
Zig Basics

**Systemprogrammierung für das 21.
Jahrhundert**

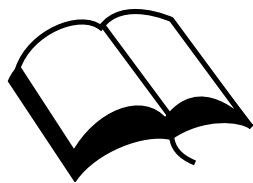
David Pierre Sugar

Zig Basics

David Pierre Sugar

Copyright © 2024 David Pierre Sugar. All rights reserved.

Munich, Germany 2024: First Edition



Self Publishers Worldwide
Seattle San Francisco New York
London Paris Rome Beijing Barcelona

für Franziska

Inhaltsverzeichnis

Zig Crash Course	1
Zig installieren	1
Funktionen	5
Unit Tests	7
Comptime	7
Kommandozeilenargumente	11
Parallelität	11
C/C++ Build System	11
Bibliothek	11
Verwendung der Bibliothek	16
Standard Typen	17
Ganzzahlen (Integer)	17
Fließkommazahlen (Float)	19
Container	20
Struct	20
Enum	21
Union	21
Speicherverwaltung	23
Grundlagen	23
Lifetimes	26
Static Memory	26
Automatic Memory	27
Dynamic Memory	30
Häufige Fehler	33
Speicherzugriffsfehler (Access Errors)	33
Buffer Overflow/ Over-Read	33
Invalid Page Fault	34
Zusammenfassung	34

Vorwort

Zig ist eine Sprache geeignet für die Systemprogrammierung.

TODO

Zig als Systemprogrammiersprache ist unter anderem geeignet für:

- Kryptographie
- Mikrokontrollerprogrammierung
- Dateisysteme
- Datenbanken
- Betriebssysteme
- Treiber
- Spiele
- Simulationen
- Die Entwicklung von höheren Programmiersprachen

Insbesondere Startups, aber auch große Unternehmen, haben in den letzten Jahren auf Zig als Programmiersprache und Build-System gesetzt. Darunter Uber¹, Tigerbeetle², und ZML³. Dies verwenden Zig in ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen, darunter Datenbanken und maschinellem Lernen.

In der Welt der Systemprogrammiersprachen reiht sich Zig neben C ein und verzichtet auf viele Konzepte die andere Programmiersprachen überkomplex machen, darunter Vererbung. Damit ist Zig erfrischend übersichtlich, was vor allem Einsteigern zu gute kommt, bietet jedoch auch viele Verbesserungen gegenüber C.

Zielgruppe

Falls Sie bereits Erfahrung mit C oder einer anderen systemnahen Programmiersprache haben und mehr über Zig erfahren wollen ist diese Buch für Sie. Wenn Sie Erfahrung mit einer höheren Programmiersprache haben und mehr über Systemprogrammierung und Zig erfahren wollen ist dieses Buch ebenfalls für Sie.

¹<https://www.uber.com/en-DE/blog/bootstrapping-ubers-infrastructure-on-arm64-with-zig/>

²<https://tigerbeetle.com/>

³<https://zml.ai/>

Grundsätzlich empfehle ich Ihnen parallel zum lesen dieses Buches eigene Programmierprojekte zu realisieren um praktische Erfahrung mit der Sprache zu sammeln. Beginnen Sie mit etwas einfachem, vertrauten und steigern Sie sich, sobald Sie ein Gefühl für die Sprache bekommen haben. Sie werden merken, dass die Grundlagen in Zig schnell zu erlernen sind, es gibt jedoch auch nach einiger Zeit viel zu entdecken. Sollten Sie etwas Inspiration benötigen, so kann Ihnen Project Euler⁴ eventuell weiterhelfen.

Wichtig zu erwähnen ist, dass Zig derzeit noch nicht die Version 1.0 erreicht hat, d.h. die Sprache und damit auch die Standardbibliothek werden sich in Zukunft noch ändern. Damit kann es sein, dass bestimmte Beispiele mit einer zukünftigen Zig-Compiler-Version nicht mehr compilieren. Sollte das für Sie ein Dealbreaker sein, so empfehle ich Ihnen die Finger von diesem Buch zu lassen und zu warten bis Zig Version 1.0 veröffentlicht wurde.

Voraussetzungen

Die Zig-Version, die in diesem Buch verwendet wird ist 0.13.0⁵. Je nachdem wann Sie dieses Buch lesen kann es sein, dass diese Version nicht mehr aktuell ist. Bei Abweichungen von der angegebenen Version ist nicht garantiert, dass die in diesem Buch abgebildeten Beispiele compilieren.

Zwar sind die meisten Konzepte und Beispiele in diesem Buch unabhängig von einem bestimmten Betriebssystem und Architektur, jedoch geht das Buch grundsätzlich von einem x86_64 Linux System aus. Dies wird relevant wenn auf Assembler, Calling-Conventions und ähnliche Konzepte Bezug genommen wird, da diese immer sowohl von der Architektur als auch dem Betriebssystem abhängen. Sollte Ihr Computer eine dieser Anforderungen nicht erfüllen, so empfiehlt es sich ggf. eine virtuelle Maschine zu verwenden⁶.

Struktur

Die ersten drei Kapitel beschäftigen sich mit den Grundlagen der Programmiersprache Zig. Das erste Kapitel bietet anhand von Beispielen einen Überblick über die Sprache. Im zweiten Kapitel werden die grundlegenden Datentypen der Programmiersprache näher beleuchtet. In Kapitel drei wird der Leser in grundlegende Konzepte der Speicherverwaltung eingeführt, die für die korrekte und sichere Entwicklung von Anwendungen unabdingbar sind.

Im zweiten Abschnitt des Buches... TBD

Zig bietet für jede Compiler-Version zusätzliche Ressourcen zum Lernen der Sprache und als Referenz⁷, darunter die Language Reference und die Online-Dokumentation der Standardbibliothek. Diese können beim Entwickeln eigener Projekte aber auch beim nachvollziehen der Code-Beispiele eine große Hilfe darstellen.

⁴<https://projecteuler.net/about>

⁵<https://ziglang.org/download/>

⁶<https://ubuntu.com/tutorials/how-to-run-ubuntu-desktop-on-a-virtual-machine-using-virtualbox#1-overview>

⁷<https://ziglang.org/learn/>

Konventionen

Die folgenden Konventionen werden in diesem Buch eingehalten:

Italic: Markiert neue Begriffe, URLs, Email-Adressen, Dateinamen und -endungen.

Konstanter Abstand: Wird verwendet für Programmbeispiele, sowie zum benennen von Programmbausteinen, wie etwa Variablennamen oder Umgebungsvariablen.

Konstanter Abstand Fett: Zeigt Kommandos oder ändern, vom Nutzer zu tippenden, Text.



Ziggy markiert einen Tipp bzw. einen Hinweis.

Code Beispiele

Die in diesem Buch abgebildeten Code-Beispiele finden sich auf Github unter `todo` zum Download.

Alle Beispiele können von Ihnen ohne Einschränkung verwendet werden. Sie brauchen die Autoren nicht explizit um Genehmigung fragen. Am Schluss geht es darum Ihnen zu helfen und nicht darum Ihnen Steine in den Weg zu legen.

Zitierungen würden uns freuen, sind jedoch keinesfalls notwendig. Ein Zitat umfasst gewöhnlich Titel, Autor, Publizist und ISBN. In diesem Fall wäre dies: „Zig Basics by David Pierre Sugar“.

Sollten Sie Fehler im Buch oder Code finden, die nicht auf unterschiedliche Compiler-Versionen zurückzuführen sind können Sie uns mit einem Verbesserungsvorschlag kontaktieren.

Kontakt

Bei Fragen zu diesem Buch kontaktieren Sie bitte `david (at) thesugar.de`.

Danksagung

TDB

Kapitel 1

Zig Crash Course

In diesem Kapitel schauen wir uns einige kleine Zig Programme an, damit Sie ein Gespür für die Programmiersprache bekommen. Machen Sie sich nicht zu viele Sorgen wenn Sie nicht alles sofort verstehen, in den folgenden Kapiteln werden wir uns mit den hier vorkommenden Konzept noch näher beschäftigen. Wichtig ist, dass Sie diese Kapitel nicht nur lesen sondern die Beispiel auch ausführen, um das meiste aus diesem Kapitel herauszuholen.

Zig installieren

Um Zig zu installieren besuchen Sie die Seite <https://ziglang.org> und folgen den Instruktionen unter „GET STARTED“⁸.

Die Installation ist unter allen Betriebssystemen relativ einfach durchzuführen. In der Download Sektion⁹ finden Sie vorkompilierte Zig-Compiler für die gängigsten Betriebssysteme, darunter Linux, macOS und Windows, sowie Architekturen.

Unter Linux können Sie mit dem Befehl **uname -a** Ihre Architektur bestimmen. In meinem Fall ist dies X86_64.

```
$ uname -a  
Linux ... x86_64 x86_64 x86_64 GNU/Linux
```

Die Beispiele in diesem Buch basieren auf der Zig-Version 0.13.0, d.h. um den entsprechenden Compiler auf meinem Linux system zu installieren würde ich die Datei *zig-linux-x86_64-0.13.0.tar.xz* aus der Download-Sektion herunterladen.

⁸<https://ziglang.org/learn/getting-started/>

⁹<https://ziglang.org/download/>

0.13.0

- [2024-06-07](#)
- [Release Notes](#)
- [Language Reference](#)
- [Standard Library Documentation](#)

OS	Arch	Filename	Signature	Size
Source		zig-0.13.0.tar.xz	minisig	16.4MiB
		zig-bootstrap-0.13.0.tar.xz	minisig	44.3MiB
Windows	x86_64	zig-windows-x86_64-0.13.0.zip	minisig	75.5MiB
	x86	zig-windows-x86-0.13.0.zip	minisig	79.4MiB
	aarch64	zig-windows-aarch64-0.13.0.zip	minisig	71.6MiB
macOS	aarch64	zig-macos-aarch64-0.13.0.tar.xz	minisig	42.8MiB
	x86_64	zig-macos-x86_64-0.13.0.tar.xz	minisig	46.6MiB
Linux	x86_64	zig-linux-x86_64-0.13.0.tar.xz	minisig	44.9MiB
	x86	zig-linux-x86-0.13.0.tar.xz	minisig	49.7MiB
	aarch64	zig-linux-aarch64-0.13.0.tar.xz	minisig	41.1MiB
	armv7a	zig-linux-armv7a-0.13.0.tar.xz	minisig	42.0MiB
	riscv64	zig-linux-riscv64-0.13.0.tar.xz	minisig	43.4MiB
	powerpc64le	zig-linux-powerpc64le-0.13.0.tar.xz	minisig	44.4MiB
FreeBSD	x86_64	zig-freebsd-x86_64-0.13.0.tar.xz	minisig	45.0MiB

Abbildung 1: Download Seite von <https://ziglang.org/download/>

Mit dem `tar` Kommandozeilenwerkzeug kann das heruntergeladene Archiv danach entpackt werden.

```
$ tar -xf zig-linux-x86_64-0.13.0.tar.xz
```

Der entpackte Ordner enthält die Folgenden Dateien.

```
$ ls zig-linux-x86_64-0.13.0
doc lib LICENSE README.md zig
```

- **doc:** Die Referenzdokumentation der Sprache. Diese ist auch online, unter <https://ziglang.org/documentation/0.13.0/>, zu finden und enthält einen Überblick über die gesamte Sprache. Ich empfehle Ihnen ergänzend zu diesem Buch die Dokumentation zu Rate zu ziehen.
- **lib:** Enthält alle benötigten Bibliotheken, inklusive der Standardbibliothek. Die Standardbibliothek enthält viel nützliche Programmbausteine, darunter geläufige Datenstrukturen, einen JSON-Parser, Kompressionsalgorithmen, kryptographische Algorithmen und Protokolle und vieles mehr. Eine Dokumentation der gesamten Standardbibliothek findet sich online unter <https://ziglang.org/documentation/0.13.0/std/>.
- **zig:** Dies ist der Compiler, den wir im Laufe dieses Buchs exzessiv verwenden werden.

