

Evaluation von Bun 1.0: Eine Verbesserung der JavaScript-Laufzeitumgebung?

Seminararbeit von
Ansgar Lichter

an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik

Universität:	Hochschule Karlsruhe
Studiengang:	Informatik
Professor:	Prof. Dr.-Ing. Vogelsang
Bearbeitungszeitraum:	01.10.2023 - 04.12.2023

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterthesis selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

(Ort, Datum)

(Ansgar Lichter)

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Node.js	4
2.2 Bun	7
2.3 Performance von Software	9
3 Titel 3	12
3.1 Section 3.1	12
4 Titel 4	13
4.1 Section 4.1	13
5 Titel 5	14
5.1 Section 5.1	14
Bibliography	15
A Anhang Kapitel 1	17

Abbildungsverzeichnis

Figure 1.1	Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitumgebungen [4] . . .	2
Figure 2.1	Node.js Architektur	4
Figure 2.2	Comparison of the Ecosystems of Bun and Node.js	8
Figure 2.3	Node.js Architektur	10

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

PoC Proof of Concept

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Die kontinuierliche Evolution von Softwaretechnologien und -umgebungen hat einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung und Leistung von Anwendungen. Kürzlich wurde die Version 1.0 der JavaScript Laufzeitumgebung Bun veröffentlicht, die vielversprechende Verbesserungen in Bezug auf die Leistung im Vergleich zu Node.js ankündigt [1].

JavaScript ist eine Programmiersprache, die vor allem im Kontext der Web-Entwicklung verwendet wird [2]. Aktuell erfreut sich JavaScript großer Beliebtheit. In einer Umfrage an Entwickler von Stack Overflow wurden mehr als 89.000 Entwickler befragt. JavaScript ist zum 11. Jahr in Folge die am häufigsten verwendete Programmiersprache. Mehr als 63% der befragten Entwickler haben JavaScript als beliebteste Technologie gewählt. Bei den professionellen Entwicklern ist der Anteil mit mehr als 65% sogar noch höher. Außerdem ist TypeScript, eine stark typisierte Programmiersprache, die auf JavaScript aufbaut, unter den Teilnehmer auch beliebt. Ca. 39% aller Entwickler und ca. 44% der professionellen Entwickler verwenden auch TypeScript. Damit ist TypeScript die 4. beliebteste Programmiersprache. [3] Daraus folgt, dass das Ökosystem von JavaScript eine hohe Praxisrelevanz besitzt.

JavaScript wird nicht nur für die Entwicklung im Frontend, sondern auch für die Entwicklung im Backend verwendet, ungefähr 3% der weltweit bekannten Server verwenden eine Laufzeitumgebung, die JavaScript ausführen kann. [5] Um JavaScript auf einem Server ausführen zu können, wird eine Laufzeitumgebung benötigt. Wie Abbildung 1.1 zeigt, ist Node.js die am weitesten verbreitete Laufzeitumgebung. In der gezeigten Umfrage zum Zustand von JavaScript beantworteten ca. 71% von 30.000 befragten Entwickler, dass sie Node.js als Laufzeitumgebung regelmäßig verwenden.



Abbildung 1.1: Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitumgebungen [4]

Nur ca. 9% der befragten Entwickler verwenden Deno und ca. 3% Bun als eine Alternative zu Node.js. [4]

1.2 Zielsetzung

Aktuell ist Node.js die Laufzeitumgebung, die am weitesten verbreitet ist. Dennoch gibt es immer wieder neue Laufzeitumgebungen für JavaScript, die versuchen Node.js zu verdrängen. Eine mögliche Alternative ist Bun, das am 9. September 2023 in der Version 1.0 veröffentlicht worden ist. Die Entwickler von Bun werben mit Features wie erheblicher Performancesteigerung, eleganten Schnittstellen und einer angenehmen Entwicklererfahrung. [1]

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, die Version 1.0 der JavaScript Laufzeitumgebung Bun einer eingehenden Evaluierung zu unterziehen. Konkret wird untersucht, ob die in den Ankündigungen versprochene signifikante Leistungssteigerung im Vergleich zu Node.js tatsächlich existiert und reproduzierbar ist. Darüber hinaus wird geprüft, inwiefern bestehende Projekte auf der Basis von Node.js mit Bun kompatibel sind. Die Ergebnisse dieser Arbeit können Entwicklern bei der Entscheidung helfen, ob sie auf Bun 1.0 migrieren sollten, und sie dabei unterstützen, die Leistung ihrer bestehenden Projekte zu verbessern. Insgesamt zielt diese Untersuchung darauf ab,

