



Marco Amann • Joachim Baumann • Marcel Koch

Rust

Konzepte und Praxis
für die sichere Anwendungsentwicklung

dpunkt.verlag



Marco Amann hat Softwaretechnik studiert und arbeitet bei Digital-Frontiers als Consultant. Er ist als einer der Experten der Digital Frontiers für das Thema Rust verantwortlich und hat Schwerpunkte in den Bereichen systemnaher Programmierung und robuster Systeme.



Dr. Joachim Baumann ist Management Consultant und Geschäftsführer der Digital Frontiers GmbH & Co. KG. Er verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung in der IT, als Entwickler, Architekt, Projektleiter, Scrum-Master und Berater und beschäftigt sich seit dem Jahr 2000 mit agilen Vorgehensweisen. Sein Wissen gibt er gerne in Form von Büchern, aber auch als Hochschuldozent und in Schulungen weiter, er ist aber auch immer noch Committer in Open-Source-Projekten.



Marcel Koch vermittelt – ob zwischen Technologien oder Menschen. Er versteht es, in verschiedenste Technologien und Gebiete einzutauchen, die Vorteile zu nutzen und die Essenzen zu erklären. Als Kommunikationscoach setzt er auf gewaltfreie Kommunikation, Transaktionsanalyse und Radical Candor. Als Softwarearchitekt baut er auf konservative Technologien, wie zum Beispiel Kotlin oder Spring, und ergänzt diese bedarfsgerecht mit neueren wie WebAssembly oder Rust. www.marcelkoch.net

Papier
plus⁺
PDF.

Zu diesem Buch – sowie zu vielen weiteren dpunkt.büchern – können Sie auch das entsprechende E-Book im PDF-Format herunterladen. Werden Sie dazu einfach Mitglied bei dpunkt.plus⁺:

www.dpunkt.plus

**Marco Amann · Joachim Baumann ·
Marcel Koch**

Rust

**Konzepte und Praxis für die sichere
Anwendungsentwicklung**



dpunkt.verlag

Marco Amann · Joachim Baumann · Marcel Koch

Lektorat: René Schönfeldt

Projektkoordinierung: Anja Weimer

Copy-Editing: Annette Schwarz, Ditzingen

Satz: Veronika Schnabel

Herstellung: Stefanie Weidner

Umschlaggestaltung: Helmut Kraus, www.exclam.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN:

Print 978-3-86490-878-1

PDF 978-3-96910-614-3

ePub 978-3-96910-615-0

mobi 978-3-96910-616-7

1. Auflage 2022

Copyright © 2022 dpunkt.verlag GmbH

Wieblinger Weg 17

69123 Heidelberg

Hinweis:

Dieses Buch wurde auf PEFC-zertifiziertem Papier aus nachhaltiger
Waldwirtschaft gedruckt. Der Umwelt zuliebe verzichten wir zusätzlich auf die
Einschweißfolie.



Schreiben Sie uns:

Falls Sie Anregungen, Wünsche und Kommentare haben, lassen Sie es uns wissen: hallo@dpunkt.de.

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung der Texte und Abbildungen, auch auszugsweise, ist ohne die schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und daher strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

Es wird darauf hingewiesen, dass die im Buch verwendeten Soft- und Hardware-Bezeichnungen sowie Markennamen und Produktbezeichnungen der jeweiligen Firmen im Allgemeinen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz unterliegen.

Alle Angaben und Programme in diesem Buch wurden mit größter Sorgfalt kontrolliert. Weder Autor noch Verlag können jedoch für Schäden haftbar gemacht werden, die in Zusammenhang mit der Verwendung dieses Buches stehen.