Um den Zig-Compiler nach dem Entpacken auf einem Linux System zu installieren, können wir diesen nach `/usr/local/bin` verschieben.

```
$ sudo mv zig-linux-x86_64-0.13.0 /usr/local/bin/zig-linux-x86_64-0.13.0
```

Danach erweitern wir die \$PATH Umgebungsvariable um den Pfad zu unserem Zig-Compiler. Dies können wir in der Datei ~/.profile oder auch ~/.bashrc machen¹⁰.

```
# Sample .bashrc for SuSE Linux
```

```
# ...
```

```
export PATH="$PATH:/usr/local/bin/zig-linux-x86_64-0.13.0"
```

Nach Änderung der Konfigurationsdatei muss diese neu geladen werden. Dies kann entweder durch das öffnen eines neuen Terminalfensters erfolgen oder wir führen im derzeitigen Terminal das Kommando **source .bashrc** in unserem Home-Verzeichnis aus. Danach können wir zum überprüfen, ob alles korrekt installiert wurde, das Zig-Zen auf der Kommandozeile ausgeben lassen. Das Zig-Zen kann als die Kernprinzipien der Sprache und ihrer Community angesehen werden, wobei man dazu sagen muss, dass es nicht „die eine“ Community gibt.

```
$ source ~/.bashrc
```

```
$ zig zen
```

- * Communicate intent precisely.
- * Edge cases matter.
- * Favor reading code over writing code.
- * Only one obvious way to do things.
- * Runtime crashes are better than bugs.
- * Compile errors are better than runtime crashes.
- * Incremental improvements.
- * Avoid local maximums.
- * Reduce the amount one must remember.
- * Focus on code rather than style.
- * Resource allocation may fail;
 resource deallocation must succeed.
- * Memory is a resource.
- * Together we serve the users.

Mit dem Kommando **zig help** lässt sich ein Hilfetext auf der Kommandozeile anzeigen, der die zu Verfügung stehenden Kommandos auflistet.

Praktisch ist, dass Zig für uns ein neues Projekt, inklusive Standardkonfiguration, anlegen kann.

```
$ mkdir hello && cd hello
```

```
$ zig init
```

```
info: created build.zig
```

```
info: created build.zig.zon
```

```
info: created src/main.zig
```

```
info: created src/root.zig
```

```
info: see `zig build --help` for a menu of options
```

Das Kommando initialisiert den gegebenen Ordner mit Template-Dateien, durch die sich sowohl eine Executable, als auch eine Bibliothek bauen lassen. Schaut man sich die erzeugten Dateien an so sieht man, dass Zig eine Datei namens *build.zig* erzeugt hat. Bei dieser handelt es sich um

¹⁰Je nach verwendetem Terminal kann die Konfigurationsdatei auch anders heißen.

die Konfigurationsdatei des Projekts. Sie beschreibt aus welchen Dateien eine Executable bzw. Bibliothek gebaut werden soll und welche Abhängigkeiten (zu anderen Bibliotheken) diese besitzen. Ein bemerkenswertes Detail ist dabei, dass *build.zig* selbst ein Zig Programm ist, welches in diesem Fall zur Compile-Zeit ausgeführt wird um die eigentliche Anwendung zu bauen.

Die Datei *build.zig.zon* enthält weitere Informationen über das Projekt, darunter dessen Namen, die Versionsnummer, sowie mögliche Dependencies. Dependencies können dabei lokal vorliegen und über einen relativen Pfad angegeben oder von einer Online-Quelle, wie etwa Github, bezogen werden. Die Endung der Datei steht im übrigen für Zig Object Notation (ZON), eine Art Konfigurationssprache für Zig, die derzeit, genauso wie Zig selbst, noch nicht final ist.

Schauen wir in *src/main.zig*, so sehen wir das Zig für uns ein kleines Programm geschrieben hat.

```
const std = @import("std");

pub fn main() !void {
    std.debug.print("All your {s} are belong to us.\n", .{"codebase"});

    const stdout_file = std.io.getStdOut().writer();
    var bw = std.io.bufferedWriter(stdout_file);
    const stdout = bw.writer();

    try stdout.print("Run `zig build test` to run the tests.\n", .{});

    try bw.flush(); // don't forget to flush!
}
```

Der Code kann auf den ersten Blick überwältigend wirken, schauen wir ihn uns deswegen Stück für Stück an.

```
const std = @import("std");
```

Mit der `@import()` Funktion importieren wir die Standardbibliothek (`std`) und binden diese an eine Konstante mit dem selben Namen. Die Standardbibliothek ist eine Ansammlung von nützlichen Funktionen und Datentypen, die während der Entwicklung von Anwendungen häufiger zum Einsatz kommen und deswegen vom Zig zur Verfügung gestellt werden. Die Funktion `@import()` wird nicht nur zum importieren der Standardbibliothek verwendet, sondern auch um auf Module und andere, zu einem Projekt gehörende, Quelldateien zuzugreifen.

Nach der Definition der Konstante `std` beginnt die `main` Funktion:

```
pub fn main() !void {
```

Unsere `main` Funktion beginnt, wie alle Funktionen, mit `fn` und dem Namen der Funktion. Sie gibt keinen Wert zurück, aus diesem Grund folgt auf die leere Parameterliste `()` der Rückgabetypp `void`. Das Ausrufezeichen `!` weist darauf hin, das die Funktion einen Fehler zurückgeben kann.

```
std.debug.print("All your {s} are belong to us.\n", .{"codebase"});
```

Als erstes gibt die `main` Funktion einen String über die Debugausgabe auf der Kommandozeile aus. Die Funktion `print` erwartet dabei einen Format-String, der mit Platzhaltern (z.B. `{s}`) angereichert werden kann, sowie eine Liste an Ausdrücken (z.B. `.{"codebase"}`) deren Werte in

den String eingefügt werden sollen. Der Platzhalter {s} gibt z.B. an, dass an der gegebenen Stelle ein String eingefügt werden soll. Neben s gibt es unter anderem noch d für Ganzzahlen und any für beliebige Werte.

```
const stdout_file = std.io.getStdOut().writer();
var bw = std.io.bufferedWriter(stdout_file);
const stdout = bw.writer();
```

Via `std.io` können wir mit `getStdIn()`, `getStdOut()` und `getStdErr()` auf `stdin`, `stdout` und `stderr` zugreifen. Alle drei Funktionen geben jeweils ein Objekt vom Typ `File` zurück. Die Funktion `writer()` welche auf der `stdout`-Datei aufgerufen wird, gibt einen `Writer` zurück. Ein `Writer` ist ein Wrapper um ein beliebiges Datenobjekt (z.B. eine offene Datei, ein Array, ...) und stellt eine standardisierte Interface zur Verfügung um Daten zu serialisieren. In unserem Fall wird der `stdout_file` `Writer` wiederum in einen `BufferedWriter` gewrapped, welcher nicht bei jedem einzelnen Schreibvorgang auf die Datei `stdout` zugreift, sondern erst wenn genug Daten geschrieben wurden bzw. wenn die Funktion `flush()` aufgerufen wird. Die Konstante `stdout` ist also ein `Writer` der einen `Writer` umschließt, der eine Datei umschließt, in die schlussendlich geschrieben werden soll.

```
try stdout.print("Run `zig build test` to run the tests.\n", .{});
```

Der `BufferedWriter` (`stdout`) wird verwendet um (indirekt) den String „Run zig build test to run the tests.“ nach `stdout` (standardmäßig die Kommandozeile) zu schreiben. Da diese Schreiboperation fehlschlagen kann wird vor den Ausdruck ein `try` gestellt. Damit wird ein potenzieller Fehler „nach oben“ propagiert, was im gegebenen Fall zu einem Programmabsturz führen würde, da `main` keine Funktion über sich besitzt. Als Alternative könnte mit einem `catch` Block der Fehler explizit abgefangen werden.

```
try bw.flush();
```

Um sicher zu gehen, dass auch alle Daten aus dem `BufferedWriter` tatsächlich geschrieben wurden, muss schlussendlich `flush()` aufgerufen werden.

Das von Zig vorbereitete „Hello, World“-Programm kann mit **zig build run**, von einem beliebigen Ordner innerhalb des Zig-Projekts, ausgeführt werden.

```
$ zig build run
All your codebase are belong to us.
Run `zig build test` to run the tests.
```

Im gegebenen Beispiel wurden zwei Schritte ausgeführt. Zuerst wurde der Zig-Compiler aufgerufen um das Programm in `src/main.zig` zu kompilieren und im zweiten Schritt wurde das Programm ausgeführt. Zig platziert dabei seine Kompilierten Anwendungen in `zig-out/bin` und Bibliotheken in `zig-out/lib`.

Funktionen

Zig's Grammatik ist sehr überschaubar und damit leicht zu erlernen. Diejenigen mit Erfahrung in anderen C ähnlichen Programmiersprachen wie C, C++, Java oder Rust sollten sich direkt Zuhause fühlen. Die unterhalb abgebildete Funktion berechnet den größten gemeinsamen Teiler (greatest common divisor) zweier Zahlen.

```
// chapter01/gcd.zig
fn gcd(n: u64, m: u64) u64 {
    return if (n == 0)
        m
    else if (m == 0)
        n
    else if (n < m)
        gcd(m, n)
    else
        gcd(m, n % m);
}
```

Das `fn` Schlüsselwort markiert den Beginn einer Funktion. Im gegebenen Beispiel definieren wir eine Funktion mit dem Name `gcd`, welche zwei Argumente `m` und `n`, jeweils vom Typ `u64`, erwartet. Nach der Liste an Argumenten in runden Klammern folgt der Typ des erwarteten Rückgabewertes. Da die Funktion den größten gemeinsamen Teiler zweier `u64` Ganzzahlen berechnet ist auch der Rückgabewert vom Typ `u64`. Der Körper der Funktion wird in geschweifte Klammern gefasst.

Zig unterscheidet zwischen zwei Variablen-Typen, Variablen und Konstanten. Konstanten können nach ihrer Initialisierung nicht mehr verändert werden, während Variablen neu zugewiesen werden können. Funktionsargumente zählen grundsätzlich zu Konstanten, d.h. sie können nicht verändert werden. Der Zig-Compiler erzwingt die Nutzung von Konstanten, sollte eine Variable nach ihrer Initialisierung nicht mehr verändert werden. Dies ist eine durchaus kontroverse Designentscheidung, kann aber auf das Zig-Zen zurückgeführt werden das besagt: „Favor reading code over writing code“. Sollten Sie also eine Variable in fremden Code sehen so können Sie sicher sein, dass diese an einer anderen Stelle manipuliert bzw. neu zugewiesen wird.

Eine Besonderheit, die Zig von anderen Sprachen unterscheidet ist, dass Integer mit beliebiger Präzision unterstützt werden. Im obigen Beispiel handelt es sich bei `u64` um eine vorzeichenlose Ganzzahl (unsigned integer) mit 64 Bits, d.h. es können alle Zahlen zwischen 0 und $2^{64} - 1$ dargestellt werden. Zig unterstützt jedoch nicht nur `u8`, `u16`, `u32` oder `u128` sondern alle unsigned Typen zwischen `u0` und `u65535`.



