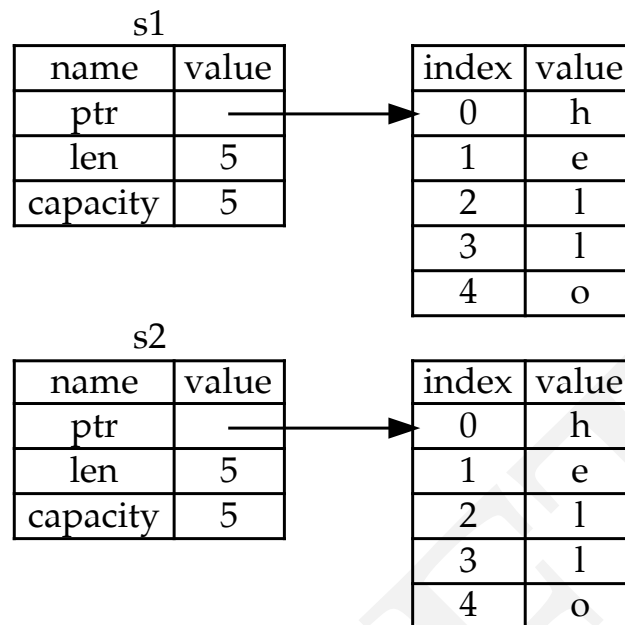


Abb. 3.3: Repräsentation des Speichers eines String: Vollständige Kopie

Daraus entsteht folgende Fehlermeldung:

```
error[E0382]: borrow of moved value: 's1'
--> src/main.rs:5:28
|
3 |     let s1 = String::from("hello");
|         -- move occurs because 's1' has type
|         'std::string::String', which does not implement the
|         'Copy' trait
4 |     let s2 = s1;
|               -- value moved here
5 |     println!("{}", world!, s1);
|                                   ^^ value borrowed here
after move
```

Diese Art von Kopieren, welche die erste Variable ungültig macht, nennt man in Rust „move“ (`s1` was *moved* into `s2`). Was also tatsächlich passiert, wird in Abbildung 3.4 dargestellt.

Somit gibt es keinen „double free“-Error, da der Speicher nur einmal freigegeben wird, wenn `s2` den Gültigkeitsbereich verlässt.

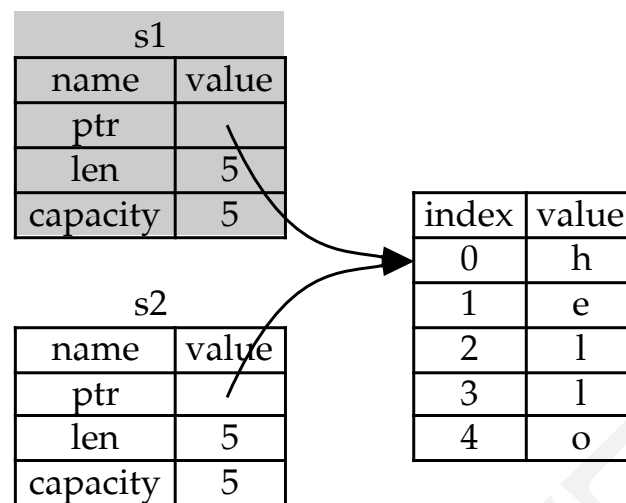


Abb. 3.4: Repräsentation des Speichers eines String: Moved

Variablen und Daten: Clone

Wenn eine vollständige Kopie erstellt werden soll, kann die Methode `clone` benutzt werden. Beispiel:

```
let s1 = String::from("hello");
let s2 = s1.clone();

println!("s1 = {}, s2 = {}", s1, s2);
```

Der Code kompiliert ohne Fehlermeldungen und erzeugt explizit das in Abbildung 3.3 gezeigte Verhalten, bei dem die Heap-Daten kopiert werden.