5 4 3 2 1 0

Inhaltsübersicht

Vorwort

Danksagung

1 Rust - Einführung

Teil I Die Sprache

2 Syntax von Rust-Programmen

3 Variablen

4 Datentypen

5 Musterabgleich

6 Funktionen

7 Einführung in das Speichermodell

8 Generische Datentypen

9 Objektorientierte Konzepte

10 Problembehandlung in Rust

11 Standarddatentypen von Rust

12 Makros

13 Strukturierung von Projekten

14 Zusammenfassung

Teil 2 Fortgeschrittene Techniken

15 Ownership im Detail

16 Nebenläufige und parallele Programmierung

17 Testen

18 Webprogrammierung

19 Microservices

20 Systemnahe Programmierung

21 Spracherweiterungen (Language Bindings)

22 WebAssembly

23 Zusammenfassung und Ausblick

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Danksagung

1 Rust - Einführung

1.1 Warum Rust?

1.1.1 Rust und der Speicher

1.1.2 Rust und Objektorientierung

1.1.3 Rust und funktionale Programmierung

1.1.4 Rust und Parallelverarbeitung

1.2 Ein Beispielprogramm

1.3 Installation von Rust

1.3.1 Installation von rustup

1.4 IDE-Integration

1.4.1 Rust Language Server und Rust-Analyzer

1.4.2 Visual Studio Code

1.4.3 IntelliJ IDEA

1.4.4 Eclipse

1.4.5 Welche Entwicklungsumgebung ist die beste?

1.5 Unsere erste praktische Erfahrung

- 1.6 Das Build-System von Rust
 - 1.6.1 Die Struktur von Rust-Programmen
 - 1.6.2 Die Erzeugung eines Packages
 - 1.6.3 Übersetzen und Ausführen eines Packages
 - 1.6.4 Verwaltung von Abhängigkeiten
 - 1.6.5 Workspaces
 - 1.6.6 Weitere nützliche Befehle von Cargo
- 1.7 Entwicklung der Sprache und Kompatibilität

Teil I Die Sprache

2 Syntax von Rust-Programmen

- 2.1 Programmstruktur
- 2.2 Anweisungsblöcke
- 2.3 Rangfolge von Operatoren
- 2.4 Gängige Kontrollflussstrukturen
 - 2.4.1 Das If-Konstrukt
 - 2.4.2 Das Loop-Konstrukt
 - 2.4.3 Die While-Schleife
 - 2.4.4 Die For-Schleife

3 Variablen

- 3.1 Veränderbare und nicht veränderbare Variablen
- 3.2 Weitere Arten der Variablendefinition
 - 3.2.1 Globale Variablen
 - 3.2.2 Konstanten

4 Datentypen

- 4.1 Skalare Datentypen
 - 4.1.1 Ganzzahlen
 - 4.1.2 Fließkommazahlen
 - 4.1.3 Logische Werte
 - 4.1.4 Zeichen
 - 4.1.5 Typkonvertierung
- 4.2 Tupel und Felder
 - 4.2.1 Tupel
 - 4.2.2 Felder
- 4.3 Strukturierte Datentypen
 - 4.3.1 Unterstützung bei der Initialisierung
- 4.4 Tupelstrukturen
- 4.5 Aufzählungstypen
 - 4.5.1 In Aufzählungen eingebettete Datentypen

5 Musterabgleich

- 5.1 Das Match-Konstrukt
 - 5.1.1 Einfache Verwendung
 - 5.1.2 Rückgabewerte
 - 5.1.3 Zusätzliche Bedingungen für das Muster
 - 5.1.4 Zuweisungen im Muster
- 5.2 Andere Datentypen und das Match-Konstrukt
- 5.3 Weitere Musterabgleiche
 - 5.3.1 Das »If Let«-Konstrukt
 - 5.3.2 Das »While Let«-Konstrukt
 - 5.3.3 Das Makro matches!