Alle Zig-Basistypen sind Teil des selben union: `std.builtin.Type`. Das union beinhaltet den `Int` Typ welcher ein struct mit zwei Feldern ist, `signedness` und `bits`, wobei `bits` vom Typ `u16` ist, d.h. es können alle Integer-Typen zwischen 0 und $2^{16} - 1$ Bits verwendet werden. Ja Sie hören richtig, der Zig-Compiler ist seit Version 0.10.0 selbst in Zig geschrieben, d.h. er ist self-hosted.

Innerhalb des Funktionskörpers werden mittels `if` verschiedene Bedingungen abgefragt. Sollte eine beider Zahlen 0 sein, so wird die andere zurückgegeben, ansonsten wird `gcd` rekursiv aufgerufen bis eine beider Zahlen 0 ist. Wie auch bei C muss die Bedingung in runde Klammern gefasst werden. Bei Einzeilern können die geschweiften Klammern um einen Bedingungsblock weggelassen werden. In diesem Fall wird der Inhalt des Bedingungsblocks an den umschließenden Block gereicht.

Mittels eines `return` Statements kann von einer Funktion in die aufrufende Funktion zurückgekehrt werden. Das Statement nimmt bei Bedarf zusätzlich einen Wert, der an die aufrufende Funktion zurückgegeben werden soll. Im obigen Beispiel gibt `gcd` mittels `return` den Wert des ausgeführten Bedingungsblocks zurück.

Das vollständige Programm finden Sie im zugehörigen Github-Repository. Mittels **zig build-exe chapter01/gcd.zig** kann das Beispiel kompiliert werden.

Unit Tests

Wie von einer modernen Programmiersprache zu erwarten, bietet Zig von Haus aus Unterstützung für Tests. Tests beginnen mit dem Schlüsselwort `test`, gefolgt von einem String, der den Test bezeichnet. In geschweiften Klammern folgt der Test-Block.

```
// chapter01/gcd.zig
test "assert that the gcd of 21 and 4 is 1" {
    try std.testing.expectEqual(@as(u64, 1), gcd(21, 4));
}
```

Die Standardbibliothek bietet unter `std.testing` eine ganze Reihe an Testfunktionen für verschiedene Datentypen und Situationen. Im obigen Beispiel verwenden wir `ExpectEqual`, welche als erstes Argument den erwarteten Wert erhält und als zweites Argument das Resultat eines Aufrufs von `gcd`. Die Funktion überprüft beide Werte auf ihre Gleichheit und gibt im Fehlerfall einen `error` zurück. Dieser Fehler kann mittels `try` propagiert werden, wodurch der Testrunner im obigen Beispiel erkennt, dass der Test fehlgeschlagen ist.

```
$ zig test chapter01/gcd.zig
All 1 tests passed.
```

Innerhalb einer Datei sind Definitionen auf oberster Ebene (top-level definitions) unabhängig von ihrer Reihenfolge, was die Definition von Tests mit einschließt. Damit können Tests an einer beliebigen Stelle definiert werden, darunter direkt neben der zu testenden Funktion oder am Ende einer Datei. Der Zig-Test-Runner sammelt automatisch alle definierten Tests und führt dies beim Aufruf von **zig test** aus. Worauf Sie jedoch achten müssen ist, dass Sie ausgehend von der Wurzel-Datei, die konzeptionell den Eintrittspunkt für den Compiler in Ihr Programm oder Ihre Bibliothek darstellt, Zig mitteilen müssen, in welchen Dateien zusätzlich nach Tests gesucht werden soll. Dies bewerkstelligen Sie, indem Sie die entsprechende Datei innerhalb eines Tests importieren.

```
const foo = @import("foo.zig");

test "main tests" {
    _ = foo; // Tell test runner to also look in foo for tests
}
```

Comptime

Die meisten Sprachen erlauben eine Form von Metaprogrammierung, d.h. das Schreiben von Code, der wiederum Code generiert. In C können die gefürchteten Makros mit dem Präprozessor verwendet werden und Rust bietet sogar zwei verschiedene Typen von Makros, jeweils mit ei-

ner eigenen Syntax. Zig bietet mit `comptime` seine eigene Form der Metaprogrammierung. Was Zig von anderen kompilierten Sprachen unterscheidet ist, dass die Metaprogrammierung in der Sprache selber erfolgt, d.h., wer Zig programmieren kann, der hat alles nötige Handwerkszeug um auch Metaprogrammierung in Zig zu betreiben.

Ein Aufgabe für die Metaprogrammierung sehr gut geeignet ist, ist die Implementierung von Container-Typen wie etwa `std.ArrayList`. Eine `ArrayList` ist ein Liste von Elementen eines beliebigen Typen, die eine Menge an Standardfunktionen bereitstellt um die Liste zu manipulieren. Nun wäre es sehr aufwändig die `ArrayList` für jeden Typen einzeln implementieren zu müssen. Aus diesem Grund ist `ArrayList` als Funktion implementiert, welche zur Compilezeit einen beliebigen Typen übergeben bekommt auf Basis dessen ein eigener `ArrayList`-Typ generiert wird.

```
var list = std.ArrayList(u8).init(allocator);
try list.append(0x00);
```

Der Funktionsaufruf `ArrayList(u8)` wird zur Compilezeit ausgewertet und gibt einen neuen Listen-Typen zurück, mit dem sich eine Liste an `u8` Objekten managen lassen. Auf diesem Typ wird `init()` aufgerufen um eine neu Instanz des Listen-Typs zu erzeugen. Mit der Funktion `append()` kann z.B., ein Element an das Ende der Liste angehängt werden. Eine stark simplifizierte Version von `ArrayList` könnte wie folgt aussehen.

```
// chapter01/my-arraylit.zig
const std = @import("std");

// Die Funktion erwartet als Compilezeitargument einen Typen `T`
// und gibt ein Struct zurück, dass einen Wrapper um einen Slice
// des Type `T` darstellt.
//
// Der Wrapper implementiert Funktionen zum managen des Slices
// und unterstützt unter anderem:
// - das Hinzufügen neuer Elemente
pub fn MyArrayList(comptime T: type) type {
    return struct {
        items: []T,
        allocator: std.mem.Allocator,

        // Erzeuge eine neue Instanz von MyArrayList(T).
        // Der übergebene Allocator wird von dieser Instanz gemanaged.
        pub fn init(allocator: std.mem.Allocator) @This() {
            return .{
                .items = &[_]T{},
                .allocator = allocator,
            };
        }

        pub fn deinit(self: *@This()) void {
            self.allocator.free(self.items);
        }
    };
}
```

```

    // Füge da Element `e` vom Typ `T` ans ende der Liste.
    pub fn append(self: *@This(), e: T) !void {
        // `realloc()` kopiert die Daten bei Bedarf in den neuen
        // Speicherbereich aber die Allokation kann auch
        // fehlschlagen. An dieser Stelle verbleiben wir der
        // Einfachheit halber bei einem `try`.
        self.items = try self allocator.realloc(self.items, self.items.len +
1);
        self.items[self.items.len - 1] = e;
    }
};
}

pub fn main() !void {
    var gpa = std.heap.GeneralPurposeAllocator(.{}){};
    const allocator = gpa.allocator();

    var list = MyArrayList(u8).init(allocator);
    defer list.deinit();

    try list.append(0xAF);
    try list.append(0xFE);

    std.log.info("{s}", .{std.fmt.fmtSliceHexLower(list.items[0..])});
}

```

Mit dem `comptime` Keyword sagen wir dem Compiler, dass das Argument `T` zur Compilezeit erwartet wird. Beim Aufruf von `MyArrayList(u8)` wertet der Compiler die Funktion aus und generiert dabei einen neuen Typen. Das praktische ist, dass wir die eigentliche Funktionalität der unserer `ArrayList` nur einmal implementieren müssen.

Der `comptime` Typ `T` kann innerhalb und auch außerhalb des von der Funktion `MyArrayList` zurückgegebenen Structs, anstelle eines expliziten Typs, verwendet werden.

Structs die mit `init()` initialisiert und mit `deinit()` deinitialisiert werden sind ein wiederkehrendes Muster in Zig. Dabei erwartet `init()` meist einen `std.mem.Allocator` der von der erzeugten Instanz verwaltet wird.

Ein weiterer Anwendungsfall bei dem Comptime zum Einsatz kommen kann ist die Implementierung von Parsern. Ein Beispiel hierfür ist der `Json-Parser` der Standardbibliothek (`std.json`), welcher dazu verwendet werden kann um Zig-Typen als `Json` zu serialisieren und umgekehrt¹¹.

```

// chapter01/reflection.zig
const std = @import("std");

const MyStruct = struct {
    a: u32 = 12345,

```

¹¹Die JavaScript Object Notation (JSON) ist eines der gängigsten Datenformate und wird unter anderem zur Übermittlung von Daten im Web verwendet (<https://en.wikipedia.org/wiki/JSON>).

```

    b: []const u8 = "Hello, World",
    c: bool = false,
};

fn isStruct(obj: anytype) bool {
    const T = @TypeOf(obj);
    const TInf = @typeInfo(T);

    return switch (TInf) {
        .Struct => |S| blk: {
            inline for (S.fields) |field| {
                std.log.info("{s}: {any}", .{ field.name, @field(obj, field.name) });
            }

            break :blk true;
        },
        else => return false,
    };
}

pub fn main() void {
    const s = MyStruct{};

    std.debug.print("{s}", .{if (isStruct(s)) "is a struct!" else "is not a struct!"});
}

```

Anstelle eines Typen kann `anytype` für Parameter verwendet werden. In diesem Fall wird der Typ des Parameters, beim Aufruf der Funktion, abgeleitet. Zig erlaubt Reflexion (type reflection). Unter anderem erlaubt Zig die Abfrage von (Typ-)Informationen über ein Objekt. Funktionen denen ein `@` vorangestellt sind heißen Builtin-Funktion (eingebaute Funktion) und werden direkt vom Compiler bereitgestellt, d.h., sie können überall in Programmen, ohne Einbindung der Standardbibliothek, verwendet werden.

Die Funktion `@TypeOf()` ist insofern speziell, als dass sie eine beliebige Anzahl an Ausdrücken als Argument annimmt und als Rückgabewert den Typ des Resultats zurückliefert. Die Ausdrücke werden dementsprechend evaluiert. Im obigen Beispiel wird `@TypeOf()` genutzt um den Typen des übergebenen Objekts zu bestimmen, da `isStruct()` aufgrund von `anytype` mit einem Objekt beliebigen Typs aufgerufen werden kann.

Die eigentliche Reflexion kann mithilfe der Funktion `@typeInfo()` durchgeführt werden, die zusätzliche Informationen über einen Typ zurückliefert. Felder sowie Deklarationen von structs, unions, enums und error Sets kommen dabei in der selben Reihenfolge vor, wie sie auch im Source Code zu sehen sind. Im obigen Beispiel testen wir mittels eines switch Statements ob es sich um ein struct handelt oder nicht und geben dementsprechend entweder `true` oder `false` zurück. Sollte es sich um ein struct handeln, so iterieren wir zusätzlich über dessen Felder und geben den Namen des Felds, sowie dessen Wert aus. Den Wert des jeweiligen Felds erhalten wir, indem wir mittels `@field()` darauf zugreifen. Die Funktion `@field()` erwartet als erstes Argu-

ment ein Objekt (ein Struct) und als zweites Argument einen zu Compile-Zeit bekannten String, der den Namen des Felds darstellt, auf das zugegriffen werden soll. Damit ist `@field(s, "b")` das Äquivalent zu `s.b`.

