

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 | v |
| Tabellenverzeichnis | vi |
| Abkürzungsverzeichnis | vii |
| 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 als Qualitätsattribut | 9 |
| 3 Performanceanalyse | 12 |
| 3.1 Vorgehensweise | 12 |
| 3.2 Versuchsaufbau | 13 |
| 3.3 Implementierungen | 14 |
| 3.3.1 HTTP-Server | 15 |
| 3.3.2 Datei-Server | 16 |
| 3.3.3 Fibonacci | 17 |
| 3.4 Ergebnisse | 18 |
| 3.5 Fazit | 22 |
| 4 Kompatibilität von Projekten | 24 |
| 4.1 Express | 24 |

| | | |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 4.2 | NestJS | 27 |
| 4.3 | Fazit | 29 |
| 5 | Schlussbetrachtung | 31 |
| 5.1 | Fazit | 31 |
| 5.2 | Ausblick | 32 |
| | Bibliography | 34 |
| A | Ergebnisse des Benchmarks | 36 |
| A.1 | HTTP-Server | 36 |
| A.2 | Datei-Server | 40 |
| A.3 | Fibonacci-Folge | 50 |
| A.4 | Zusätzliche Diagramme | 54 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Figure 1.1 | Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitumgebungen [5] . . . | 2 |
| Figure 2.1 | Node.js Architektur | 4 |
| Figure 2.2 | Vergleich der Ökosysteme von Bun und Node.js | 8 |
| Figure 2.3 | Node.js Architektur | 10 |
| Figure 3.1 | HTTP-Server - Durchschnittliche Anzahl an Anfragen pro Sekunde | 18 |
| Figure 3.2 | Datei-Server - Durchschnittliche Latenz | 19 |
| Figure 3.3 | Datei-Server - Maximal verwendeter Arbeitsspeicher | 20 |
| Figure 3.4 | Datei-Server - CPU-Auslastung | 21 |
| Figure 3.5 | Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge | 22 |
| Figure A.1 | Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge | 54 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Table 3.1 | Hardware für die Performanceanalyse | 14 |
| Table A.1 | Messungen unter macOS (Bun) | 36 |
| Table A.2 | Messungen unter macOS (Node.js LTS) | 37 |
| Table A.3 | Messungen unter macOS (Node.js Latest) | 37 |
| Table A.4 | Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun) | 38 |
| Table A.5 | Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js LTS) | 38 |
| Table A.6 | Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js Current) | 39 |
| Table A.7 | Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun) | 40 |
| Table A.8 | Messungen unter Node.js LTS auf Ubuntu 23.10 | 42 |
| Table A.9 | Messungen unter Node.js Latest auf Ubuntu 23.10 | 43 |
| Table A.10 | Messungen unter Node.js Latest auf macOS | 45 |
| Table A.11 | Messungen unter Node.js LTS auf macOS | 47 |
| Table A.12 | Messungen unter Node.js Latest auf macOS | 49 |
| Table A.13 | Messungen unter MacOS | 51 |
| Table A.14 | Messungen unter Ubuntu 23.10 | 52 |

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 unter Entwicklern auf Stack Overflow, an der mehr als 89.000 Entwickler teilgenommen haben, wurde JavaScript zum 11. Jahr in Folge als die am häufigsten verwendete Programmiersprache identifiziert. Mehr als 63% der befragten Entwickler haben JavaScript als ihre favorisierte Technologie angegeben. Unter den professionellen Entwicklern liegt der Anteil noch höher, bei mehr als 65%. Zusätzlich ist TypeScript, eine stark typisierte Programmiersprache, die auf JavaScript aufbaut, ebenfalls beliebt [3]. Etwa 39% aller Entwickler und ungefähr 44% der professionellen Entwickler nutzen TypeScript. Somit ist TypeScript die viertbeliebteste Programmiersprache. [4] Dies unterstreicht die hohe Relevanz des JavaScript-Ökosystems.

JavaScript wird nicht nur für die Entwicklung im Frontend, sondern auch für die Entwicklung im Backend eingesetzt. Etwa 3% der weltweit bekannten Server nutzen eine Laufzeitumgebung, die JavaScript ausführen kann. [6] Wie aus Abbildung 1.1 ersichtlich ist, ist Node.js die am weitesten verbreitete Laufzeitumgebung. In der Umfrage zur aktuellen Verwendung von JavaScript gaben ca. 71% der 30.000 befragten Entwickler an, dass sie Node.js regelmäßig als Laufzeitumgebung verwenden. Lediglich ca. 9% der befragten Entwickler verwenden Deno, während ungefähr 3%