Stack-Only-Daten kopieren

Primitive Datentypen, die komplett auf dem Stack gespeichert sind, können nicht übergeben werden (Move nicht möglich), sie können nur vollständig kopiert werden. Darum würde folgender Code ohne Fehler übersetzen:

```
let x = 5;
let y = x;

println!("x = {}, y = {}", x, y);
```

Integer besitzen eine feste Speichergröße zur Kompilierzeit. Es macht keinen Unterschied, sie mit `clone` zu kopieren. Wenn ein Typ den `Copy-Trait` besitzt, kann

die erste Variable nach der Zuweisung weiter verwendet werden. In der Regel kann jede Gruppe einfacher Skalarwerte über den Stack vollständig kopiert werden. Einige der Typen sind:

- Alle Integer-Typen, z.B. `u32`
- Boolean-Typ, `bool` mit den Werten `true` und `false`
- Alle Fließkommazahlen wie z.B. `f64`
- Zeichentyp `char`
- Tupel, wenn sie nur Typen beinhalten, die den `Copy-Trait` implementieren z.B. `(i32, i32)`, jedoch nicht `(i32, String)`

Ownership und Funktionen

Die Semantik für die Übergabe eines Wertes an eine Funktion ähnelt derjenigen, die einer Variablen einen Wert zuweist. Das Übergeben einer Variablen an einer Funktion wird genauso wie die Zuweisung verschoben oder kopiert. Folgendes Programm enthält ein Beispiel mit einigen Anmerkungen, die zeigen, wo Variablen in den Geltungsbereich gelangen und aus diesem Bereich herauskommen:

```
fn main() {
    let s = String::from("hello"); // s comes
                                   // into scope
    takes_ownership(s);           // s's value moved into
                                   // the function...
    // ... and is no longer valid here

    let x = 5;                    // x comes into scope

    makes_copy(x);                // x would move into the function
                                   // but i32 is Copy, so it's okay
                                   // to still use x afterward

} // Here, x goes out of scope, then s. But because s's
  // value was moved, nothing special happens.
```

```
fn takes_ownership(some_string: String) {
    // some_string comes into scope

    println!("{}", some_string);
} // Here, some_string goes out of scope and 'drop' is
    // called. The backing memory is freed.
```

```
fn makes_copy(some_integer: i32) {
    // some_integer comes into scope

    println!("{}", some_integer);
} // Here, some_integer goes out of scope. Nothing
    // special happens.
```

Wenn `s` nach der Methode `takes_ownership` genutzt wird, würde Rust einen Fehler bei der Kompilierung ausgeben. Diese statischen Checks sollen Fehler im Programm verhindern.

Funktionen können auch Ownership durch einen Rückgabewert wieder zurückgeben:

```
fn main() {
    let s1 = gives_ownership();
    let s2 = takes_and_gives_back(s1);
    println!("{}", world!", s1); // error
    println!("{}", world!", s2); // this works
}

fn gives_ownership() -> String {
    let some_string = String::from("hello");
    some_string
}

fn takes_and_gives_back(a_string: String) -> String {
    a_string
}
```


3.2.2 Referenzen und Borrowing

Eine Funktion, welche die Länge eines String berechnet und die Ownership des verwendeten Strings zurückgibt, könnte wie folgt aussehen:

```
fn main() {
    let s1 = String::from("hello");
    let (s2, len) = calculate_length(s1);
    println!("The length of '{}' is {}.", s2, len);
}

fn calculate_length(s: String) -> (String, usize) {
    let length = s.len();
    (s, length)
}
```

Dies ist jedoch viel Aufwand für ein Konzept, das gebräuchlich sein sollte. Rust hat für dieses Konzept jedoch eine Funktion, genannt Referenzen.