Für jeden Typen, mit dem `isStruct()` aufgerufen wird, wird eine eigene Kopie der Funktion (zur Compile Zeit) erstellt, die an den jeweiligen Typen angepasst ist. Das Iterieren über die einzelnen Felder eines structs muss zur Compile Zeit erfolgen, aus diesem Grund nutzt die obige Funktion `inline` um die For-Schleife zu entrollen, d.h., aus der Schleife eine lineare Abfolge von Instruktionen zu machen.

```
$ zig build-exe chapter01/reflection.zig
$ ./reflection
info: a: 12345
info: b: { 72, 101, 108, 108, 111, 44, 32, 87, 111, 114, 108, 100 }
info: c: false
```

Reflexion kann in vielen Situationen äußerst nützlich sein, darunter der Implementierung von Parsern für Formate wie JSON oder CBOR¹², da im Endeffekt nur zwei Funktionen implementiert werden müssen, eine zum Serialisieren der Daten und eine zum Deserialisieren. Mithilfe von Reflexion kann dann, vom Compiler, für jeden zu serialisierenden Datentyp eine Kopie der Funktionen erzeugt werden, die auf den jeweiligen Typen zugeschnitten ist.

Kommandozeilenargumente

Parallelität

C/C++ Build System

Wie wir anfangs gesehen haben bietet zig nicht nur einen Compiler, sondern ein vollständiges Build-System. Die Beschreibung, wie ein Projekt gebaut werden soll, erfolgt dabei direkt in Zig und nicht in einer eigenen Sprache wie Sie es vielleicht von Make oder CMake gewohnt sind. Das besondere ist, dass zig nicht nur eine Build-System für die Sprache Zig bereitstellt, sondern auch als Build-System für C und C++ Projekte verwendet werden kann und damit u.a. eine Alternative zu Make und CMake darstellt. Dies unterstreicht die enge Beziehung zwischen Zig und C bzw. C++.

Um zu demonstrieren wie Sie Zig als Build-System für ein C Projekt verwenden können, werden wir für <https://github.com/libusb/hidapi>¹³ ein kleines, unvollständiges Build-Skript schreiben und im Anschluss für eine kleine Beispielanwendung verwenden. Zuerst müssen wir mittels **git clone** <https://github.com/libusb/hidapi.git> das Projekt beziehen. Danach wechseln wir in den Ordner *hidapi* und erstellen eine neue Datei mit dem Namen *build.zig*.

```
git clone https://github.com/libusb/hidapi.git
cd hidapi
touch build.zig
```

Bibliothek

¹²<https://github.com/r4gus/zbor>

¹³<https://github.com/libusb/hidapi>

Wird von einem C bzw. C++ Projekt bereits ein Build-System verwendet, so lohnt es sich die zugehörigen Dateien zu analysieren um ein Verständniss davon zu bekommen, wie das Projekt derzeit gebaut wird. Im gegebenen Fall ist dies CMake, d.h., wir schauen uns zuerst die Datei *CMakeLists.txt* an. Ein Großteil des Inhalts der Datei ist für unsere Absichten erst einmal irrelevant und hat größtenteils mit der Konfiguration des Projekts zu tun. Zu diesem Zeitpunkt möchten wir hidapi jedoch lediglich für Linux, ohne besondere Optionen, compilieren. Aus diesem Grund schauen wir nach weiteren Unterordnern, die von *CMakeLists.txt* eingebunden werden. Einer davon ist *src*.

```
add_subdirectory(src)
```

Zwei Dinge die wir von *src/CMakeLists.txt* entnehmen können ist, dass das Projekt genau eine Header-Datei enthält (*hidapi/hidapi.h*) und dass für jedes Target (Linux, BSD, macOS und Windows) ein eigener Unterordner existiert. Die Datei *linux/CMakeLists.txt* wird uns für diese Beispiel als Vorlage dienen.

```
cmake_minimum_required(VERSION 3.6.3...3.25 FATAL_ERROR)
```

```
add_library(hidapi_hidraw
    ${HIDAPI_PUBLIC_HEADERS}
    hid.c
)
```

```
target_link_libraries(hidapi_hidraw PUBLIC hidapi_include)
```

```
find_package(Threads REQUIRED)
```

```
include(FindPkgConfig)
```

```
pkg_check_modules(libudev REQUIRED IMPORTED_TARGET libudev)
```

```
target_link_libraries(hidapi_hidraw PRIVATE PkgConfig::libudev Threads::Threads)
```

```
set_target_properties(hidapi_hidraw
    PROPERTIES
        EXPORT_NAME "hidraw"
        OUTPUT_NAME "hidapi-hidraw"
        VERSION ${PROJECT_VERSION}
        SOVERSION ${PROJECT_VERSION_MAJOR}
        PUBLIC_HEADER "${HIDAPI_PUBLIC_HEADERS}"
)
```

```
# compatibility with find_package()
add_library(hidapi::hidraw ALIAS hidapi_hidraw)
# compatibility with raw library link
add_library(hidapi-hidraw ALIAS hidapi_hidraw)
```

```
if(HIDAPI_INSTALL_TARGETS)
    install(TARGETS hidapi_hidraw EXPORT hidapi
        LIBRARY DESTINATION "${CMAKE_INSTALL_LIBDIR}"
        ARCHIVE DESTINATION "${CMAKE_INSTALL_LIBDIR}"
    )
endif()
```

```

        PUBLIC_HEADER DESTINATION "${CMAKE_INSTALL_INCLUDEDIR}/hidapi"
    )
endif()

```

```
hidapi_configure_pc("${PROJECT_ROOT}/pc/hidapi-hidraw.pc.in")
```

Als erstes definieren wir eine neue Bibliothek und geben dieser einen Namen, sowie Informationen über das Target (z.B. X86_64 Linux) sowie Informationen zu gewünschten Optimierungen. Außerdem definieren wir eine Option, um Anwendern die Möglichkeit zu geben zwischen einer statischen oder dynamischen Bibliothek zu wählen. Als Default wählen wir dabei `true`, d.h. standardmäßig wird eine statische Bibliothek gebaut.

```

// hidapi/build.zig
const std = @import("std");

pub fn build(b: *std.Build) void {
    const static = b.option(bool, "static", "Make a static library") orelse true;

    const target = b.standardTargetOptions(.{});
    const optimize = b.standardOptimizeOption(.{});

    const lib = if (static) blk: {
        break :blk b.addStaticLibrary(.{
            .name = "hidapi",
            .target = target,
            .optimize = optimize,
        });
    } else blk: {
        break :blk b.addSharedLibrary(.{
            .name = "hidapi",
            .target = target,
            .optimize = optimize,
        });
    };

    b.installArtifact(lib);
}

```

Nachdem Sie den obigen Code zu `build.zig` hinzugefügt haben können Sie mittels **build zig --help** sich einen Hilfetext ausgeben lassen, der u.a. unsere Option beinhalten sollte.

```

$ build zig --help
Usage: /usr/local/bin/zig-linux-x86_64-0.13.0/zig build [steps] [options]
...
Project-Specific Options:
    -Dstatic=[bool]           Make a static library

```

Zwar können wir uns einen Hilfetext anzeigen lassen, jedoch schlägt das Compilieren beim Ausführen von **build zig** fehl. Was fehlt ist Quellcode, aus der die Bibliothek gebaut werden soll. Um es einfach zu halten unterstützen wir in diesem Beispiel nur Linux, es steht Ihnen jedoch Frei

auch Unterstützung für andere Betriebssysteme hinzuzufügen. Über die `target` Variable können wir u.a. das Betriebssystem, für welches die Bibliothek gebaut werden soll, bestimmen.



Zig unterstützt Cross-Compilation, d.h. Architektur und Betriebssystem auf dem eine Anwendung oder Bibliothek compiliert wird kann sich von der Architektur bzw. dem Betriebssystem unterscheiden, für welches Compiliert wird. Die Variable `target` enthält Informationen über das Zielsystem.

Für unser Beispiel machen wir eine einfache Fallunterscheidung. Sollte das Zielsystem `.linux` sein, so fügen wir die benötigten `.c` Dateien zu `lib` hinzu und linken zusätzlich die benötigte Bibliothek `libudev`. Andernfalls kehren wir einfach frühzeitig von der `build` Funktion zurück.

```
// hidapi/build.zig
// ...

if (target.result.os.tag == .linux) {
    lib.addCSourceFiles(.{
        .files = &{"linux/hid.c"},
        .flags = &{"-std=gnu11"},
    });

    // Manche Linux-Distros (z.B. OpenSuse) besitzen keine Developer-Package
    // von libudev, d.h. es fehlt die Datei `libudev.h`. In diesem Fall kann
    // die Datei manuell bezogen
    // https://github.com/mcatalancid/libudev/blob/1.8.2/src/libudev.h
    // und in das Projekt integriert werden. In diesem Fall einfach die
    // folgende Zeile einfügen:
    // lib.addSystemIncludePath(b.path("./"));

    // Abhängig von der Linux-Distor muss `udev` evtl. durch `libudev` ersetzt
    // werden.
    lib.linkSystemLibrary("udev");
} else {
    // An dieser Stelle wäre eine bessere Fehlerkommunikation angebracht.
    return;
}

// Der Unterordner ./hidapi enthält die `hidapi.h` Header-Datei
lib.addIncludePath(b.path("hidapi"));
lib.linkLibC();

// ...

b.installArtifact(lib);
```

Beim linken von Bibliotheken mittels `linkSystemLibrary` sucht Zig nach den Bibliotheken in den gängigsten Ordnern, darunter `/usr/lib`. Außerdem werden die zugehörigen Header automatisch dem Include-Pfad hinzugefügt. Oft wird jedoch das Developer-Paket einer Bibliothek be-

nötigt um auch an die Header-Dateien auf seinem System zu gelangen. Im Fall von `libudev` ist ein solches Developer-Paket jedoch nicht unter allen gängigen Linux Distributionen vorhanden, z.B. gibt es unter Ubuntu *libudev-dev*, jedoch nicht unter OpenSuse¹⁴.

Da unsere *hidapi* Bibliothek selber auch *hidapi.h* zum compilieren benötigt, geben wir dessen relativen Pfad mittels der Funktion `addIncludePath()` an. Außerdem müssen wir bei C bzw. C++ Projekten in den meisten Fällen, mittels `linkLibC()`, die C-Standard-Bibliothek verlinken.

Damit ist unser Build-Script vollständig und wir können mit **build zig** unsere Bibliothek (unter Linux bzw. für Linux) bauen. Nach dem Compilieren findet sich diese unter *zig-out/lib* im Root-Verzeichnis von *hidapi*.

Um die *hidapi* Bibliothek, welche durch *build.zig* beschrieben wird, in anderen Zig Projekten einfach verwenden zu können, müssen wir noch zwei Dinge hinzufügen. Zum einen sollten wir die für *hidapi* benötigten Header (*hidapi/hidapi.h*) exportieren.

```
// hidapi/build.zig
// ...
lib.installHeader(b.path("hidapi/hidapi.h"), "hidapi.h");
// ...
```

Damit wird beim Linken von *hidapi* durch ein anderes Zig-Projekt, diesem auch gleichzeitig der Pfad zur Header-Datei mitgeteilt.