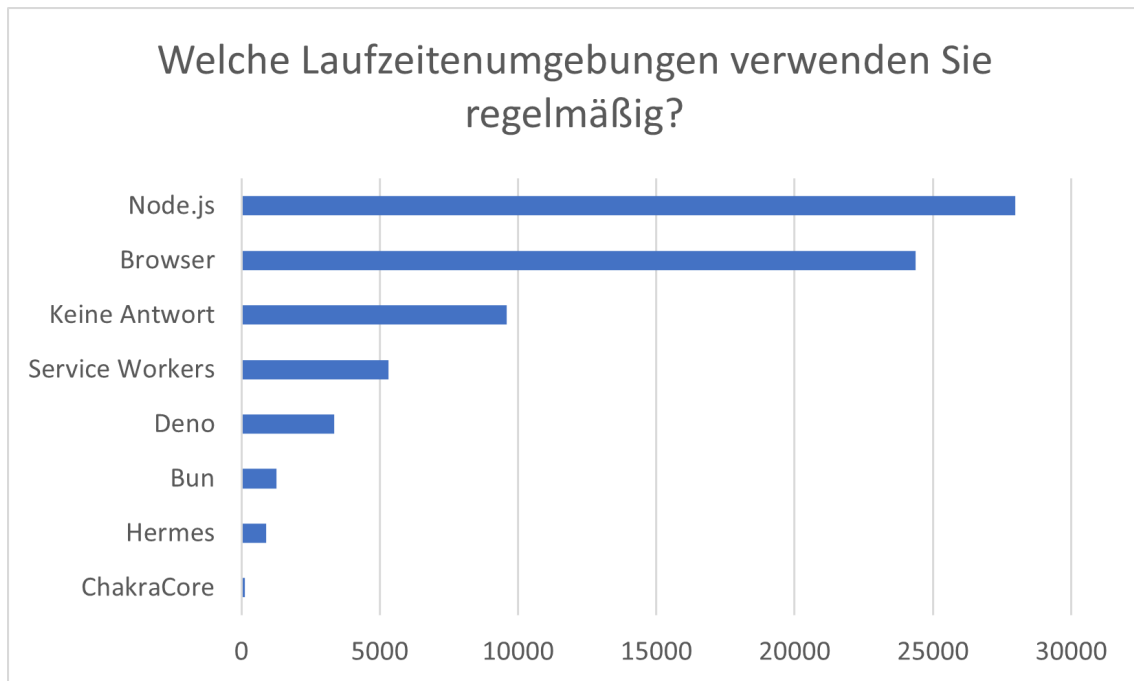


Abbildung 1.1: Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitemgebungen [5]

Bun als eine Alternative zu Node.js benutzen. [5]

1.2 Zielsetzung

Aktuell ist Node.js die am weitesten verbreitete Laufzeitemgebung für JavaScript. Dennoch erscheinen immer wieder neue Laufzeitemgebungen, die versuchen, Node.js zu verdrängen. Eine neue Alternative ist Bun, das am 9. September 2023 in der Version 1.0 veröffentlicht wurde. Die Entwickler von Bun werben mit Features wie erheblicher Leistungssteigerung, eleganten Schnittstellen und einer angenehmen Entwicklererfahrung. [1]

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, die Version 1.0 von 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 Node.js-Projekte 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

Im folgenden Kapitel vermittelt die Arbeit alle notwendigen theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis des Themas notwendig sind. Dafür werden Node.js und Bun detailliert betrachtet. Des Weiteren wird Performance als Qualitätsattribut von Software definiert, um Rückschlüsse für die Performance-Analyse zu ermöglichen.

Im dritten Kapitel werden die Performance von Bun und Node.js in ausgewählten Test-szenarien verglichen. Hierzu werden zuerst die Vorgehensweise, der Versuchsaufbau und die Implementierungen vorgestellt. Im Anschluss daran folgt die Präsentation der Ergebnisse und ein zusammenfassendes Fazit.

Das vierte Kapitel setzt den Fokus auf die Kompatibilität von Projekten auf Basis von Node.js. Der Fokus liegt auf den Frameworks Express und Nest.js. Um die Kompatibilität bewerten zu können, werden 2 Anwendungen beispielhaft migriert. Die Ergebnisse werden in einem Fazit eingeschätzt.

Das letzte Kapitel fasst die Kernaussagen der Arbeit zusammen und prüft sie vor dem Hintergrund der zuvor definierten Ziele. Abschließend wird in einem Ausblick dargelegt, welche ergänzenden Forschungsthemen verbleiben und welchen zukünftigen Nutzen die Ergebnisse mit sich bringen.

Kapitel 2

Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die benötigten Grundlagen vor, die für das Verständnis der darauffolgenden Kapitel notwendig sind. Hierzu zählen die Vorstellung von Node.js und Bun sowie weiterer Grundlagen zu Performanceanalysen.