6 Funktionen

6.1 Referenzen auf Funktionen

7 Einführung in das Speichermodell

7.1 Stack und Heap

7.2 Rust und der Speicher

7.3 Das Modell für skalare Datentypen

7.3.1 Wechsel von Gültigkeitsbereichen

7.3.2 Aufruf von Funktionen

7.4 Das allgemeinere Modell

7.4.1 Wechsel von Gültigkeitsbereichen

7.4.2 Aufruf von Funktionen

7.5 Referenzen in Rust

7.5.1 Lesereferenzen auf nicht veränderbare Variablen

7.5.2 Lesereferenzen auf veränderbare Variablen

7.5.3 Veränderbare Referenzen

7.6 Verwendung von Variablen und Referenzen

7.7 Vor- und Nachteile des Modells

7.7.1 Nachteile

7.7.2 Vorteile

8 Generische Datentypen

8.1 Typparameter in Datenstrukturen

8.2 Typparameter in Funktionen

8.3 Typparameter in Aufzählungstypen

9 Objektorientierte Konzepte

9.1 Methoden

9.1.1 Die Verwendung von Typparametern

9.2 Module und Sichtbarkeiten

9.2.1 Importieren von Elementen aus anderen Namensräumen

9.2.2 Hierarchische Module

9.2.3 Erweiterte Sichtbarkeiten

9.2.4 Aufteilung in mehrere Dateien

9.3 Traits

9.3.1 Erzeugung und Verwendung

9.3.2 Abhängigkeit von anderen Traits

9.3.3 Verwendung in Funktionen

9.3.4 Verwendung mit generischen Datentypen

9.3.5 Einschränkung von Typparametern mit Traits

9.3.6 Polymorphe Rückgabetypen

9.3.7 Assoziierte Datentypen

9.3.8 Die Größe von Instanzen

9.3.9 Dynamische Trait-Objekte

9.3.10 Traits, die Rust bereitstellt

9.3.11 Der Trait Drop

9.3.12 Das Attributsmakro Derive

10 Problembehandlung in Rust

10.1 Der Datentyp Option

10.2 Der Datentyp Result

10.3 Interoperabilität von Option und Result

10.4 Der ?-Operator

10.5 Nicht behebbare Fehler

10.6 Bewertung

11 Standarddatentypen von Rust

11.1 Kollektionen

11.1.1 Sequenzdatentypen

11.1.2 Map-Datentypen

11.1.3 Mengen

11.1.4 Verschiedene Datentypen in Kollektionen

11.1.5 Der Datentyp Slice

11.1.6 Zeichenketten

11.2 Der Datentyp Range

11.3 Closures

11.3.1 Verwendung als anonyme Funktion

11.3.2 Der umgebende Gültigkeitsbereich

11.4 Iteratoren

11.4.1 Erzeugung von Iteratoren

11.4.2 Erste Verwendung von Iteratoren

11.4.3 Weitere Verarbeitungsmöglichkeiten

11.4.4 Erzeugung von Iteratoren aus Iteratoren

11.4.5 Erzeugung neuer Kollektionen

12 Makros

12.1 Bekannte Makros

12.2 Beispiele für weitere Makros

12.2.1 Assertionen

12.2.2 Makros für Zeichenketten

12.3 Arten von Makros

12.4 Ein eigenes deklaratives Makro

13 Strukturierung von Projekten

13.1 Konfiguration des Packages

14 Zusammenfassung

Teil 2 Fortgeschrittene Techniken

15 Ownership im Detail

15.1 Näheres zum bekannten Ownership-Modell

15.1.1 Move, Copy, Clone, Borrow

15.1.2 Lifetimes

15.1.3 Die Sicherheit von Rust

15.2 Smart Pointer

15.2.1 Box

15.2.2 Rc

15.2.3 RefCell und Cell

15.2.4 Zusammenfassung

15.3 Vergleich mit anderen Sprachen ohne Ownership

16 Nebenläufige und parallele Programmierung

16.1 Grundlagen

16.2 Channels

16.3 Shared State

16.3.1 Arc

- 16.3.2 Send und Sync
 - 16.3.3 Mutex
 - 16.3.4 RwLock
- 16.4 Einfache Parallelisierung mit Rayon
- 16.5 Sicherheit trotz Parallelität
- 16.6 Async/Await
- 16.7 Zusammenfassung
- 17 Testen**
 - 17.1 Arten von Tests
 - 17.1.1 Unit-Tests
 - 17.1.2 Integration-Tests
 - 17.1.3 UI-Tests
 - 17.1.4 Testpyramide, Nachwort
 - 17.2 Rust, Cargo und Tests
 - 17.2.1 Platzierung von Testcode
 - 17.3 Ausführung
 - 17.3.1 Erwartungen der Testergebnisse (Assertions)
 - 17.3.2 Benennung der Testfunktionen
 - 17.4 Mocking
 - 17.4.1 Erste Schritte ohne Framework
 - 17.4.2 Einsatz eines Frameworks: Mockall
 - 17.4.3 Abschließendes zu Mockall
 - 17.5 Snapshot-Tests mit insta
 - 17.6 Der Rust-Compiler sieht viel, aber nicht alles
 - 17.6.1 Überläufe (Overflows)