So wird die `calculate_length` Funktion definiert und benutzt, die eine Referenz auf ein Objekt als Parameter enthält, anstatt die Ownership zu übernehmen:

```
fn main() {
    let s1 = String::from("hello");
    let len = calculate_length(&s1);
    println!("The length of '{}' is {}.", s1, len);
}

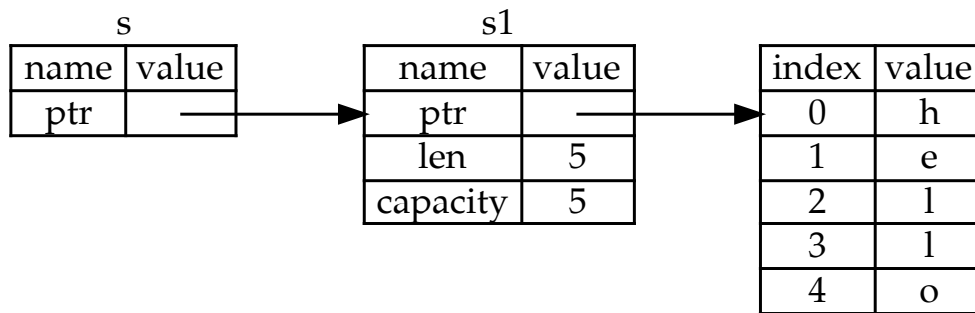
fn calculate_length(s: &String) -> usize {
    s.len()
}
```

Der gesamte Tupelcode in der Variablendeklaration und der Funktionsrückgabewert ist weg. Außerdem wird `&s1` in `calculate_length` und in seiner Definition `&String` anstelle von `String` benutzt.

Diese Und-Zeichen sind Referenzen und ermöglichen, auf einen bestimmten Wert zu verweisen, ohne dessen Ownership zu beanspruchen. Abbildung 3.5 zeigt ein Diagramm.

Mit der `&s1` Syntax kann eine Referenz erstellt werden, die sich auf den Wert von `s1` bezieht, ihm aber nicht gehört. Der Wert den er verweist, wird nicht gelöscht, wenn die Referenz den Gültigkeitsbereich verlässt.

Ebenso verwendet die Signatur der Funktion `&` um anzuzeigen, dass der Typ des Parameters eine Referenz ist.

Abb. 3.5: Diagramm von `&String s` Zeiger auf `String s1`

Das Gegenteil der Referenzierung mit `&` ist die Dereferenzierung, die mit dem Dereferenzierungsoperator `*` erzielt wird.

Der Gültigkeitsbereich von `s` ist der eines normalen Funktionsparameters. Jedoch wird der Wert nicht aus dem Speicher gelöscht, da keine Ownership an `s` übergeben wurde, weshalb auch keine zurückgegeben werden muss. Referenzen als Funktionsparameter wird in Rust „Borrowing“ genannt. Wie in der realen Welt kann Eigentum an andere ausgeliehen werden und wenn die andere Person es nicht mehr braucht, kann diese es wieder an den Eigentümer zurückgegeben.

Genauso wie Variablen standardmäßig unveränderlich sind, gilt dies auch für Referenzen. Es kann nichts verändert werden, auf das nur referenziert wird. Folgender Code würde also nicht funktionieren:

```
fn main() {
    let s = String::from("hello");
    change(&s);
}
fn change(some_string: &String) {
    some_string.push_str(", world"); // error
}
```

Veränderbare Referenzen

Kleine Veränderungen beheben den Fehler aus dem letzten Programm:

```
fn main() {
    let mut s = String::from("hello");
    change(&mut s);
}
```

```
fn change(some_string: &mut String) {  
    some_string.push_str(", world"); // works now  
}
```

Die Variable `s` muss veränderbar sein mit `mut`. Es wird nun eine veränderbare Referenz übergeben und die Funktion erwartet auch eine entsprechende Referenz mit `some_string: &mut String`.

Veränderbare Referenzen haben eine große Einschränkung: Sie können nur eine veränderbare Referenz auf ein bestimmtes Datenelement in einem bestimmten Bereich haben. Folgender Code würde also nicht funktionieren:

```
let mut s = String::from("hello");  
let r1 = &mut s;  
let r2 = &mut s;  
println!("{}", r1, r2);
```

Diese Einschränkung erlaubt kontrollierte Veränderbarkeit von Variablen. Mithilfe dieser Regel verhindert Rust sogenannte „data races“. Diese ähneln sich einer „race condition“ und tritt auf, wenn drei Verhaltensweisen auftreten:

- Zwei oder mehr Pointer greifen zeitgleich auf den selben Speicherbereich zu.
- Mindestens einer der Pointer schreiben.
- Kein Mechanismus wird verwendet, um den Zugriff der Daten zu synchronisieren.