2.1 Node.js

Node.js ist ein beliebtes Tool für eine große Varianz an Projekten, darunter leichtgewichtige Webservices, dynamische Webanwendungen und Tools für die Kommandozeile. Es handelt sich um eine Open Source, plattformunabhängige Laufzeitumgebung, die es ermöglicht JavaScript außerhalb des Browsers auszuführen. Node.js verwendet die V8 JavaScript Engine von Google. Diese ist in C++ geschrieben und wird von Google Chrome verwendet. Dies ermöglicht Node.js eine hohe Performance, weshalb Unternehmen wie Netflix und Uber Node.js in ihren Softwareprojekten einsetzen. [7]

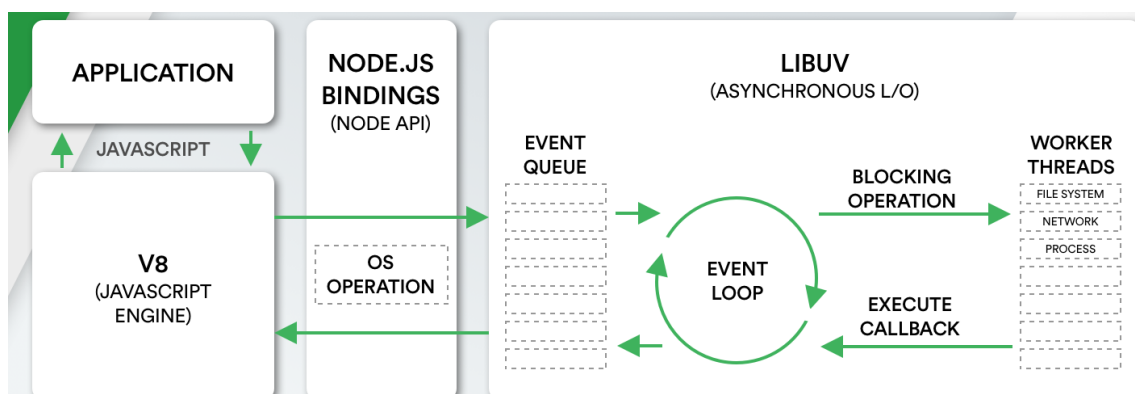


Abbildung 2.1: Node.js Architektur [8]

Abbildung 2.1 zeigt die Architektur von Node.js. Grundsätzlich nutzt Node.js nur

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 eine zeitsensitive Aufgabe darstellt. Darüber hinaus ist in der Engine ein Garbage Collector integriert, der nicht mehr verwendete Objekte löscht. [9]

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. [9]

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 neben dem Modul `"fs"` beispielsweise das Modul `"http"` enthalten, um den Umgang mit dem HTTP-Protokoll zu vereinfachen. [10] 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. [9] Allerdings ist in der Standard-API keine Unterstützung für TypeScript enthalten. Hierzu muss der TypeScript Compiler separat installiert werden. [7]

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. [9]

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. [11]

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. [9]

Node Package Manager (NPM)

Darüber hinaus bringt Node.js den 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. [7] Der NPM ist nicht Teil des Executables von Node.js, wird bei der Installation häufig mitgeliefert [9].

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. [7] 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 [12]. 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.

Quelle einfügen

Skalierbarkeit?

Quelle einfügen

Quelle einfügen

2.2 Bun

Bun ist ein Open Source Toolkit für JavaScript. Dieses kombiniert verschiedene serverseitige Komponenten, um eine leistungsstarkes Paket zur Verfügung zu stellen. Bun ist auf MacOS und Linux für die produktive Nutzung freigegeben. Die Version von Windows besitzt aktuell einen experimentellen Status und ist noch nicht für Performance optimiert. Alternativ kann auf Windows die veröffentlichte Linux-Version über das Windows Subsystem für Linux installiert 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. [13]