Zum anderen wird eine *build.zig.zon* Datei benötigt, die weitere Informationen zum *hidapi* Projekt bereitstellt.

```
// hidapi/zig.build.zon
.{
    .name = "hidapi",
    .version = "0.1.0",
    .dependencies = .{},
    .paths = .{
        "build.zig",
        "build.zig.zon",
        ".builds",
        "android/jni",
        "dist",
        "documentation",
        "doxygen",
        "hidapi",
        "hidtest",
        "libusb",
        "linux",
        "m4",
        "mac",
        "pc",
        "src",
```

¹⁴Die Beschaffung benötigter Bibliotheken ist in der Regel „Out-of-Scope“, d.h. es ist die Aufgabe des Nutzers die benötigten Bibliotheken auf seinem System zu installieren. Für das gegebene Beispiel habe ich trotzdem ein Kommentar diesbezüglich eingefügt, mit einem Link zur benötigten Header-Datei.

```
    "subprojects",
    "testgui",
    "udev",
    "windows",
    ".appveyor.yml",
    ".cirrus.yml",
    ".gitattributes",
    ".gitignore",
    "AUTHORS.txt",
    "HACKING.txt",
    "LICENSE.txt",
    "README.md",
    "VERSION",
    "bootstrap",
    "configure.ac",
    "meson.build",
  },
}
```

Die meisten Felder sind dabei selbsterklärend. Das Feld `.paths` gibt an welche Dateien zum gegebenen Projekt gehören, woraus sich u.a. der Paket-Hash berechnet.

Verwendung der Bibliothek

Standard Typen

Zig ist eine kompilierte Sprache, d.h. sie wird, bevor der Programmcode ausgeführt werden kann, in eine Sprache übersetzt die vom Prozessor verstanden wird. Die Übersetzungsarbeit übernimmt dabei der Compiler.

TBD

Typ	Beschreibung	Beispielwerte
i8, u65	Vorzeichen(un)behaftete Ganzzahlen mit der angegebenen Bitbreite (von 0 bis $2^{16} - 1$).	0x32, -1
usize, isize	Vorzeichen(un)behaftete Ganzzahlen deren Bitbreite mit der der Architektur übereinstimmt, d.h. auf x86_64 wäre usize gleichbedeutend mit u64.	0xcafe_babe

Ganzzahlen (Integer)

Zig unterstützt Ganzzahlen mit einer beliebigen Bitbreite. Der Bezeichner eines jeden Integer-Typen beginnt mit einem Buchstaben i (vorzeichenbehaftet; signed) oder u (vorzeichenunbehaftet; unsigned) gefolgt von einer oder mehreren Ziffern, welche die Bitbreite in Dezimal darstellen. Als Beispiel, i7 ist eine vorzeichenbehaftete Ganzzahl der sieben Bit zur Kodierung der Zahl zur Verfügung stehen. Die Aussage, dass die Bitbreite beliebig ist entspricht dabei nicht ganz der Wahrheit. Die maximal erlaubte Bitbreite beträgt $2^{16} - 1 = 65535$.

Typ	Wertebereich
i7	-2^6 bis $2^6 - 1$
i32	-2^{31} bis $2^{31} - 1$
u8	0 bis $2^8 - 1$
u64	0 bis $2^{64} - 1$

Vorzeichenbehaftete Ganzzahlen werden im Zweierkomplement dargestellt¹⁵. In Assembler wird nicht zwischen vorzeichenbehafteten und vorzeichenunbehafteten Zahlen unterschieden. Alle mathematischen Operationen werden von der CPU auf Registern, mit einer festen Bitbreite (meist 64 Bit auf modernen Computern), ausgeführt. Dabei entspricht jede, vom Computer ausgeführte, arithmetische Operationen effektiv einem „Rechnen mit Rest“, auch bekannt als modulare Arithmetik¹⁶. Die Bitbreite m der Register (z.B. 64) repräsentiert dabei den Modulo 2^m . Damit entspricht ein 64 Bit Register dem Restklassenring $\mathbb{Z}_{2^{64}} = \{0, 1, 2, \dots, 2^{64} - 1\}$ und jegliche Addition zweier Register resultiert in einem Wert der ebenfalls in $\mathbb{Z}_{2^{64}}$ liegt, d.h. auf `x86_64` wäre die Instruktion `add rax, rbx` äquivalent zu $rax = rax + rbx \bmod 2^{64}$. Dieses Verhalten überträgt sich analog auf Ganzzahlen in Zig.

Das Zweierkomplement einer Zahl $a \in \mathbb{Z}_m$ ist das additive Inverse a' dieser Zahl, d.h. $a + a' \equiv 0$. Dieses kann mit $a' = m - a$ berechnet werden. Für `i8` wäre das additive Inverse zu $a = 4$ die Zahl $a' = 2^8 - 4 = 256 - 4 = 252$. Addiert man beide Zahlen modulo 256, so erhält man wiederum das neutrale Element 0, $a + a' \bmod 256 = 4 + 252 \bmod 256 = 256 \bmod 256 = 0$. Das Zweierkomplement hat seinen Namen jedoch nicht von der Subtraktion, sondern von der speziellen Weise wie das additive Inverse einer Zahl bestimmt wird. Dieser Vorgang kann wie folgt beschrieben werden:

1. Gegeben eine Zahl in Binärdarstellung, invertiere jedes Bit, d.h. jede 1 wird zu einer 0 und umgekehrt.
2. Addiere 1 auf das Resultat und ignoriere mögliche Überläufe.

Für das obige Beispiel mit der Zahl 4 vom Typ `i8` sieht dies wie folgt aus:

$$\begin{aligned} 00000100_2 &= 4_{16} && \text{invertiere alle Bits der Zahl 4} \\ 11111011_2 &= 251_{16} && \text{addiere 1 auf die Zahl 251} \\ 11111100_2 &= 252_{16} \end{aligned}$$

Zur Compile-Zeit bekannte Literale vom Typ `comptime_int` haben kein Limit was ihre Größe (in Bezug auf die Bitbreite) und konvertieren zu anderen Integertypen, solange das Literal im Wertebereich des Typen liegt.

```
// Variable `i` vom Typ `comptime_int`
var i = 0;
```

Um die Variable zur Laufzeit modifizieren zu können, muss ihr eine expliziter Type mit fester Bitbreite zugewiesen werden. Dies kann auf zwei Weisen erfolgen.

1. Deklaration der Variable `i` mit explizitem Typ, z.B. `var i: usize = 0`.
2. Verwendung der Funktion `@as()`, von welcher der Compiler den Type der Variable `i` ableiten kann, z.B. `var i = @as(usize, 0)`.

Ein häufiger Fehler, der aber schnell behoben ist, ist die Verwendung einer Variable vom Typ `comptime_int` in einer Schleife.

¹⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Two's_complement

¹⁶https://de.wikipedia.org/wiki/Modulare_Arithmetik

```
var i = 0;
while (i < 100) : (i += 1) {}
```

Was zu einem entsprechenden Fehler zur Compilezeit führt.

```
$ zig build-exe chapter02/integer.zig
error: variable of type 'comptime_int' must be const or comptime
    var i = 0;
    ^
```

note: to modify this variable at runtime, it must be given an explicit fixed-size number type

Der Zig-Compiler ist dabei hilfreich, indem er neben dem Fehler auch einen Lösungsansatz bietet. Nachdem der Variable `i` ein expliziter Typ zugewiesen wird (`var i: usize`) compiliert das Programm ohne weitere Fehler.

Optional können die Prefixe `0x`, `0o` und `0b` an ein Literal angehängt werden um Literale in Hexadezimal, Octal oder Binär anzugeben, z.B. `0xcafebabe`.

Um größere Zahlen besser lesbar zu machen, kann ein Literal mit Hilfe von Unterstrichen aufgeteilt werden, z.B. `0xcafe_babe`.

Operatoren wie `+` (Addition), `-` (Subtraktion), `*` (Multiplikation) und `/` (Division) führen bei einem Überlauf zu undefiniertem Verhalten (engl. undefined behavior). Aus diesem Grund stellt Zig spezielle Versionen dieser Operatoren zur Verfügung, darunter:

- Operatoren für Sättigungsarithmetik: Alle Operationen laufen in einem festen Intervall zwischen einem Minimum und einem Maximum ab welches nicht unter- bzw. überschritten werden kann.
 - Addition (`+|`): `@as(u8, 255) +| 1 == @as(u8, 255)`
 - Subtraktion (`-|`): `@as(u32, 0) -| 1 == 0`
 - Multiplikation (`*|`): `@as(u8, 200) *| 2 == 255`
- Wrapping-Arithmetik: Dies ist äquivalent zu modularer Arithmetik.
 - Addition (`+%`): `@as(u32, 0xffffffff) +% 1 == 0`
 - Subtraktion (`-%`): `@as(u8, 0) -% 1 == 255`
 - Multiplikation (`*%`): `@as(u8, 200) *% 2 == 144`

Fließkommazahlen (Float)

Im Gegensatz zu Integern erlaubt Zig keine beliebige Bitbreite für Fließkommazahlen. Zur Verfügung stehen:

Typ	Repräsentation
f16	IEEE-754-2008 binary16
f32	IEEE-754-2008 binary32
f64	IEEE-754-2008 binary64

Typ	Repräsentation
f80	IEEE-754-2008 80-bit extended precision
f128	IEEE-754-2008 binary128

Literale sind immer vom Typ `comptime_float`, welcher äquivalent zum größtmöglichen Fließkommatypen (`f128`) ist, und können zu jedem beliebigen Fließkommatypen konvertiert werden. Enthält ein Literal keinen Bruchteil, so ist eine Konvertierung zu einem Integertyp ebenfalls möglich.

```
const fp = 123.0E+77;
const hfp = 0x103.70p-5;
```

Container

Jedes syntaktische Konstrukt in Zig welches als Namensraum dient und Variablen- oder Funktionsdeklarationen umschließt wird als Container bezeichnet. Weiterhin können Container selbst Typdeklarationen sein, welche instantiiert werden können. Dazu zählen `structs`, `enums`, `unions` und sogar `Sourcedateien`.

Ein Merkmal welches Container von Blöcken unterscheidet ist, dass Container keine Ausdrücke enthalten, obwohl sowohl Container als auch Blöcke, mit der Ausnahme von `Sourcedateien`, in geschweifte Klammern (`{}`) gefasst werden.

Struct

In Zig werden `Structs` mit dem `struct` Schlüsselwort deklariert. Der Inhalt eines `Structs` wird dabei in geschweifte Klammern gefasst. Neben Feldern können `Structs` auch Methoden, Konstanten und Variablen enthalten.

```
const RgbColor = struct {
    r: u8 = 0,
    g: u8 = 0,
    b: u8 = 0,

    const RED = @This(){ .r = 255 };
    const GREEN = @This(){ .g = 255 };
    const BLUE = @This(){ .b = 255 };

    pub fn add(self: *@This(), other: *@This()) @This() {
        // TODO
    }
};
```

Jedes Feld wird durch einen Bezeichner und einen Typ, getrennt durch einen Doppelpunkt `:`, angegeben. Weiterhin kann jedem Feld ein Default-Wert zugewiesen werden, der automatisch übernommen wird, sollte beim Instanzieren des `Structs` kein Wert für das Feld angegeben werden.

```
const red = RgbColor{ .r = 255 };
```

Mit Hilfe der Funktion `@This()` kann auf den umschließenden Kontext, im obigen Beispiel das Struct, welches an `RgbColor`¹⁷ gebunden wird, zugegriffen werden.

Konstanten innerhalb von Structs können dazu verwendet werden um Werte, wie etwa die Länge eines kryptografischen Schlüssels oder wie oben zu sehen, gängige Farben, die im Bezug zu dem gegebenen Struct stehen im selben Scope zu deklarieren.

Enum

Union

¹⁷Die gängige Konvention ist, dass Typbezeichner Camel-Case verwenden, d.h. ein zusammengesprochenes Wort beginnend mit einem Großbuchstaben.