Diese „data races“ können undefiniertes Verhalten auslösen und sind schwer festzustellen und zu beheben. In Rust-Programmen gibt es dieses Problem nicht, da gefährdeter Code nicht ohne Fehler kompiliert.

Es dürfen auch keine Kombinationen aus veränderbaren und unveränderbaren Referenzen erstellt werden. Folgender Code führt zu einem Compilerfehler:

```
let mut s = String::from("hello");  
let r1 = &s; // no problem  
let r2 = &s; // no problem  
let r3 = &mut s; // big problem  
println!("{}", r1, r2, r3);
```

Bei unveränderlichen Referenzen sollten man nicht damit rechnen müssen, dass sich der Wert dahinter verändern kann. Mehrere unveränderbare Referenzen sind in Ordnung, da mehrere lesende Zugriffe sich untereinander nicht beeinflussen.

„Dangling References“

In Programmiersprachen mit Pointer kann es vorkommen, dass Pointer auf einen Bereich im Speicher zeigen, der bereits freigegeben wurde, sogenannte „dangling pointer“. In Rust garantiert der Compiler, dass Referenzen immer auf einen gültigen Bereich zeigen. Folgender Code wird also beim Kompilieren eine Fehlermeldung ausgeben:

```
fn main() {  
    let reference_to_nothing = dangle();  
}  
fn dangle() -> &String {  
    let s = String::from("hello");  
    &s  
}
```

Der String `s` wird nach der Funktion `dangle` aus dem Speicher gelöscht. Die Referenz, die zurückgegeben wird, würde auf einen ungültigen Bereich im Speicher zeigen. Der Compiler erkennt, dass der Rückgabewert eine „dangling reference“ ist und gibt eine Fehlermeldung aus. Es sollte die Ownership von `s` zurückgegeben werden, damit der String im Speicher bleibt:

```
fn no_dangle() -> String {  
    let s = String::from("hello");  
    s  
}
```

Regeln: Referenzen

- Es kann entweder nur eine veränderbare oder eine beliebige Anzahl an unveränderlichen Referenzen benutzt werden.
- Referenzen müssen immer gültig sein.

3.2.3 Slice Typ

Ein weiterer Datentyp, welcher keine Ownership annimmt sind Slices. Sie wird benutzt um eine zusammenhängende Folge von Elementen einer Sammlung anstatt auf die gesamte Sammlung zu verweisen.

String Slice

Wenn ein bestimmter Teil eines String referenziert werden soll, würde man in anderen Sprachen den Index berechnen, an welcher Stelle z.B. ein neues Wort beginnt. Wenn der String jedoch vom Speicher gelöscht wird, existiert der berechnete Index immer noch, da er nach der Berechnung unabhängig geworden ist.

In Rust kann mit sogenannten „string slices“ ein bestimmter Bereich eines Strings referenziert werden.

```
let s = String::from("hello world");
let hello = &s[0..5];
let world = &s[6..11];
```

Die Syntax der Klammern beschreibt `[starting_index..ending_index]`. Intern wird die Startposition und Länge gespeichert. Die Länge ergibt sich aus der Differenz aus `starting_index` und `ending_index`. Die Variable `world` ist ein Pointer auf das siebte Byte von `s` mit einer Länge von 5. Abbildung 3.6 zeigt ein Diagramm des Speichers.