- 17.6.2 OutOfBoundsCheck
- 17.6.3 Stockungen (Deadlocks)
- 17.7 Fazit

18 Webprogrammierung

- 18.1 Einführung
 - 18.1.1 Warum Rust für Webprogrammierung?
 - 18.1.2 Warum nicht Rust für Webprogrammierung?
 - 18.1.3 Themen in diesem Kapitel
 - 18.1.4 Eine kleine Warnung vorab
- 18.2 Grundlagen von Rocket
 - 18.2.1 Handler
 - 18.2.2 Return Types
 - 18.2.3 Ein Blick hinter die Kulissen
 - 18.2.4 Shared State
- 18.3 Das Kontaktformular
 - 18.3.1 Routen
 - 18.3.2 Formulare
 - 18.3.3 Datenbankverbindung
 - 18.3.4 Was macht Rust bis hierher so besonders?
 - 18.3.5 Middleware
 - 18.3.6 Guards
 - 18.3.7 Fairings oder Guards?
 - 18.3.8 Serverside-Templates
 - 18.3.9 Testen mit Rocket
- 18.4 Betrieb
 - 18.4.1 Logging

- 18.4.2 Konfiguration
 - 18.4.3 Deployment
- 18.5 Fazit

19 Microservices

- 19.1 Eignet sich Rust für Microservices?
- 19.2 Aufteilung der Webanwendung in Microservices
- 19.3 Vorbereitungen
 - 19.3.1 Build mit Docker
 - 19.3.2 Cross Compilation
- 19.4 Die Microservices
 - 19.4.1 Anfragen annehmen: der »Web«-Service
 - 19.4.2 Gemeinsame Funktionalität
 - 19.4.3 Speichern der Anfragen in der Datenbank
 - 19.4.4 Mail verschicken
- 19.5 Betrieb
 - 19.5.1 Metriken und Monitoring
 - 19.5.2 Tracing
 - 19.5.3 Skalierung
- 19.6 Zusammenfassung

20 Systemnahe Programmierung

- 20.1 Unsafe Rust
 - 20.1.1 Pointer-Grundlagen
 - 20.1.2 Unsafe in std: RefCell als Beispiel
- 20.2 Systemaufruf
 - 20.2.1 Systemaufruf in Handarbeit

- 20.2.2 Systemaufruf mit dem Crate libc
- 20.3 Integration von externen Bibliotheken in Rust
 - 20.3.1 Fallstricke
- 20.4 Performanceuntersuchung
 - 20.4.1 Erste Schritte
 - 20.4.2 Benchmarks
 - 20.4.3 Untersuchungen
 - 20.4.4 Optimierung
- 20.5 Zusammenfassung

21 Spracherweiterungen (Language Bindings)

- 21.1 Java
 - 21.1.1 Grundsätzliches – Java ruft Rust auf
 - 21.1.2 j4rs
 - 21.1.3 Zusammenfassung
- 21.2 Node.js
- 21.3 Fazit

22 WebAssembly

- 22.1 Aktueller Stand von WebAssembly
 - 22.1.1 Im Browser
 - 22.1.2 Außerhalb des Browsers – ein Anfang
- 22.2 Rust & WASM
 - 22.2.1 Warum Rust für WASM?
 - 22.2.2 Im Browser: wasm-bindgen & wasm-pack
 - 22.2.3 Auf dem Server
- 22.3 Fazit

23 Zusammenfassung und Ausblick

23.1 Zusammenfassung

23.2 Ausblick

Index

Vorwort

Zielgruppe für dieses Buch

Dieses Buch richtet sich an Entwickler, die über den Tellerrand normaler Programmierung hinausschauen wollen. Mit Rust bietet sich die Möglichkeit, eine neue und interessante Programmiersprache kennenzulernen, die einiges anders macht als die gängigen Programmiersprachen.

Notwendige Vorkenntnisse für das Buch

Sie sollten als Entwickler bereits Erfahrung in der objektorientierten Programmierung haben. Wissen um typische Konzepte gerade objektorientierter Sprachen sollte vorhanden sein. Wir erklären auch keine gängigen Programmierkonstrukte wie `if` oder `while`, sondern setzen die dafür notwendigen Kenntnisse voraus.

Was dieses Buch nicht enthält

Dieses Buch wiederholt weder die leicht zu findenden Tutorials noch die exzellente Online-Dokumentation zu

Rust. Es ist auch keine Einführung für Menschen, die das Programmieren erst lernen wollen (das Buch wäre sonst mehr als doppelt so dick).

Was dieses Buch enthält

Unser Ziel ist es, Sie mit den Inhalten dieses Buchs in die Lage zu versetzen, auch komplexere praktische Programme mit Rust zu schreiben.