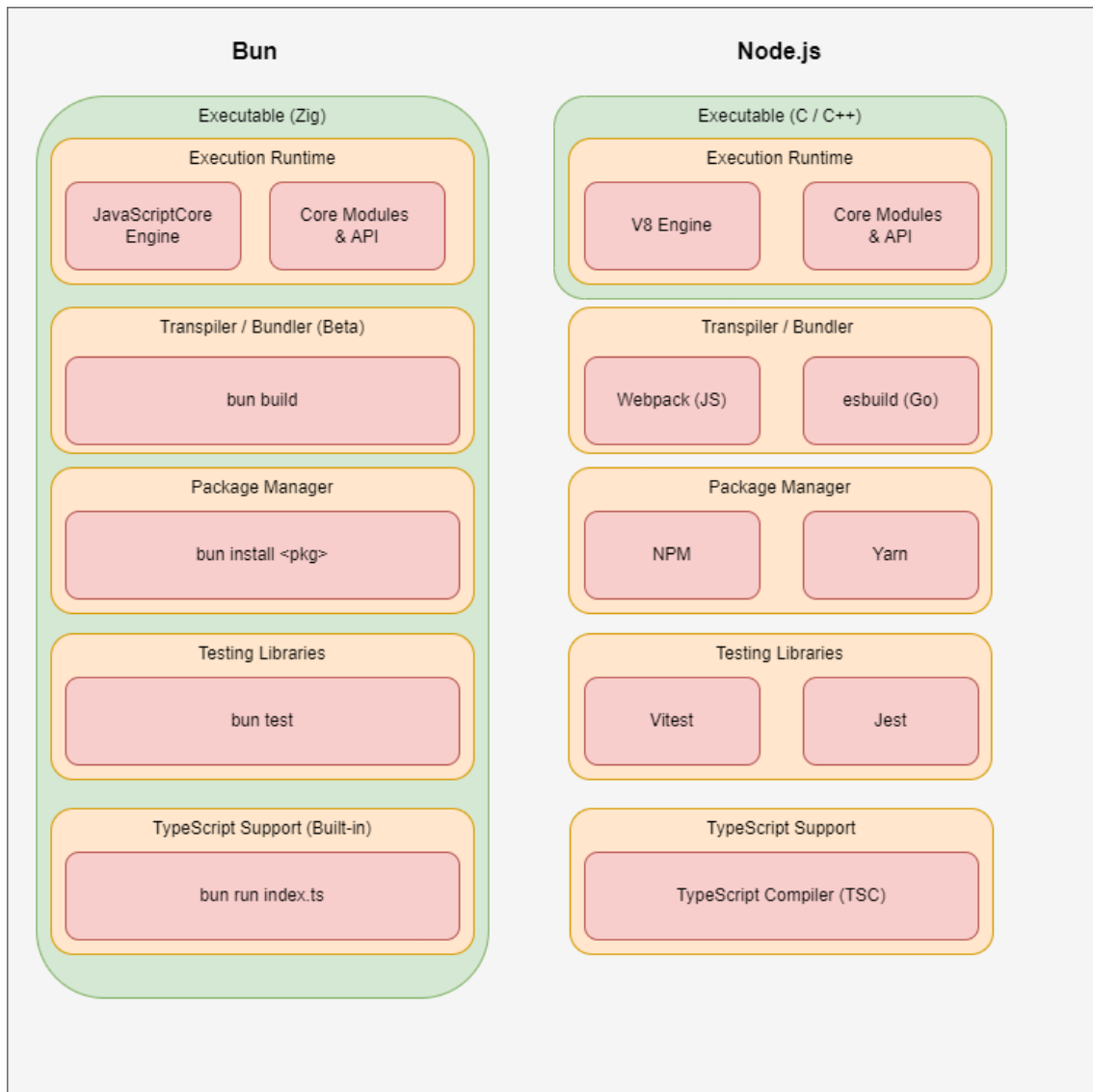


Abbildung 2.2: Vergleich der Ökosysteme von Bun und Node.js

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. [14] In Node.js ist nur die Laufzeitumgebung enthalten, die anderen Komponenten müssen separat installiert werden. [9] Dies bietet allerdings mehr Flexibilität bei der Auswahl der gewünschten Tools. Bun ist in Zig geschrieben [14]. 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 [15]. Die Entwickler haben sich aufgrund sehr guten Performance und des Speichermanagements für Zig entschieden. Zig ermöglicht mit dessen manuellem Speichermanagement, Klarheit im Kontrollfluss und beim Allokieren von Speicher weitere Verbesserungen der Effizienz. [14] Anstatt der V8 Engine von Google verwendet Bun die JavaScriptCore Engine [14]. Das ist die Engine für WebKit, das unter anderem in Apple's Safari-Browser genutzt wird [16]. In Kombination mit Zig sorgt die JavaScriptCore Engine für eine bessere Performance und zu drastisch reduzierten Startzeiten [14]. Dies ist auf die Architektur der JavaScriptCore Engine mit 3 Just-In-Time-Kompilern zurückzuführen. Dadurch kann die Engine den Quellcode noch besser optimieren. [17] Das ist vor allem im Bereich des Serverless Computing ein enormer Vorteil gegenüber anderen Alternativen. Die niedrigen Startzeiten helfen die Skalierbarkeit einer Software zu verbessern, indem neue Knoten schneller hinzugezogen werden können. [18]

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: btoa, atob. [14]

Allerdings existieren auch viele Module und globale Objekte, für die die Unterstützung teilweise oder komplett fehlen, zum Beispiel assert oder http2 [14]. Daraus folgt, dass die Kompatibilität von bestehenden Node.js-Projekten von den verwendeten Objekten und Modulen abhängt.

2.3 Performance als Qualitätsattribut

Um eine qualitativ hochwertige Software zu entwickeln, genügt es nicht, 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 Mehrwert bietet. Diese Bedürfnisse werden im Qualitätsmodell nach ISO / IEC 25010 dargestellt. [19]



Abbildung 2.3: Node.js Architektur [19]

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. [20]

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 [20]. 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. 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. [21]

Bessere Quelle
suchen

Ressourcennutzung

Das Maß, in dem die Menge und Art der Ressource, die ein Produkt bei der Ausführung seiner Funktionalitäten beansprucht, entspricht der Ressourcennutzung [20]. 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. [21]

Bessere Quelle
suchen

Kapazität

Die Kapazität entspricht dem Maß, in dem die maximalen Grenzen eines Parameters einer Software den Anforderungen entsprechen [20]. 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. [21] 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

Performanceanalyse

In diesem Kapitel wird die Performance von Bun ausführlich untersucht und mit Node.js verglichen. Hierbei liegt der Fokus darauf, die Leitfrage “Welche konkreten Leistungsverbesserungen können in Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js festgestellt werden, und wie lassen sie sich quantifizieren?” zu beantworten (siehe Kapitel 1). Zuerst wird die Vorgehensweise bei den Tests vorgestellt. Anschließend werden der verwendete Versuchsaufbau erläutert. Vor der Betrachtung der Ergebnisse folgt die Vorstellung der Beispielimplementierungen.