Speicherverwaltung

Im Vergleich zu anderen Sprachen, wie etwa Java oder Python, muss der Speicher in Zig manuell verwaltet werden. Dies bringt einige Vorteile mit sich, birgt aber auch Risiken, die bei Nichtbeachtung zu Schwachstellen in den eigenen Anwendungen führen können. Was Zig von anderen Sprachen mit manueller Speicherverwaltung hervorhebt ist die explizite Verwendung und Verwaltung von Allokatoren, in der Programmiersprache repräsentiert durch den `Allocator` Typ. Dies kann von anderen Programmiersprachen kommenden Entwicklern anfangs ungewohnt vorkommen, bietet jedoch ein hohes Maß an Flexibilität, da Speicher zur Laufzeit dynamisch von verschiedenen Speicherquellen alloziert werden kann.

Grundlagen

In den meisten Fällen kann ein Programm von zwei verschiedenen Quellen Speicher allozieren, dem Stack und dem Heap. Wird eine Funktion aufgerufen, so alloziert diese Speicher auf dem Stack der von den lokalen Variablen und Parametern zur Speicherung der zugehörigen Werte verwendet wird. Dieser, von einer Funktion allozierte, Speicherbereich wird als Stack-Frame bezeichnet. Die Allokation eines Stack-Frames wird durchgeführt, indem der Wert eines speziellen CPU-Register, der sog. Stack-Pointer welcher auf das Ende des Stacks zeigt, verringert wird. Die Anzahl an Bytes um die der Stack-Pointer verringert werden muss um alle lokalen Variablen halten zu können wird vom Compiler zur Compilezeit berechnet und in entsprechende Assemblerinstruktionen übersetzt.

Durch die Einschränkung, dass die Größe eines Stack-Frames zur Compilezeit bekannt sein muss, lassen sich bestimmte Aufgaben schwer lösen. Angenommen Sie wollen eine Zeichenkette unbekannter Länge von Ihrem Programm einlesen lassen, um diese später zu verarbeiten. Eine Möglichkeit um die Zeichenkette zu speichern wäre innerhalb der `main` Funktion eine Variable vom Typ `Array` mit fester Länge zu deklarieren, jedoch ist dieser Ansatz sehr unflexibel da Sie in dem gegebenen Szenario die Länge der zu erwartenden Zeichenkette nicht kennen. Bei besonders kurzen Zeichenketten verschwenden Sie ggf. Speicher während sich besonders lange Zeichenketten nicht einlesen lassen, da nicht genügend Speicher auf dem Stack alloziert wurde. Um Probleme solcher Art besser lösen zu können, kann Speicher dynamisch zur Laufzeit eines Programms alloziert werden. Der Heap kann als linearer Speicherbereich betrachtet werden, der von einem Allokator verwaltet wird. Wird Speicher zur Laufzeit benötigt, so kann der Allokator durch einen Funktionsaufruf angewiesen werden eine bestimmte Menge an Bytes zu allozieren.

Der Allokator sucht ein Stück Speicher mit der passenden Länge heraus, markiert dieses als alloziert und gibt einen Zeiger auf den Beginn des Speicherbereichs zurück. Wird der Speicher nicht mehr benötigt, so kann der Allokator durch einen weiteren Funktionsaufruf aufgefordert werden den Speicher wieder frei zu geben. In C und C++ verwenden Sie i.d.R. `malloc` und `free` um Speicher zu allozieren bzw. freizugeben, in den wenigsten Fällen müssen Sie sich jedoch Gedanken um den zu verwendenden Allokator machen. Im Gegensatz dazu verwenden Sie in Zig immer explizit einen Allokator.

In vielen Fällen, vor allem als Neuling, ist die Unterscheidung zwischen den vielen verschiedenen Arten von Allokatoren, welche die Zig Standardbibliothek bereitstellt, weniger interessant. Wird ein Standard-Allokator, im Sinne von `malloc` und `free`, benötigt, so kann auf den `GeneralPurposeAllocator` zurückgegriffen werden.

```
const Gpa = std.heap.GeneralPurposeAllocator(.{});
var gpa = Gpa{};
const allocator = gpa.allocator();
```

Die Funktion `GeneralPurposeAllocator` erwartet ein Konfigurationsstruct als Argument zur Compilezeit und gibt einen neuen `GeneralPurposeAllocator`-Typ zurück der der Konstante `Gpa` zugewiesen wird. In den meisten Fällen kann durch Verwendung von `.{}` als Argument die Standardkonfiguration übernommen werden. Danach kann der `Gpa` Allokator-Typ verwendet werden um ein neues Allokator-Object zu erzeugen und an die Variable `gpa` zu binden. Durch Aufruf der `allocator()` Funktion auf dem Objekt kann schlussendlich auf den eigentlichen Allokator zugegriffen werden. Dies mag auf den ersten Blick kompliziert wirken, vor allem im Vergleich zu anderen Sprachen wo Funktionen wie `malloc()` scheinbar immer zur Verfügung stehen, in den meisten Fällen reicht es aber aus, den Allokator einmal am Anfang der Anwendung zu instanziiieren. Danach kann dieser zur Allokation von Speicher verwendet werden. Der `Allocator`-Typ erlaubt es verschiedene Allokatoren durch das selbe, standardisierte Interface zu verwenden. Das bedeutet, dass Entwickler von Bibliotheken bzw. Modulen das gesamte dynamische Speichermanagement durch einen Typen (`Allocator`) handhaben können, während die Verwender von besagten Bibliotheken die freie Wahl bezüglich des dahinter liegenden Allokators besitzen.

Beim Allozieren von Speicher wird in Zig grundsätzlich zwischen der Allokation von exakt einem Objekt und der Allokation mehrerer Objekte unterschieden. Soll Speicher für genau ein Objekt alloziert werden, so muss `create()` zum allozieren und `destroy()` zum Freigeben des Speichers verwendet werden. Andernfalls können die Funktionen `alloc()` und `free()` verwendet werden. Die Funktion `create()` erwartet einen Typen (`type`) als Argument und alloziert daraufhin Speicher für exakt eine Instanz dieses Typen. Eine Allokation kann jedoch fehlschlagen, z.B. weil kein ausreichender Speicher auf dem Heap vorhanden ist. Aus diesem Grund gibt `create()` nicht direkt einen Zeiger auf den allozierten Speicher zurück, sondern einen Fehler-Typ. Damit werden Entwickler gezwungen sich bewusst zu machen, dass eine Allokation fehlschlagen kann. Dies spiegelt sich auch im Zig-Zen wieder, in welchem es u.a. heißt: „Resource allocation may fail; resource deallocation must succeed“ (auf Deutsch: Die Allokation von Ressourcen kann fehlschlagen; die deallokation von Ressourcen muss gelingen).

```
// chapter03/hello_world.zig
const std = @import("std");
```

```

const Gpa = std.heap.GeneralPurposeAllocator(.{});
var gpa = Gpa{};
const allocator = gpa.allocator();

pub fn main() !void {
    const T = u8;
    const L = "Hello, World".len;

    // Hier allozieren wir Speicher für L Elemente vom Typ `u8` .
    const hello_world = allocator.alloc(T, L) catch {
        // Im Fall, dass der Speicher nicht alloziert werden kann,
        // geben wir eine Fehlermeldung aus und beenden den
        // Prozess ordnungsgemäß.
        std.log.err("We ran out of memory!", .{});
        return;
    };
    // Defer wird vor dem Verlassen der Funktion ausgeführt.
    // Es ist 'good practice' Speicher mittels `defer` zu
    // deallozieren.
    defer allocator.free(hello_world);

    // Wir kopieren "Hello, World" in den allozierten Speicher.
    @memcpy(hello_world, "Hello, World");

    // Nun geben wir den String auf der Kommandozeile aus.
    const stdout_file = std.io.getStdOut().writer();
    var bw = std.io.bufferedWriter(stdout_file);
    const stdout = bw.writer();

    try stdout.print("{s}\n", .{hello_world});
    try bw.flush();
}

```

Das obige Programm gibt „Hello, World” auf der Kommandozeile aus, jedoch allozieren wir vor der Ausgabe, zur Veranschaulichung, Speicher für den auszugebenden String auf dem Heap. Die Funktion `alloc()` erwartet als Argument den Typ, für den Speicher alloziert werden soll (`u8`), sowie die Anzahl an Elementen. Aus dem Typ `T` und der Anzahl `L` berechnet sich die Anzahl an Bytes die benötigt werden um `L` mal den Typ `T` im Speicher zu halten ($@sizeOf(T) * L$). Wie bereits erwähnt kann die Speicherallokation fehlschlagen, aus diesem Grund müssen wir denn Fehlerfall berücksichtigen bevor wir auf den Rückgabewert von `alloc()` zugreifen können¹⁸. Da `alloc()` Speicher für mehr als ein Objekt alloziert, gibt die Funktion anstelle eines Zeigers auf den Typ `T` einen Slice vom Typ `T` zurück. Ein Slice ist ein Wrapper um einen Zeiger, der zusätzlich die Länge des referenzierten Speicherbereichs kodiert. Nach außen verhält sich ein Slice wie ein Zeiger in C, d.h. mit dem Square-Bracket-Operator `[]` kann auf einzelne Element zugegriffen werden, jedoch wird vor jedem Zugriff überprüft, ob der angegebene Index innerhalb des allo-

¹⁸Anstelle eines catch Blocks hätten wir an dieser Stelle auch try verwenden können.

zierten Bereichs liegt um Out-of-Bounds-Reads zu vorzubeugen. Slices ersetzen in vielen Fällen null-terminierte Strings, was dabei hilft Speicherfehlern vorzubeugen.

Ein wichtiger Punkt der zu jeder Allokation gehört ist die Deallokation des allozierten Speichers. In Zig kann diese direkt nach dem Aufruf von `alloc()` bzw. `create()` platziert werden, indem dem Aufruf von `free()` der `defer` Operator vorangestellt wird. `Defer` sorgt dafür, dass vor dem Verlassen eines Blocks, im obigen Beispiel ist dies der Funktionsblock von `main`, alle `defer` Blöcke ausgeführt werden und zwar in umgekehrter Reihenfolge in der sie deklariert werden. Dies ist vor allem zum Aufräumen von Ressourcen sehr hilfreich.



Sehen Sie beim Lesen von Zig-Code keinen `defer` Block zur Bereinigung von Speicher direkt nach einer Allokation sollten Sie erst einmal stutzig werden. Es gibt aber auch Situationen, z.B. bei der Verwendung eines `ArenaAllocators`, in denen nicht jede einzelne Allokation manuell bereinigt werden muss. In solchen Fällen ist es aber durchaus nützlich für Leser Ihres Quellcodes, wenn Sie durch ein Kommentar ersichtlich machen, dass das Fehlen einer Deallokation beabsichtigt ist.