Klarheit über die Versprechungen von Bun 1.0 zu schaffen und Entwicklern fundierte Informationen für ihre Entscheidungsfindung zur Verfügung zu stellen. Dies spiegelt sich in den folgenden Leitfragen wider:

- Welche konkreten Leistungsverbesserungen können in Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js festgestellt werden, und wie lassen sie sich quantifizieren?
- Inwiefern sind Projekte auf der Basis von Node.js kompatibel mit Bun? Wie schwierig gestaltet sich die Migration?
- Welche Herausforderungen und potenziellen Vorteile ergeben sich bei der Verwendung von Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js für Entwickler und Projekte?

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel schreiben

einen Thread und erstellt nicht für jede neue Anfrage einen neuen Thread. Sobald eine Applikation gestartet wird, wird in dem einzigen Thread der Node.js-Prozess gestartet. Die V8 Engine optimiert den Maschinencode zusätzlich an häufig benötigten Stellen, wobei dies nicht sofort geschieht, da die Übersetzung in Maschinencode aufgrund der Just-in-Time-Kompilierung zeitsensitive Aufgabe darstellt. Darüber hinaus ist in der Engine ein Garbage Collector integriert, der nicht mehr verwendete Objekte löscht. [8]

Für weitere Aufgaben setzt Node.js auf Bibliotheken, die fertige und etablierte Lösungsansätze für häufig benötigte Aufgaben zur Verfügung stellen. Nur für Aufgaben, für die es keine etablierte Bibliothek gibt, werden eigene Implementierungen verwendet. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten vorgestellt. [8]

Node.js Bindings

Node.js Bindings, auch bekannt als "Node.js Addons", schaffen die Möglichkeit C- oder C++-Quellcode in Node.js zu integrieren. Entwickler können Erweiterungen in nativem Code erstellen und in ihren Anwendungen in JavaScript nutzen. Dies ermöglicht die Nutzung von Systemfunktionalitäten. Dies wird beispielsweise für den Zugriff auf das Dateisystem im Modul "fs" verwendet. Das Modul "fs" ist in der Standard-API von Node.js enthalten. Darin bietet Node.js viele Lösungen für häufig benötigte Aufgaben, um die Entwicklung zu vereinfachen. Diese sind global im gesamten Anwendungscode verfügbar. Zu den globalen Objekten gehören beispielsweise "console" für die Ausgabe von Informationen in der Konsole und "Buffer" für den Umgang mit binären Daten. In der API ist beispielsweise das Modul "fs" für den Zugriff auf das Dateisystem oder "http", um den Umgang mit dem HTTP-Protokoll zu vereinfachen. [OpenJSFoundation.] Die Module selbst sind in JavaScript geschrieben. D. h. der Kern von Node.js liegt in C (Libuv) und C++ (V8 Engine) vor, die übrigen Komponenten sind in der Sprache der Plattform geschrieben. [8] Allerdings ist in der Standard-API keine Unterstützung für TypeScript enthalten. Hierzu muss der TypeScript Compiler separat installiert werden. [6]

Event Loop

Node.js verwendet eine eventgesteuerte Architektur. Anstatt den Quellcode linear auszuführen, werden definierte Events ausgelöst, für die zuvor Callback-Funktionen registriert wurden. Dieses Konzept wird genutzt, um eine hohe Anzahl von asynchronen Aufgaben zu bewältigen. Um dabei den einzelnen Thread der Anwendung nicht zu blockieren, werden Lese- und Schreiboperationen an den Event Loop ausgelagert. Wenn auf externe Ressourcen zugegriffen werden muss, leitet der Event

Loop die Anfrage weiter, und die registrierte Callback-Funktion gibt die Anfrage an das Betriebssystem weiter. In der Zwischenzeit kann Node.js andere Operationen ausführen. Das Ergebnis der externen Operation wird dann über den Event Loop zurückgeliefert. [8]