3.1 Vorgehensweise

Als Metriken für die Performance-Analyse werden die durchschnittliche Latenz, die Anzahl an HTTP-Anfragen pro Sekunde, der Anteil an erfolgreichen HTTP-Anfragen, die CPU-Auslastung und der maximal genutzte Arbeitsspeicher während der Ausführungszeit verwendet (siehe Kapitel 2.3). Um diese Metriken zu ermitteln, werden verschiedene Testszenarien mit unterschiedlichen Implementierungen betrachtet (siehe Kapitel 3.3). Die unterschiedlichen Implementierungen sind auf variierende APIs der Laufzeitumgebungen zurückzuführen. Diese ist notwendig, um die Leistung der Laufzeitumgebungen und nicht die Performance des Quellcodes zu bewerten.

Verifizieren, dass die Metriken dort inkludiert sind

Abkürzung einführen, falls in Theorie nicht geschehen

Zuerst erfolgt die Messung der grundlegenden Performance von HTTP-Servern in beiden Laufzeitumgebungen (siehe Kapitel 3.3.1). Dabei greifen 500 gleichzeitige Benutzer für 30 Sekunden auf den Server zu und erhalten einen kurzen Text als Antwort zurück. Dieses Szenario dient der Untersuchung der grundlegenden Netzwerkgeschwindigkeit beider Laufzeitumgebungen. Als nächstes wird ein Datei-Server verwendet, der jedem Aufrufer ein Bild zurückgibt (siehe Kapitel 3.3.2). Dieser Test wird für 50, 250, 500 und 1.000 gleichzeitige Nutzer über einen Zeitraum von 30

Sekunden durchgeführt. Die Last wird variiert, um die Server näher an ihre Grenzen zu bringen. Der letzte Testfall berechnet die Fibonacci-Folge für die Zahl 45, um die Leistung beider Laufzeitumgebungen bei rechenintensiven Aufgaben zu evaluieren (siehe Kapitel 3.3.3).

Um die Performance korrekt zu bestimmen, müssen geeignete Tools verwendet werden. In dieser Arbeit kommen folgenden Tools zum Einsatz:

- Bombardier Version 1.2.6,
- GNU Time.

Bombardier generiert die HTTP-Anfragen an die Server in den ersten beiden Test-szenarien. Mit diesem Tool kann die Dauer der Lasttests sowie die Anzahl der zu versendenden Anfragen konfiguriert werden. Außerdem lässt sich festlegen, wie viele gleichzeitige Benutzer simuliert werden. Nach dem Test liefert Bombardier durchschnittliche und maximale Werte für die Anzahl der Anfragen pro Sekunde und die Latenz, einschließlich der Standardabweichung. Zusätzlich schlüsselt das Tool die erhaltenen HTTP-Statuscodes auf. Dadurch kann der Anteil an erfolgreichen Anfragen bestimmt werden. Bombardier eignet sich aufgrund seiner detailreichen Aufgaben und seiner Performance. Es ist in Go geschrieben und verwendet das Paket “fasthttp“ anstelle der nativen HTTP-Implementierung von Go. Dadurch ist es ausreichend performant. Zur Erfassung der CPU-Auslastung und des maximal genutzten Arbeitsspeichers wird GNU Time verwendet. GNU Time ist auf Ubuntu bereits nativ verfügbar und daher gut geeignet. Auf MacOS wird eine entsprechende Portierung dieses Tools genutzt, um vergleichbare Daten zu erheben.

Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erzielen, werden alle Testszenarien für jede Laufzeitumgebung jeweils 5-mal wiederholt. Die Durchschnittswerte aus den gesammelten Daten reduzieren die Auswirkung einzelner Ausreißer.

3.2 Versuchsaufbau

Um eine konsistente und kontrollierte Umgebung für die Tests zu gewährleisten, werden diese auf spezifischer Hardware und Software durchgeführt. Das Ziel besteht darin, die Testergebnisse so reproduzierbar wie möglich zu gestalten. Dies gewährleistet zudem die Vergleichbarkeit zwischen Bun und Node.js, was die Quantifizierung der verwendeten Metriken ermöglicht.