Lifetimes

Bei der Verwendung von Programmiersprachen mit manuellem Speichermanagement ist die Berücksichtigung der Lifetime (Lebenszeit) von Objekten essenziell um Speicherfehler zu vermeiden. Die Lifetime eines Objekts beschreibt ein abstraktes Zeitintervall zur Laufzeit, in welchem ein bestimmtes Objekt oder eine Sequenz von Objekten im Speicher existieren und auf diese zugegriffen werden darf. Die Art wie bzw. wo Speicher für ein Objekt alloziert wird hat dabei großen Einfluss auf dessen Lebenszeit. Im Allgemeinen beginnt die Lifetime eines Objekts mit dessen Erzeugung und endet wenn der Speicher des Objekt wieder freigegeben wird. Bezogen auf die Art der Allokation kann grob zwischen den folgenden Fällen unterschieden werden:

- Statische Allokation
- Automatische Allokation
- Dynamische Allokation

Static Memory

In Zig, wie auch in C, befinden sich statische Variablen und Konstanten, die im globalen Scope, bzw. im Fall von Zig in einem Container¹⁹, einer Anwendung deklariert werden, in der `.data` oder `.bss` Section eines Programms. Speicher für diese Sektionen wird beim Start eines Prozesses gemapped und er bleibt bis zur Terminierung des Prozesses valide. Variablen die dies betrifft haben eine statische Lifetime, d.h. sie sind vom Start eines Prozesses bis zu dessen Beendigung valide. Selbes gilt für statische, lokale Variablen.

```
const std = @import("std");
```

¹⁹Ein Container in Zig ist jedes Konstrukt, das als Namensraum (engl. namespace) dient. Dazu zählen u.a. Structs aber auch Source Dateien.

```
const hello = "Hello, World";

pub fn main() void {
    const local_context = struct {
        var x: u8 = 128;
    };

    std.log.info("{s}, {d}", .{ hello, local_context.x });
}
```

Die Konstante `hello` wird im umschließenden Container, dargestellt durch die Quelldatei, deklariert und ist damit zum einen statisch, zum anderen ist sie aufgrund des `const` Modifiers zur Compilezeit bekannt. Selbes gilt für die lokale, statische Variable `x`. Im Gegensatz zu C werden statische, lokalen Variablen nicht mit dem `static` Keyword deklariert sondern innerhalb eines lokalen Structs welches ebenfalls einen Container darstellt. Lokale, statische Variablen können nützlich sein um z.B. einen gemeinsamen „Shared-State“ zwischen Aufrufen der selben Funktion zu verwirklichen.



In Zig wird jede Translationunit, d.h. jede Datei in der Quellcode liegt, als Struct und damit als Container betrachtet. Dementsprechend gibt es eigentlich keine global deklarierten Variablen wie man sie aus C kennt, sondern nur statische Variablen die in Containern deklariert werden.

Automatic Memory

Objekte die durch Deklaration bzw. Definition innerhalb eines (Funktions-)Blocks erzeugt werden erben ihre Lifetime von dem umschließenden Block. Für Variablen und Parameter von Funktionen bedeutet dies, dass sich ihre Lifetime an der Lifetime eines Stack-Frames orientiert. Bei jedem Funktionsaufruf wird für den Aufruf ein Stück zusammenhängender Speicher auf dem Stack alloziert (der Stack-Frame) welcher groß genug ist um alle lokalen Variablen und Parameter zu halten. Der Frame wird dabei durch zwei Spezialregister der CPU, dem Stack-Pointer (SP) und dem Base-Pointer (BP), eingegrenzt. Der Stack-Pointer zeigt dabei auf das Ende vom Stack.



Es gibt verschiedene Arten von Stacks, jedoch ist die wohl häufigst auftretende Form der Full-Descending-Stack. Das bedeutet, dass der Stack nach unten „wächst“ (Descending), d.h. von höheren zu niedrigeren Speicheradressen, und der Stack-Pointer auf das erste valide Element des Stacks zeigt (Full).

```
// chapter03/stack_01.zig
const std = @import("std");

pub fn main() !void {
    var i: usize = 0; // Begin der Lifetime von 'i' --/
                        //                               /
    try foo(&i); // foo referenziert 'i' /
} // Ende der Lifetime von 'i' -----/
```

```

pub fn foo(a: *u64) !void { // Begin der Lifetime von 'a' --/
    a.* += 1;                //                               /
} // Ende der Lifetime von 'a' -----/

```

Das obige Programm übergibt eine Referenz auf die Variable `i` als Argument an die Funktion `foo()`, welche `i` inkrementiert. Die Lifetime der Variable startet mit ihrer Definition und endet mit dem Funktionsblock von `main`. Innerhalb der Lifetime darf `i` von anderen Programmteilen, in diesem Fall der Funktion `foo()`, referenziert und ggf. modifiziert werden.

Die Lifetime der Referenz `a` zu `i` beginnt mit dem Funktionsblock von `foo()` und endet mit dem Ende des Funktionsblocks. Wichtig ist, dass die Lifetime einer Referenz immer innerhalb der Lifetime des referenzierten Objekts liegen muss. Überschreitet die Lifetime einer Referenz die Lifetime des referenzierten Objekts so spricht man von einem `dangling Pointer` (auf Deutsch hängender Zeiger). Die Verwendung solcher `dangling Pointer` können zu schwerwiegenden Programmfehlern führen, da der referenzierte Speicher als undefiniert gilt.

Um das Verhalten der Anwendung besser nachvollziehen zu können, besteht die Möglichkeit mithilfe des Programms `objdump` die kompilierte Anwendung zu disassemblieren: **`objdump -d -M intel stack_01`**. Der Eintrittspunkt einer jeden Anwendung ist dabei die `main` Funktion.

```

00000000010349b0 <stack_01.main>:
10349b0: push    rbp           ; Begin Prolog ---|
10349b1: mov     rbp, rsp       ;                |
10349b4: sub     rsp, 0x10      ; End Prolog ----|
10349b8: mov     QWORD PTR [rbp-0x8], 0x0 ; i = 0
10349bf:         00
10349c0: lea     rdi, [rbp-0x8] ; &i
10349c4: call    10348e0 <stack_01.foo>
10349cb: add     rsp, 0x10      ; Begin Epilog --|
10349cf: pop     rbp           ; End Epilog ----|
10349d0: ret

```

Jede Funktion besitzt ein Symbol (im Fall von `main` ist dies `stack_01.main`) welches repräsentativ für die Adresse der ersten Instruktion steht. Beim Funktionsaufruf wird diese Adresse in das Instruktions-Zeiger-Register (Instruction Pointer - IP) geschrieben, welcher immer auf die nächste auszuführende Instruktion zeigt. Jede Funktion beginnt mit dem sogenannten Funktions-Prolog, welcher einen neuen Stack-Frame für den Funktionsaufruf erzeugt, und endet mit dem Funktions-Epilog, welcher den Stack-Frame wieder entfernt, d.h. den Stack in den Zustand vor dem Funktionsaufruf zurückversetzt.

Im Prolog wird zuerst der Zustand des Base Pointers (BP), welcher auf den oberen Teil des derzeitigen Stack-Frames zeigt, auf den Stack gepushed, um diesen im Epilog wieder herstellen zu können. Danach wird der BP mit dem Wert des SP überschrieben, d.h. BP und SP zeigen beide auf den alten BP auf dem Stack. Danach werden 16 Bytes (0x10) für die Variablen und Parameter von `main` auf dem Stack alloziert, indem der SP um die entsprechende Anzahl an Bytes verringert wird. Innerhalb des allozierten Speicherbereichs wird die Variable `i` mit dem Wert 0 initialisiert.

Die Adresse der Variable `i` (`BP - 8`) wird an die Funktion `foo()` mittels des `RDI` Registers übergeben²⁰.



In einer kompilierten Anwendung existieren Variablen nur implizit, d.h. es gibt keine Symbole oder ähnliches mit denen z.B. die Variable `i` klar identifiziert werden kann. In Assembler ist eine Variable lediglich ein Bereich im (Haupt-)Speicher in welchem der Wert der Variable gespeichert ist.

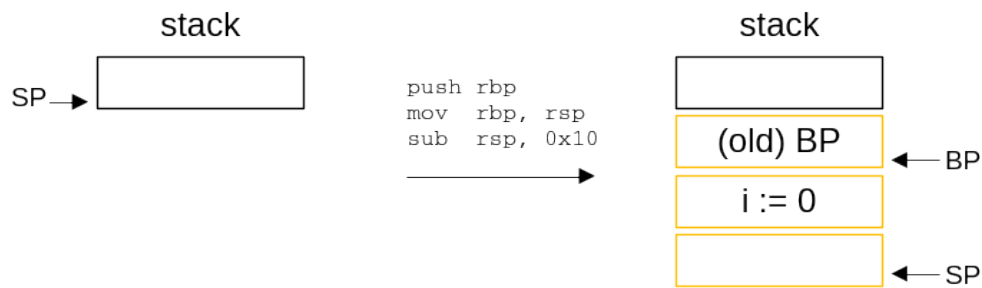


Abbildung 2: Stack-Frame von `main()`

```
00000000010348e0 <stack_01.foo>:
10348e0: push    rbp
10348e1: mov     rbp, rsp
10348e4: sub     rsp, 0x20
10348e8: mov     QWORD PTR [rbp-0x18], rdi
10348ec: mov     QWORD PTR [rbp-0x8], rdi
10348f0: mov     rax, QWORD PTR [rdi]
10348f3: add     rax, 0x1
10348f7: mov     QWORD PTR [rbp-0x10], rax
10348fb: setb    al
10348fe: jb      1034902 <stack_01.foo+0x22>
1034900: jmp     1034924 <stack_01.foo+0x44>
1034902: movabs  rdi, 0x101ed99
1034909:         00 00 00
103490c: mov     esi, 0x10
1034911: xor     eax, eax
1034913: mov     edx, eax
1034915: movabs  rcx, 0x101dfb0
103491c:         00 00 00
103491f: call    1034940 <builtin.default_panic>
1034924: mov     rax, QWORD PTR [rbp-0x18]
1034928: mov     rcx, QWORD PTR [rbp-0x10]
103492c: mov     QWORD PTR [rax], rcx
103492f: xor     eax, eax
1034931: add     rsp, 0x20
```

²⁰Wer mehr über Assembler-Programmierung lernen möchte, dem empfehle ich das Buch „x86-64 Assembly Language Programming with Ubuntu“ von Ed Jorgensen. Diese ist öffentlich zugänglich und bietet einen sehr guten und verständlichen Einstieg.

```

1034935: pop    rbp
1034936: ret

```

Nach dem Aufruf von `foo()` wird zuerst ein neuer Stack-Frame für den Funktionsaufruf erzeugt. Innerhalb dieses Stack-Frames wird der Parameter `a` mit der Adressen von `i` initialisiert. Was auffällt ist, dass die in `RDI` gespeicherte Adresse gleich mehrmals auf den Stack geschrieben wird und zusätzlich direkt dereferenziert wird um den Wert von `i` in das Register `RAX` zu laden. Schaut man sich jedoch den gesamten Funktionskörper an so sieht man, dass von der Speicherstelle `BP - 24` die Adresse von `i` zum Zurückschreiben des inkrementierten Werts geladen wird. Damit ist `BP - 24` in diesem Fall der Parameter `a`. Dementsprechend sieht der Stack nach aufruf von `foo()` wie folgt aus.

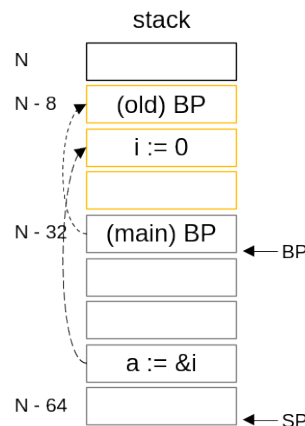


Abbildung 3: Stack-Frame von `foo()`

Diese im Funktionsprolog vollzogenen Schritte werden vor dem Verlassen der Funktion, im Epilog, umgekehrt, d.h. beim ausführen der `ret` Instruktion befindet sich der Stack, bezogen auf sein Layout, im selben Zustand wie vor dem Funktionsaufruf. Was sich natürlich geändert hat ist der Wert der Variable `i`.