Während der Laufzeit werden viele Events erzeugt und in einer Message Queue, der Event Queue, nacheinander gespeichert. Node.js nutzt FIFO und beginnt demnach mit der Verarbeitung der ältesten Events und arbeitet sich durch die Queue, bis keine Events mehr vorhanden sind. [9]

Libuv

Der Event Loop von Node.js basiert ursprünglich auf der Bibliothek libev. Diese ist in C geschrieben und für ihre hohe Leistung und umfangreichen Features bekannt. Allerdings stützt sich libev auf native UNIX-Funktionen, die unter Windows auf andere Weise verfügbar sind. Daher dient Libuv als Abstraktionsebene zwischen Node.js und den darunter liegenden Bibliotheken für den Event Loop, um die Laufzeitumgebung auf allen Plattformen nutzen zu können. Libuv verwaltet alle asynchronen I/O-Operationen, einschließlich Dateisystemzugriffe und asynchrone TCP- und UDP-Verbindungen. [8]

Darüber hinaus bringt Node.js den Node Package Manager (NPM) mit sich. Dieser Paketmanager ist entscheidend für den Erfolg von Node.js, da es im September 2022 mehr als 2,1 Millionen Pakete in diesem Ökosystem gibt. Es gibt somit ein Paket für nahezu alle Anwendungsfälle. Ursprünglich wurde NPM entwickelt, um Abhängigkeiten in Projekten zu verwalten, wird aber mittlerweile auch als Werkzeug für JavaScript im Frontend unterstützt. [6] Der NPM ist nicht Teil des Executables von Node.js, wird bei der Installation häufig mitgeliefert [8].

Zusammenfassend zeichnet sich Node.js durch eine eventgesteuerte Architektur und durch ein nicht blockierendes Modell für Ein- und Ausgabeoperationen aus, was es leichtgewichtig und effizient macht. Dies hat verschiedene Vor- und Nachteile.

Zu den Vorteilen gehören eine hohe Performance durch die Nutzung der V8 JavaScript Engine und die Plattformunabhängigkeit. Eine weitere Stärke ist die große und aktive Community an Entwicklern. Dank der Popularität gibt es viele etablierte Lösungsansätze, die den Entwicklungsprozess beschleunigen und vereinfachen. [6] Node.js ermöglicht die Verwendung der JavaScript-Sprache sowohl auf der Server- als auch auf der Clientseite. Dies vereinfacht die Entwicklung von Full-Stack-Anwendungen und erleichtert Entwicklern den Einstieg. [2] Das effiziente nicht blockierende I/O-Modell

von Node.js ermöglicht es, mehrere gleichzeitige Anfragen effizient zu verarbeiten und eignet sich daher gut für anwendungsspezifische Aufgaben, die viele gleichzeitige Verbindungen erfordern.

Allerdings existieren auch Nachteile bei der Verwendung von Node.js. Das Single-Threaded-Modell kann bei rechenintensiven oder CPU-lastigen Aufgaben zu Engpässen führen, da es nur einen Hauptthread für die Ausführung von Code gibt [10]. Bei komplexen Anwendungen kann die Verwaltung von Callbacks und Promises zur Bewältigung von asynchronem Code kompliziert werden.

Ein weiterer Nachteil ist, dass Node.js im Vergleich zu einigen anderen Laufzeitumgebungen über eine begrenzte Standardbibliothek verfügt, sodass Entwickler häufig auf externe Module und Pakete zurückgreifen müssen. Darüber hinaus kann die Qualität einiger NPM-Pakete variieren, und schlecht gewartete Module können zu Kompatibilitätsproblemen und Sicherheitsrisiken führen.

Insgesamt ist Node.js eine leistungsfähige und vielseitige Laufzeitumgebung, die sich gut für bestimmte Anwendungsfälle eignet, insbesondere wenn es darum geht, skalierbare und asynchrone Anwendungen zu entwickeln.

Quelle einfügen

Skalierbarkeit?