Tabelle 3.1 zeigt die eingesetzte Hardware und die dazugehörigen Betriebssysteme. Dies dient der Verifikation, ob etwaige Performance-Verbesserungen auf eine spezifische Systemumgebung zurückzuführen sind. Die native Implementierung von Bun für

| Name | Desktop-PC | MacBook Pro |
|-----------------|----------------------------|-------------------|
| Prozessor | AMD Ryzen 7 2700 @ 3,6 GHz | Apple M1 Pro |
| Arbeitsspeicher | 32 GB DDR4-3200 | 16 GB LPDDR5-6400 |
| Betriebssystem | Ubuntu 23.10 | MacOS 14 Sonoma |

Tabelle 3.1: Hardware für die Performanceanalyse

Windows ist experimentell und ist für die Öffentlichkeit nicht zugänglich [22]. Daher ist es nicht möglich, die Funktionsweise von Bun unter Windows zu testen.

Die folgenden Versionen der betrachteten Frameworks werden eingesetzt:

- Bun Version 1.0.6 (Neuste Version¹)
- Node.js Version 18.18.2 (LTS¹)
- Node.js Version 21.0.0 (Neuste¹)

Die neuste Version von Bun wird für die Tests verwendet, da sie im Vergleich zur Version 1.0 bereits Fehlerkorrekturen enthält [1]. Bei der Analyse von Node.js werden zwei Versionen einbezogen. Einerseits die Version mit Long Term Support (LTS), da Node.js diese Version für die meisten Benutzer aufgrund des langfristigen Supports empfiehlt [11]. Andererseits die neuste Version von Node.js, da in Version 20 beispielsweise die neuste Version des URL-Parsers Ada eingeführt wurde. Alleine der aktualisierte URL-Parser verspricht signifikante Performance-Verbesserungen [23]. Zusätzlich enthält Version 21 weitere kleine Verbesserungen hinsichtlich der Performance [24].

Der Versuchsaufbau stellt sicher, dass die Performance-Tests auf aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse hinarbeiten und somit der Untersuchung der ersten Forschungsfrage (siehe Kapitel 1.2) dienen.

3.3 Implementierungen

Im Folgenden werden die für jedes Testszenario (siehe Kapitel 3.1) verwendeten Implementierungen vorgestellt.

¹Stand 14.10.2023

3.3.1 HTTP-Server

Um die grundlegende Performance von Netzwerkanfragen zu bestimmen, werden zwei einfache Programme verwendet. Die Latenz spiegelt die Latenz der betrachteten Laufzeitumgebungen wider, da die Tests auf demselben Endgerät stattfinden und somit keine Verzögerungen durch das Netzwerk auftreten. In Abbildung 3.1 ist der Quellcode für Bun dargestellt, während Abbildung 3.2 den Quellcode für Node.js zeigt.

```
1 Bun.serve({
2   port: 3000,
3   fetch(request) {
4     return new Response("Hello from Bun!");
5   },
6 });
```

Abbildung 3.1: HTTP-Server Bun

```
1 import http from "node:http";
2
3 http.createServer(function (request, response) {
4   response.write('Hello from Node.js!')
5   response.end();
6 }).listen(3000);
```

Abbildung 3.2: HTTP-Server Node.js

Um die Performance dieser Programme zu testen, werden mit Bombardier 500 gleichzeitige Benutzer für eine Dauer von 30 Sekunden simuliert, wie im Befehl in Abbildung 3.3 visualisiert.

```
1 bombardier -c 500 -d 30s http://localhost:3000
```

Abbildung 3.3: Bombardier HTTP-Server

Die Server werden mit der jeweiligen Laufzeitumgebung gestartet. Zur Ermittlung der CPU- und RAM-Auslastung wird GNU Time verwendet. Die Befehle zur Messung der CPU- und RAM-Auslastung sind in Ubuntu und MacOS in den Abbildungen 3.4 und 3.5 dargestellt.

```
1 /usr/bin/time -f "Execution Time: %e\nMaximum Resident Set Size (
  RSS): %M\nPercent of CPU This Job Got: %P" bun httpServer.js
```

Abbildung 3.4: CPU- und RAM-Messung auf Ubuntu

```
1 gtime -f "Execution Time: %e\nMaximum Resident Set Size (RSS): %M
  \nPercent of CPU This Job Got: %P" bun httpServer.js
```

Abbildung 3.5: CPU- und RAM-Messung auf MacOS

3.3.2 Datei-Server

Eine häufige Aufgabe von Web-Servern ist es, Bilder für das Frontend zur Verfügung zu stellen. Das Szenario wird gemessen, um die Performance von Zugriffen auf das Dateisystem in den Vergleich einzubeziehen.

Quelle?