Dynamic Memory

Wir haben uns die Allokation von dynamischem Speicher anhand des `GeneralPurposeAllocator` am Anfang dieses Kapitels schon etwas angeschaut. Die Lifetime von dynamisch allozierten Objekten ist etwas tückischer als die von statisch oder automatisch allozierten. Der Grund ist, dass bei komplexeren Programmen sowohl die Allokation als auch die Deallokation eines Objekts an verschiedenen Stellen im Code passieren kann, z.B. abhängig von einer Bedingung.

Ein Beispiel hierfür ist eine verkettete Liste, bei der alle Element dynamisch auf dem Heap alloziert werden. Bezogen auf die Allokation würde es in diesem Szenario mindestens eine Stelle geben und zwar der Bereich des Codes, in dem ein neues Listenelement erzeugt wird. Bei der Deallokation eines Elements muss zumindest unterschieden werden, ob ein Element aus der Liste entfernt wird oder ob die gesamte Liste, zum Ende des Programms, dealloziert werden soll, wobei letzteres als ein Sonderfall angesehen werden kann. Ein weiterer Aspekt auf den geachtet werden muss ist, dass nach dem Löschen eines Elements der Liste, alle Referenzen auf dieses Element invalide sind, d.h. es darf nicht mehr auf den Speicher zugegriffen werden.

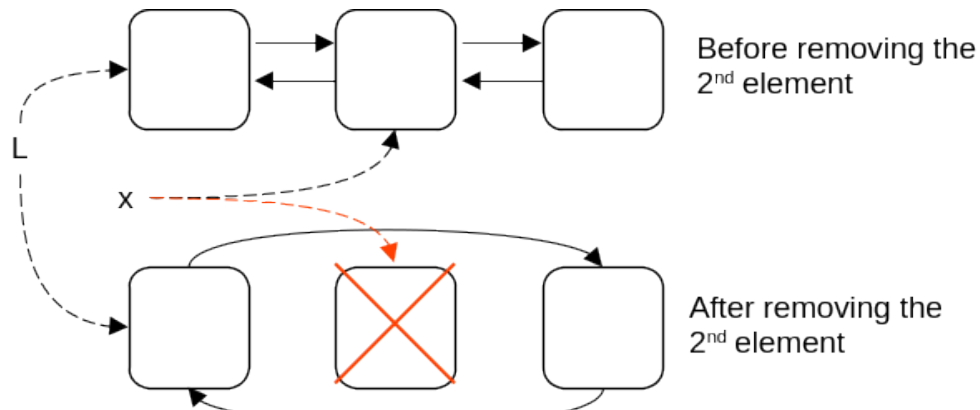


Abbildung 4: Beispiel einer verketteten Liste

```
// chapter03/linked-list.zig
const std = @import("std");

// Element einer verketteten Liste mit zwei (optionalen)
// Zeigern auf das nächste und vorherige Element.
const Elem = struct {
    prev: ?*Elem = null,
    next: ?*Elem = null,
    i: u32,

    pub fn new(i: u32, allocator: std.mem.Allocator) !*@This() {
        var self = try allocator.create(@This());
        self.i = i;
        return self;
    }
};

pub fn main() !void {
    // Hier fassen wir die Erzeugung eines neuen Allokator-Typen
    // und dessen Instanziierung in einen Ausdruck zusammen...
    var gpa = std.heap.GeneralPurposeAllocator(.{}){};
    // ... und binden dann den Allokator an eine Konstante.
    const allocator = gpa.allocator();

    // Als nächstes erzeugen wir (manuell) eine verkettete
    // Liste mit drei Elementen.
    var lhs = try Elem.new(1, allocator);
    defer allocator.destroy(lhs);
    var middle = try Elem.new(2, allocator);
    var rhs = try Elem.new(3, allocator);
    defer allocator.destroy(rhs);

    lhs.next = middle;
    middle.prev = lhs;

    middle.next = rhs;
```

```

rhs.prev = middle;

// Die Konstante L referenziert das erste Element aus
// der Liste (`lhs`).
const L = lhs;
// Ausgehend vom ersten Element geben wir alle Werte der
// Liste nacheinander aus.
std.log.info("Wert von lhs: {d}", .{L.i});
std.log.info("Wert von middle: {d}", .{L.next?.i});
std.log.info("Wert von rhs: {d}", .{L.next?.next?.i});

// Die Konstante `x` referenziert das mittlere Element...
const x = middle;
std.log.info(
  "Wert von Elem referenziert von x vor deallokation: {d}",
  .{x.i});

// ... welches als nächstes aus der Liste (manuell) entfernt wird.
lhs.next = middle.next;
rhs.prev = middle.prev;
allocator.destroy(middle);
// ... ab diesem Zeitpunkt ist `x` ein dangling Pointer und
// darf nicht mehr dereferenziert werden...

// ... wir machen es trotzdem aber der Wert des referenzierten
// Objekts ist ab diesem Zeitpunkt undefiniert.
std.log.info(
  "Wert von Elem referenziert von x NACH deallokation: {d}",
  .{x.i});
}

```

In folgendem Beispiel erzeugen wir eine verkettete Liste mit drei Elementen. Als nächstes definieren wir eine Konstante L, die das erste Element der Liste lhs referenziert und geben nach und nach, durch Dereferenzierung, die Werte aller drei Elemente aus. Da weder lhs, middle noch rhs bis zum Zeitpunkt der Ausgabe dealloziert wurden, ist die Dereferenzierung erlaubt. Wie Sie vielleicht gesehen haben ist die dritte Ausgabe, die letzte Stelle an der L dereferenziert wird. Damit überschreitet die Lifetime von L zwar theoretisch die Lifetime von lhs, middle und rhs, in der Praxis spielt dies für die Korrektheit der Anwendung jedoch keine Rolle. Anders sieht es mit der Konstanten x aus. Zwischen der ersten und zweiten Dereferenzierung von x wird middle aus der Liste entfernt und dealloziert. Damit ist x ab der Deallokation von middle ein dangling Pointer was zum Problem wird, da x später noch einmal dereferenziert wird. Auch nach der Deallokation zeigt x weiterhin auf eine existierende Speicherstelle, jedoch wurde diese durch die Deallokation freigegeben, d.h. die Daten an dieser Stelle sind undefiniert. Das hält Zig jedoch nicht davon ab den referenzierten Speicher als Instanz von Elem zu interpretieren, was sich auch in der Kommandozeilenausgabe widerspiegelt.

```

$ ./linked-list
info: Wert von lhs: 1

```

```

info: Wert von middle: 2
info: Wert von rhs: 3
info: Wert von Elem ... von x vor deallokation: 2
info: Wert von Elem ... von x NACH deallokation: 2863311530

```

Diese Art von Speicherfehler wird als Use-After-Free bezeichnet und kann unter den richtigen Bedingungen von Angreifern genutzt werden, den Kontrollfluss des Programms zu übernehmen, sollte es für den Angreifer möglich sein die Speicherstelle zu kontrollieren.

Etwas das Sie sich grundsätzlich Angewöhnen sollten ist, Referenzen die Sie nicht mehr benötigen zu invalidieren. Eine Möglichkeit dies zu tun ist anstelle eines Pointers einen optionalen Pointer zu verwenden.

```

var x: ?*Elem = middle;
// ...
lhs.next = middle.next;
rhs.prev = middle.prev;
allocator.destroy(middle);
x = null; // wir invalidieren x direkt nach der Deallokation

```

Häufige Fehler

Im Gegensatz zu speichersicheren (engl. memory safe) Sprachen wie etwa Rust, bietet Zig einige Fallstricke, die das Leben als Entwickler schwer machen können, aber nicht müssen! In diesem Abschnitt werden wir uns einige davon näher anschauen und ich zeige Ihnen, wie Zig Ihnen dabei hilft sicheren Code zu schreiben.

Speicherzugriffsfehler (Access Errors)

Speicherzugriffsfehler sind eine typische Fehlerquelle und haben in der Vergangenheit schon zu einigen Exploits geführt. Allgemein handelt es sich dabei um einen Oberbegriff für Programmierfehler, durch die unzulässig auf eine Speicherstelle zugegriffen wird. Zu den Speicherzugriffsfehlern gehören der Buffer-Overflow, Buffer-Over-Read, Invalid-Page-Fault und Use-After-Free. Den Use-After-Free haben wir uns im Kontext von Lifetimes schon angeschaut, an dieser Stelle möchte ich Ihnen die verbleibenden Fehler etwas näher bringen.

Buffer Overflow/ Over-Read

Der Buffer-Overflow und Buffer-Over-Read sind nah miteinander verwandt, kommen jedoch jeweils mit ihren eigenen Problemen. Beim Buffer-Overflow wird Speicher außerhalb eines validen Objekts beschrieben. Dies ist meist das Resultat der unzureichenden Überprüfung der Grenzen eines Objekts, z.B. eines Arrays. Ein klassisches Beispiel ist ein Array, dass an einer Stelle indiziert wird die außerhalb der Grenzen des Arrays liegt.

```

var x: [10]u8 = .{0} ** 10;
x[10] = 1; // Index 10 ist out-of-bounds -> buffer overread!

```

Diese Art von Fehlern können genutzt werden um Daten von naheliegenden Objekten oder sogar Adressen zu überschreiben. In der Vergangenheit wurde diese Art von Fehler von Angreifern genutzt um Schadcode in Anwendungen einzuschleusen, die Rücksprungsadresse zu überschreiben und so die Kontrolle über den Prozess zu übernehmen. Moderne Compiler injizieren deswegen

sogenannte Stack-Canaries, einen randomisierten Wert der von einem Angreifer nicht erraten werden kann und der vor der Rückkehr in die aufrufende Funktion überprüft wird, in Stack-Frames die potenziell von einem Buffer-Overflow betroffen sein könnten. Ist ein Stack-Frame von einem Buffer-Overflow betroffen und wurde die Rücksprungadresse überschrieben, so bedeutet dies, dass auch der Canary überschrieben wurde. In diesem Fall wird der Prozess zur Sicherheit beendet. Wie das Zig-Zen so schön sagt: „Laufzeit-Crashes sind besser als Bugs“ (engl. „Runtime crashes are better than bugs“).

Im obigen Fall wird der Buffer-Overflow schon zur Compile-Zeit erkannt, da Arrays eine zur Compile-Zeit bekannte Länge besitzen (Zig-Zen: „Compile errors are better than runtime crashes“).

```
error: index 10 outside array of length 10
  x[10] = 1;
```

Allozieren wir den Speicher jedoch dynamisch so kann der Compiler uns nicht mehr vor unserem Fehler bewahren.

```
var x = try allocator.alloc(u8, 10);
x[10] = 1;
```

Da wir in Zig jedoch in den meisten Fällen mit Slices arbeiten und nicht mit rohen Zeigern wird der Buffer-Overflow zumindest zur Laufzeit erkannt und der Prozess beendet (Zig-Zen: „Runtime crashes are better than bugs“).

```
thread 7940 panic: index out of bounds: index 10, len 10
buffer-overflow.zig:12:6: 0x1037424 in main (buffer-overflow)
  x[10] = 1;
```

Invalid Page Fault

Zusammenfassung

Bei dem Arbeiten mit Referenzen bzw. Slices sind zwei Fragen von essenzieller Bedeutung: Umschließt die Lifetime des referenzierten Objekts die der Referenz und wenn nein, habe ich dafür gesorgt, dass nach dem Ende der Lifetime des Objekts nicht mehr versucht wird auf dieses zuzugreifen. Fall Sie diese Fragen nicht beantworten können besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sich Speicherfehler in Ihren Code einschleichen.