Quelle einfügen

Quelle einfügen

Quelle einfügen

2.2 Bun

Bun ist ein Open Source Toolkit für JavaScript. Dieses kombiniert verschiedene wichtige serverseitige Komponenten, um eine leistungsstarkes Paket zur Verfügung zu stellen. Bun ist auf macOS und Linux für die produktive Nutzung freigegeben. Unter Windows steht aktuell nur eine experimentelle Version zur Verfügung, deren Performance noch nicht optimiert worden ist. Als Alternative kann über das Windows Subsystem für Linux die veröffentlichte Linux-Version genutzt werden. [1] Ursprünglich ist Bun als ein persönliches Freizeitprojekt von Jared Sumner gestartet. Mittlerweile hat es sich als wettbewerbsfähige Alternative zu etablierten Technologien in der Webentwicklung etabliert. [11]



Abbildung 2.2: Comparison of the Ecosystems of Bun and Node.js

Abbildung 2.2 zeigt das Ökosystem von Bun im Vergleich zu Node.js. Im Toolkit von Bun sind folgende Komponenten enthalten: eine Laufzeitumgebung für JavaScript, ein Paketmanager wie NPM (siehe Kapitel 2.1) oder Yarn, ein Transpiler wie Babel, ein Build-Tool wie Webpack, Bibliotheken zum Testen wie Jest oder Vitest und integrierte Unterstützung für TypeScript. [1] Bun strebt an, das Rundum-sorglos-Tool zu sein, damit alle benötigten Funktionalitäten im Kontext von JavaScript nativ verfügbar sind. Gleichzeitig sollen dadurch die Abhängigkeiten einer Software auf Basis von Bun reduziert werden. [12] In Node.js ist nur die Laufzeitumgebung enthalten, die anderen Komponenten müssen separat installiert werden. [8] Dies bietet allerdings mehr Flexibilität bei der Auswahl der gewünschten Tools. Bun ist in Zig geschrieben [12]. Zig ist eine systemnahe Programmiersprache wie C

Quellen für
Abbildung
oder wird das
aus dem Text
ersichtlich?

und C++, die sich vor allem auf Einfachheit und Klarheit für ein besseres Verständnis konzentriert [13]. Die Entwickler haben sich aufgrund sehr guten Performance und des Speichermanagements für Zig entschieden. Anstatt der V8 Engine von Google verwendet Bun die JavaScriptCore Engine [12]. Diese ist die Engine für WebKit, die unter anderem in Apple's Safari-Browser genutzt wird [14]. In Kombination mit Zig sorgt die JavaScriptCore Engine für die bessere Performance von Bun. Dies ist auf die Architektur der JavaScriptCore Engine mit 3 Just-In-Time-Kompilern und Interpreter. Dadurch kann die Engine den Quellcode noch besser optimieren. So verbessert sich die Ausführungszeit des Quellcodes mit Bun. [15] Darüber hinaus ermöglicht Zig mit dessen manuellem Speichermanagement und Klarheit im Kontrollfluss und Allokieren von Speicher weitere Verbesserungen der Effizienz. [12] Zusätzlich führen die beiden Komponenten noch zu drastisch reduzierten Startzeiten [12]. Das ist vor allem im Bereich des Serverless Computing ein enormer Vorteil gegenüber anderen Alternativen. Denn dies hilft die Skalierbarkeit einer Software zu verbessern, indem neue Knoten schneller hinzugezogen werden können. [16]

Node.js bietet viele Module, globale Objekte und Standard-Web-APIs an (siehe Kapitel 2.1). Bun möchte eine nahtlose Integration mit Node.js anbieten. Dazu haben die Entwickler verbesserte Versionen für viele dieser Objekte implementiert. Hierzu zählen beispielsweise:

- Standard-Web-API: fetch, Request, Response,
- Module: http, https, path,
- Globale Objekte: toa, atob. [12]

Allerdings existieren auch viele Module und globale Objekte, für die die Unterstützung teilweise oder komplett fehlt, zum Beispiel assert oder http2 [12]. Daraus folgt, dass die Kompatibilität von bestehenden Projekten auf Basis von Node.js von den verwendeten Objekten und Modulen abhängt.