Natürlich hoffen wir außerdem, dass Sie genau wie wir die Freude dabei verspüren, Programme zu schreiben, bei denen Speicherlecks der Vergangenheit angehören.

Zum Schluss ist die Auseinandersetzung mit dem Ownership-Modell von Rust eine interessante Erfahrung, die uns auch in anderen Sprachen zu besseren Programmierern macht.

Begleitrepository

Zu diesem Buch haben wir ein git-Repository eingerichtet, in dem Sie viele Codebeispiele direkt zum Klonen und Ausprobieren finden:

[*https://rust-buch.de/repository*](https://rust-buch.de/repository)

Danksagung

Das Schreiben eines Buches ist, wenig überraschend, ein langwieriges und aufwendiges Unterfangen, das unsere Familien sehr stark unterstützt haben. Und dies, obwohl wir dadurch weniger aufmerksam waren, mehr Zeit mit unverständlichen Dingen zubrachten, ständig »Oh, da muss ich auch noch dran denken ...« vor uns hinhimmeln und generell leicht geistig abwesend waren. Vielen Dank für die Geduld und das Verständnis.

Marco, Joachim

Auch wenn dies eher unüblich ist, möchten wir ganz explizit unserer Firma Digital Frontiers danken, die mit ihrem ungewöhnlichen Arbeitsmodell das Schreiben eines Buches in der Arbeitszeit ermöglicht und derartige inhaltliche Arbeit stark fördert.

Marcel

Ich möchte mich bei meinen beiden Co-Autoren Marco und Joachim für ihr Wissen, ihren Humor und ihre Geduld bedanken. Das Privatleben gab mir nicht immer so viel Zeit frei, wie wir uns alle gewünscht hätten.

Ich danke ausdrücklich meiner Frau Johanna und meinem Sohn Niklas. Wie oben schon erwähnt, mussten sie

sehr oft auf mich verzichten. Vielleicht lest Ihr, Niklas und Larissa, das Buch auch mal im Informatikgeschichtsunterricht.

Ihr drei seid meine Sonne und Hoffnung!

1 Rust - Einführung

In diesem Kapitel werfen wir einen ersten Blick auf Rust-Programme, betrachten die Installation von Rust und der Sprachunterstützung in verschiedenen Entwicklungsumgebungen, sodass wir möglichst schnell praktische Schritte mit der Sprache unternehmen, ein Beispielprogramm schreiben und mit dem Rust-eigenen Build-System übersetzen und starten können.

1.1 Warum Rust?

Rust ist eine moderne Sprache, die sehr stark auf Geschwindigkeit und Parallelverarbeitung ausgelegt ist. Vielfach wird Rust als Systemprogrammiersprache und Ersatz für C dargestellt, der Anwendungsbereich ist aber sehr viel breiter. Betrachten wir ein paar der interessanten Eigenschaften von Rust.

1.1.1 Rust und der Speicher

Das absolute Alleinstellungsmerkmal ist die Art, wie Rust mit Speicher umgeht. Rust kann garantieren, dass durch die Verwaltung des Speichers zur Übersetzungszeit keine Fehler zur Laufzeit auftreten können. Damit braucht Rust auch keinen Garbage Collector. Das verhindert

unbeabsichtigte Unterbrechungen im Programmablauf, um den Speicher aufzuräumen. Wir haben also nicht nur korrektere Programme, die schneller laufen, sie verhalten sich auch deterministischer.

Um dies zu erreichen, wird für jeden Wert ein Eigentümer festgelegt. Dies kann ein primitiver Wert sein oder eine beliebig komplexe Struktur. Ein Wert lebt, solange der Eigentümer lebt.

Der Eigentümer kann wechseln, und für den Zugriff auf ein Objekt können Referenzen ausgeliehen werden (*Borrowing*). Ausgeliehene Referenzen sind im Normalfall Lesereferenzen, es kann aber alternativ auch maximal eine Schreib-/Lese-Referenz auf einen Wert definiert werden. Dies impliziert, dass wir keine aktive Lesereferenz haben. Die Beschränkung auf eine einzige schreibende Instanz sorgt bei Neulingen meist für Überraschungen, hat aber den großen Vorteil, dass es keine undefinierten Zustände durch gleichzeitiges Schreiben oder nicht synchronisiertes Lesen geben kann.