Die Implementierungen für Bun und Node.js sind in den Abbildungen 3.6 und 3.7 dargestellt.

```

1  const basePath = "../data";
2
3  Bun.serve({
4    port: 3000,
5    fetch(request) {
6      const filePath = `${basePath}${new URL(request.url).pathname
7    }`;
8
9    try {
10     return new Response(Bun.file(filePath));
11   } catch (error) {
12     return new Response("File not found", {
13       status: 404
14     });
15   }
16 });

```

Abbildung 3.6: Datei-Server Bun

```

1  import { createReadStream } from "node:fs";
2  import http from "node:http";
3
4  const basePath = "../data";
5
6  http.createServer((request, response) => {
7    const filePath = `${basePath}${request.url}`;
8    const readStream = createReadStream(filePath);
9
10   readStream.on("open", () => {
11     response.setHeader("content-type", "image/png");
12     response.writeHead(200);
13
14     readStream.pipe(response);
15   });
16
17   readStream.on("error", () => {
18     response.writeHead(404, "Image not found");

```

```
19     response.end();
20   });
21   }).listen(3000);
```

Abbildung 3.7: Datei-Server Node.js

Mithilfe von Bombardier rufen beide Server dasselbe Bild aus dem Dateisystem ab. Falls dieses nicht gefunden wird, geben beide eine entsprechende Fehlermeldung zurück. Dieses Testszenario wird jeweils mit 50, 250, 500 und 1.000 gleichzeitigen Benutzern für eine Dauer von 30 Sekunden getestet (siehe Kapitel 3.1). Der Befehl für 50 gleichzeitige Benutzer ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Befehle zur Messung der CPU- und RAM-Auslastung unterscheiden sich nicht im Vergleich zum HTTP-Server (siehe Unterkapitel 3.3.1).

```
1 bombardier -c 500 -d 30s http://localhost:3000/example.png
```

Abbildung 3.8: Bombardier Datei-Server

3.3.3 Fibonacci

Als letztes Szenario wird die Fibonacci-Folge für die Zahl 45 berechnet, um die Leistung bei der Ausführung rechenintensiver Aufgaben zu bewerten. Hierfür nutzen beide Laufzeitumgebungen die in Abbildung 3.9 dargestellte Implementierung.

```
1  const fibonacci = (number) => {
2    if (number <= 0) {
3      return 0;
4    } else if (number <= 1) {
5      return 1;
6    } else if (number <= 2) {
7      return 2;
8    }
9
10   return fibonacci(number-1) + fibonacci(number-2);
11 };
12
13 console.log(fibonacci(45));
```

Abbildung 3.9: Berechnung der Fibonacci-Folge

Das Programm wird mit beiden Laufzeitumgebungen und GNU Time zur Erhebung der notwendigen Metriken ausgeführt. Abbildung 3.10 stellt dies beispielsweise für Node.js unter Ubuntu dar. Auf MacOS muss “/usr/bin/time“ durch “gtime“ ersetzt werden.


```
1 /usr/bin/time -f "Execution Time: %e\nMaximum Resident Set Size (RSS): %M\nPercent of CPU This Job Got: %P" node fibonacci.js
```

Abbildung 3.10: Messung der Fibonacci-Berechnung in Node.js unter Ubuntu

3.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testszenarien vorgestellt. Im Anschluss folgt die Diskussion über mögliche Konsequenzen.