2.3 Performance von Software

Um eine qualitativ hochwertige Software zu entwickeln, genügt es nicht, lediglich die funktionalen Anforderungen zu erfüllen. Entwickler tragen die Verantwortung, die Anforderungen an eine Applikation, sowohl die funktionalen als auch die nichtfunktionalen Aspekte, in vollem Umfang zu erfüllen. Die Qualität einer Software besteht darin, in welchem Maße die Software die expliziten und impliziten Bedürfnisse seiner Stakeholder zufriedenstellt und so Mehrwehrt bietet. Diese Bedürfnisse werden im

Qualitätsmodell nach ISO / IEC 25010 dargestellt. [17]



Abbildung 2.3: Node.js Architektur [17]

Abbildung 2.3 zeigt die 8 Charakteristika der Software-Qualität nach ISO / IEC 25010: Funktionalität, Performance, Kompatibilität, Benutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Wartbarkeit und Portierbarkeit. Der Standard bietet ein Framework für die Bewertung der Qualität einer Software an. Er hilft so Unternehmen ihre Software-Produkte zu verbessern und alle Teilbereiche zu beachten, indem der Standard als Leitfaden vom Identifizieren der Anforderungen bis zur Qualitätskontrolle der Software unterstützt. [18]

Eigene Abbildung auf der Basis der Leseprobe von ISO selbst

Performance definiert sich im IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology wie folgt:

"The degree to which a system or component accomplishes its designated functions within given constraints, such as speed, accuracy, or memory usage" [.]

Demnach beschreibt Performance die Reaktion eines Systems auf die Durchführung einer Aktion über einen definierten Zeitraum. Um die Performance einer Software bestimmen zu können, stellt ISO / IEC 25010 3 Charakteristiken zur Verfügung (siehe Abbildung 2.3), die in den folgenden Absätzen beschrieben werden.

Zeitverhalten

Das Zeitverhalten beschreibt das Maß, in dem die Reaktions- Verarbeitungszeiten und Durchsatzraten eines Software-Produkts bei der Ausführung definierten Anforderungen entsprechen [18]. Der Fokus liegt hier auf einer schnellen Reaktion der Software, um die definierten Vorgaben für die Performance einzuhalten. Das Zeitverhalten kann durch die Latenz und den Durchsatz genauer spezifiziert werden. Die Latenz definiert einen zeitlichen Intervall, in dem die Software eine Antwort auf die Anfrage

liefern muss. Dieses Intervall wird in einem Zeitfenster durch eine minimale und maximale Zeitangabe definiert. Die Zeitangaben können absolut oder relativ in Bezug auf ein Event angegeben werden. Sobald die Reaktionszeit die maximale Zeitangabe überschreitet, erfüllt die Software die Latenzanforderung nicht. Die Anzahl an abgeschlossenen Antworten auf eine Anfrage innerhalb eines Beobachtungsintervalls beschreibt den Durchsatz. Dadurch kann die Verarbeitungsleistung (Processing Rate) der Software abgeleitet werden. Für eine zuverlässige Angabe, ist es empfohlen mehrere Zeitfenster zu beobachten. Denn es kann sein, dass eine Software 120 Anfragen innerhalb 1 Stunde bearbeiten kann. Dennoch könnte das System versagen, wenn 40 dieser Anfragen innerhalb von 3 Minuten abgearbeitet werden müssen. [19]

Bessere Quelle
suchen

Ressourcennutzung

Das Maß, in dem die Menge und Art der Ressource, die ein Produkt bei der Ausführung seiner Funktionalitäten beansprucht, den Anforderungen entsprechen, entspricht der Ressourcennutzung [18]. Es geht um die effiziente Verwaltung der verfügbaren Ressourcen. Dazu zählen die CPU, der Arbeitsspeicher, die Bandbreite des Netzwerks, der Speicherplatz auf der Festplatte und viele mehr. Die wichtigsten Metriken sind die CPU-Auslastung, der Speicherbedarf sowohl im RAM als auch auf der Festplatte. [19]

Bessere Quelle
suchen

Kapazität

Die Kapazität entspricht dem Maß, in dem die maximalen Grenzen eines Parameters einer Software den Anforderungen entsprechen [18]. Dadurch wird bestimmt, ob das System unter Spitzenlast funktionsfähig bleibt und dadurch gut skaliert. Hierbei müssen die Anforderungen an die maximale Latenz eingehalten werden. Daher kann die Kapazität alternativ auch als der maximal mögliche Durchsatz unter Einhaltung der gegebenen Latenzanforderungen bezeichnet werden. [19] Das umfasst mehrere Benutzer, die gleichzeitig auf die Software zugreifen, oder größere Transaktionen mit mehr Datenvolumen. Zu den Metriken zählen die maximale Anzahl an gleichzeitigen Benutzern und die maximale Anzahl an möglichen Transaktionen.