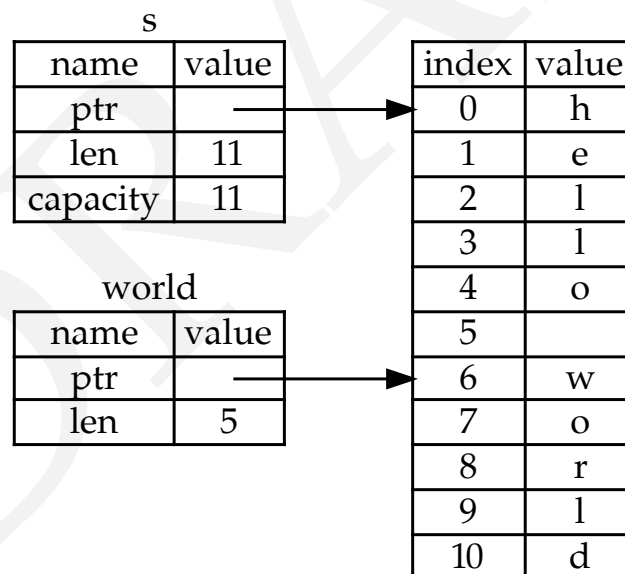


Abb. 3.6: Diagramm eines String Slice

Dadurch entsteht eine Abhängigkeit, welche es Rust erlaubt, bereits beim Kompilieren festzustellen, ob String Slices auf einen gültigen Bereich zeigen. So wird der Code weniger anfällig für Laufzeitfehler.

```
let s = "Hello , world!";
```

Der Typ von `s` ist `&str`: Es ist ein String Slice, welcher auf einen bestimmten Punkt zeigt. Deshalb sind String-Literale unveränderlich. `&str` ist eine unveränderliche Referenz.

Andere Slices

String Slices sind spezifisch für Strings. Es gibt auch einen allgemeineren Slice-Typ. Genauso wie bei Strings, können auch Teile von Arrays referenziert werden:

```
let a = [1, 2, 3, 4, 5];  
let slice = &a[1..3];
```

Der Typ von `slice` ist `&[i32]`. Auch hier wird ein Pointer auf das erste Element gespeichert sowie die Länge des Slice.

Literaturverzeichnis

- [ISO] ISO. N2176 — *International Standard ISO/IEC 9899:2017 Programming languages — C*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [KN18] Steve Klabnik and Carol Nichols. *The Rust Programming Language*. No Starch Press, 2018.
- [KR90] Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie. *Programmieren in C*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2 edition, 1990.
- [Moz] Mozilla Foundation. Rust language. <https://research.mozilla.org/rust/>.
- [Rusa] Rust Project Developers. The cargo book. <https://doc.rust-lang.org/cargo/>.
- [Rusb] Rust Project Developers. The edition guide. <https://doc.rust-lang.org/stable/edition-guide/>.
- [Rusc] Rust Project Developers. Guide to rustc development. <https://rust-lang.github.io/rustc-guide/>.
- [Rusd] Rust Project Developers. Rust and webassembly. <https://rustwasm.github.io/docs/book/>.
- [Ruse] Rust Project Developers. Rust by example. <https://doc.rust-lang.org/stable/rust-by-example/>.
- [Rusf] Rust Project Developers. The rustc book. <https://doc.rust-lang.org/rustc/index.html>.
- [Rusg] Rust Project Developers. Third party cargo subcommands. <https://github.com/rust-lang/cargo/wiki/Third-party-cargo-subcommands>.
- [Str15] Bjarne Stroustrup. *Die C++-Programmiersprache*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Dateibaum eines Rust Projekts | 6 |
| 3.1 | Repräsentation des Speichers eines String | 23 |
| 3.2 | Repräsentation des Speichers eines String: Kopie auf dem Stack . . . | 24 |
| 3.3 | Repräsentation des Speichers eines String: Vollständige Kopie | 25 |
| 3.4 | Repräsentation des Speichers eines String: Moved | 26 |
| 3.5 | Diagramm von <code>&String s</code> Zeiger auf <code>String s1</code> | 30 |
| 3.6 | Diagramm eines String Slice | 33 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Integertypen in Rust und C/C++ | 15 |
|-----|--|----|