Dieses *Ownership* genannte Konzept ist extrem mächtig, braucht aber zum vollständigen Verinnerlichen etwas Zeit und Übung. Wir werden dies in [Abschnitt 7.2](#) kennenlernen und in [Kapitel 15](#) im Detail beleuchten.

1.1.2 Rust und Objektorientierung

Rust ist eine Programmiersprache, die mit der Kapselung von Daten und Funktionen und Methoden auf diesen Daten objektorientierte Konzepte unterstützt.

Rust erreicht dies durch die Einführung von Modulen, die private und öffentliche Daten und Funktionen enthalten. Polymorphismus wird durch das Konzept der *Traits* erreicht, die inzwischen in vielen anderen Programmiersprachen wie Kotlin oder Scala auch verwendet werden. Eine

vergleichbare Funktionalität gibt es in Java seit der Version 8 mit den Default-Methoden in Interface-Spezifikationen.

Rust bietet allerdings anders als die gewohnten objektorientierten Sprachen keine Vererbung. Dies mag im ersten Moment überraschen und ist eine Abkehr vom normalen objektorientierten Denken, hat aber gute Gründe.

Aus konzeptioneller Sicht ist es problematisch, dass wir bei der Vererbung nicht kontrollieren können, welche Teile unserer Elternklasse wir erben möchten. Dies kann dazu führen, dass wir in abgeleiteten Klassen Funktionalität haben, die dort nicht gewollt ist.

Das praktischere Argument ist aber, dass durch Verzicht auf Vererbung ein hoher Aufwand zur Identifikation der richtigen auszuführenden Methode/Funktion wegfällt. Dies macht Rust-Programme deutlich laufzeiteffizienter.

Wir werden uns mit objektorientierten Konzepten in [Kapitel 9](#) auseinandersetzen.

1.1.3 Rust und funktionale Programmierung

Zur Unterstützung funktionaler Programmierung bietet Rust *Closures*, anonyme Funktionen, die auf ihre Umgebung zur Zeit der Definition zugreifen können. Dieses vielseitige Konstrukt findet sich in mehr und mehr Sprachen und erlaubt eine sehr elegante Kapselung von Funktionalität und Daten.

Zusammen mit Iteratoren, die die Verarbeitung von Sammlungen von Daten kapseln, erlauben Closures sehr mächtige funktionale Abstraktionen. Iteratoren und Closures werden wir in [Kapitel 11](#) kennenlernen.

1.1.4 Rust und Parallelverarbeitung

Rust bietet eine direkte Abstraktion der Thread-Funktionalität des unterliegenden Betriebssystems. Dies

sorgt für den geringstmöglichen Mehraufwand zur Laufzeit, beschränkt aber natürlich die Flexibilität in der Verwendung von Threads auf die Unterstützung durch das unterliegende System. Bei Bedarf können allerdings auch Thread-Module verwendet werden, die eine unabhängige und damit flexiblere Implementierung anbieten. Dies erlaubt uns, von Fall zu Fall zu entscheiden, ob wir die größere Flexibilität oder den geringeren Speicherbedarf bevorzugen. Während die Entscheidung in vielen Fällen in Richtung der Flexibilität getroffen werden wird, gibt es eingeschränkte Umgebungen (wie zum Beispiel Mikro-Controller), in denen die Möglichkeit der expliziten Wahl sehr vorteilhaft ist.

Viele der Probleme, die bei der normalen Programmierung von paralleler Verarbeitung zu sehr hoher Komplexität und damit zu schwer auffindbaren Fehlern führen, finden wir in Rust nicht. Dies entsteht durch das *Ownership*-Modell, das dafür sorgt, dass der Compiler problematische Stellen im Quelltext sehr früh identifizieren und damit entfernen kann. Das heißt nicht, dass Rust alle Probleme im Zusammenhang mit Parallelprogrammierung löst. Es erlaubt uns aber, uns auf die wirklich schwierigen Probleme zu konzentrieren.

Threads in Rust können kommunizieren, indem sie Nachrichten in verschiedene Kanälen senden oder aus diesen empfangen. Zusätzlich können sie Teile ihres Zustands geschützt durch eine Mutex-Abstraktion mit anderen Threads teilen.

Parallelprogrammierung in Rust ist sehr mächtig, und wir werden uns in [Kapitel 16](#) eingehend damit beschäftigen.

1.2 Ein Beispielprogramm

Als ein erstes Beispiel, um Ihren Appetit für Rust zu wecken, betrachten wir ein kleines Programm, das bereits viele