Bessere Quelle
suchen

Quelle

Kapitel 3

Titel 3

3.1 Section 3.1

TODO

Kapitel 4

Titel 4

4.1 Section 4.1

TODO

Kapitel 5

Titel 5

5.1 Section 5.1

TODO

Literatur

- [1] JARED SUMNER und PARTOVI, ASHCON, MCDONNEL, COLIN. *Bun 1.0*, 2023. URL: <https://bun.sh/blog/bun-v1.0>.
- [2] ETHAN BROWN. *Web development with Node and Express : leveraging the JavaScript stack*, Beijing, November 2019. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2295093>.
- [3] STACK OVERFLOW. *Stack Overflow Developer Survey 2023*, 2023. URL: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#overview>.
- [4] SACHA GREIF und ERIC BUREL. *State of JavaScript 2022*, 2022. URL: <https://2022.stateofjs.com/en-US/other-tools/>.
- [5] Q-SUCCESS, Hrsg. *Usage statistics of JavaScript for websites*, 2023. URL: <https://w3techs.com/technologies/details/pl-js>.
- [6] OPENJS FOUNDATION, Hrsg. *An introduction to the NPM package manager*, 2022. URL: <https://nodejs.dev/en/learn/an-introduction-to-the-npm-package-manager/>.
- [7] TEJAS KANERIYA. *What is node.js? where when & how to use it (with examples)*, 2022. URL: <https://www.simform.com/blog/what-is-node-js/>.
- [8] SEBASTIAN SPRINGER. *Node.js : das umfassende Handbuch*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Rheinwerk Computing. Bonn: Rheinwerk, 2022. ISBN: 9783836287654. URL: http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=992e511c601d4a5f84179bebaa309635&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- [9] OPENJS FOUNDATION. *Node.js API reference documentation*, o. J. URL: <https://nodejs.org/api/documentation.html>.
- [10] NIMESH CHHETRI. *A comparative analysis of node. js (server-side javascript)*. 2016. URL: https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/5/.

- [11] MATTHEW TYSON. *Explore bun.js: The all-in-one JavaScript runtime*, 2023. URL: [\url{https://www.infoworld.com/article/3688330/explore-bunjs-the-all-in-one-javascript-runtime.html}](https://www.infoworld.com/article/3688330/explore-bunjs-the-all-in-one-javascript-runtime.html).
- [12] BUN, Hrsg. *Offizielle Dokumentation*, URL: [\url{https://bun.sh/docs}](https://bun.sh/docs).
- [13] ZIG SOFTWARE FOUNDATION. *Why Zig When There is Already C++, D, and Rust?*, o. J. URL: [\url{https://ziglang.org/learn/why_zig_rust_d_cpp/#a-package-manager-and-build-system-for-existing-projects}](https://ziglang.org/learn/why_zig_rust_d_cpp/#a-package-manager-and-build-system-for-existing-projects).
- [14] APPLE, Hrsg. *WebKit*, o. J. URL: [\url{https://webkit.org/}](https://webkit.org/).
- [15] APPLE. *WebKit Documentation - JavaScriptCore*, o.J. URL: [\url{https://docs.webkit.org/Deep%20Dive/JSC/JavaScriptCore.html}](https://docs.webkit.org/Deep%20Dive/JSC/JavaScriptCore.html).
- [16] PAULO SILVA, DANIEL FIREMAN und THIAGO EMMANUEL PEREIRA. „Prebaking Functions to Warm the Serverless Cold Start“. In: *Proceedings of the 21st International Middleware Conference*. Middleware '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, S. 1–13. ISBN: 9781450381536. DOI: [\url{10.1145/3423211.3425682}](https://doi.org/10.1145/3423211.3425682).
- [17] ISO/IEC 25010, 2022. URL: [\url{https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010}](https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010).
- [18] ISO / IEC. *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*, URL: [\url{https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:25010:ed-1:v1:en}](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:25010:ed-1:v1:en).
- [19] MARIO BARBACCI u. a. „Quality Attributes“. In: (1995).

Anhang A

Anhang Kapitel 1