HTTP-Server Performance

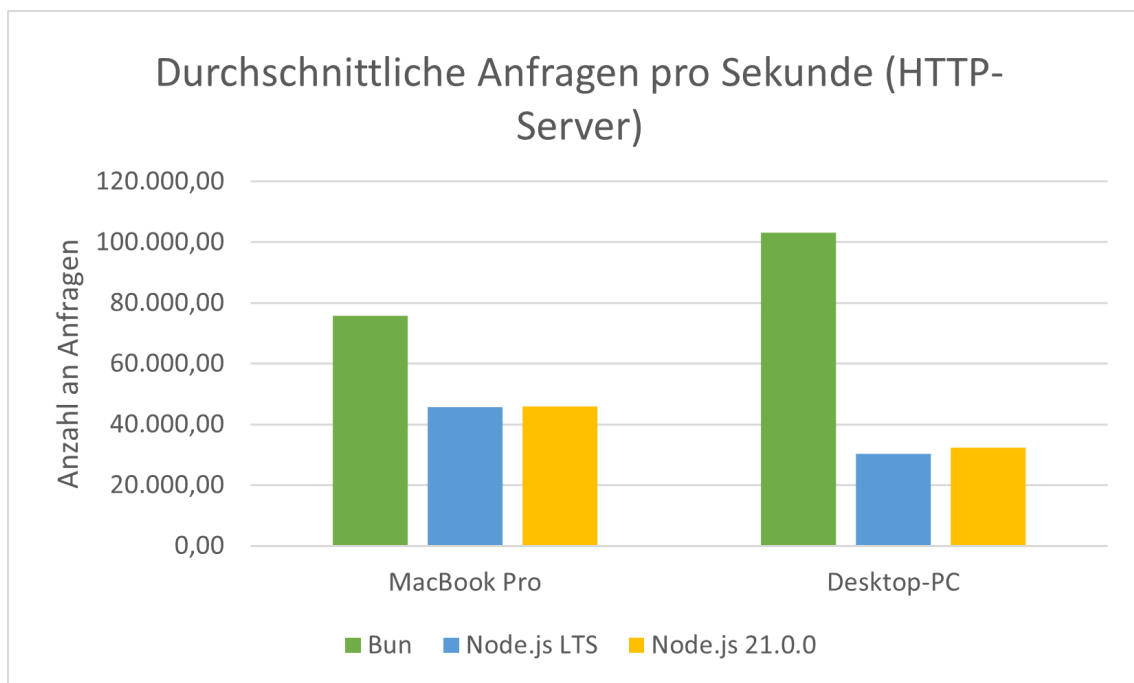


Abbildung 3.1: HTTP-Server - Durchschnittliche Anzahl an Anfragen pro Sekunde

Im ersten Testszenario wurde die grundlegende Leistung der HTTP-Server verglichen. Abbildung 3.1 zeigt die durchschnittliche Anzahl an Anfragen pro Sekunde, die jede Laufzeitumgebung bewältigen konnte. Bun übertraf sowohl die LTS- als auch die neueste Version von Node.js auf beiden getesteten Geräten. Bun konnte auf dem Desktop-PC pro Sekunde ungefähr 103.000 Anfragen bewältigen, während Node.js LTS und die neueste Version nur 30.000 bzw. 32.000 Anfragen pro Sekunde verarbeiten konnten. Diese Leistungsunterschiede spiegelten sich auch in den Latenzzeiten wider. Bun hatte eine Latenz von 6,61ms auf dem MacBook Pro und 4,84ms auf dem Desktop-PC, verglichen mit ungefähr 10 ms (MacBook Pro) und etwa 16 ms (Desktop-PC) für Node.js (siehe auch Kapitel [sec:benchmark-results-diagrams](#))).

Diese signifikanten Unterschiede deuten darauf hin, dass Bun das Potential bietet, in realen Szenarien erheblich schneller zu sein als Node.js. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die Verwendung der JavaScriptCore Engine und der Programmiersprache Zig klare Vorteile bei der Bewältigung von Netzwerkanfragen bietet. Das hat erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz und Skalierbarkeit in Produktionsumgebungen.

Datei-Server Performance

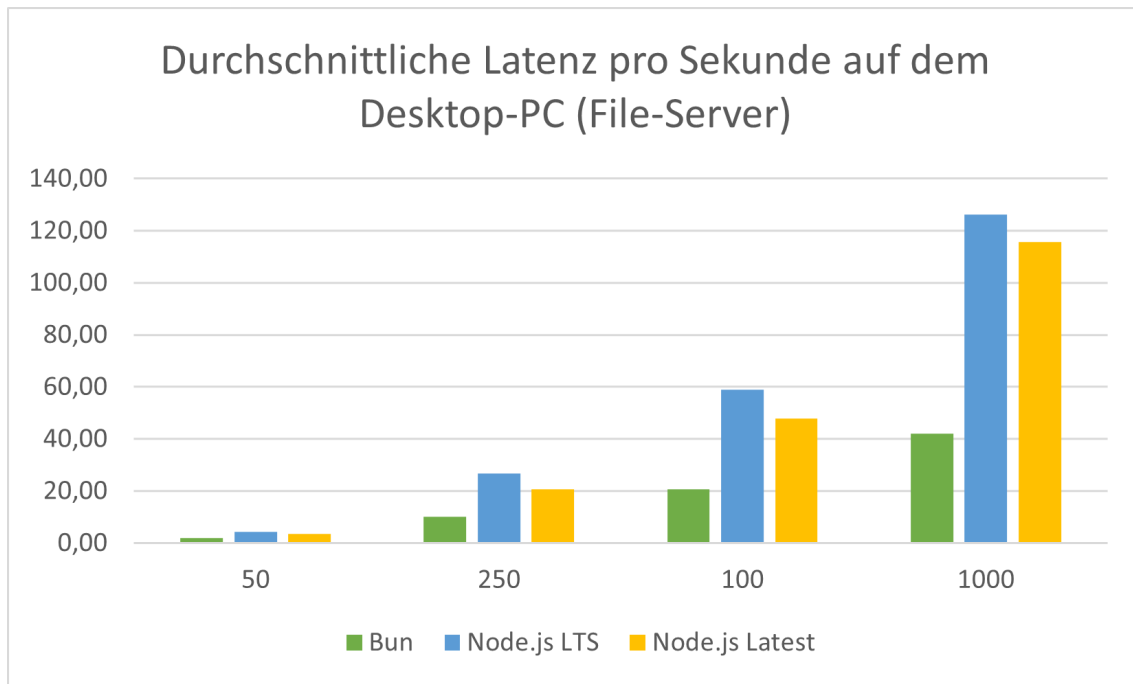


Abbildung 3.2: Datei-Server - Durchschnittliche Latenz

Das zweite Testszenario analysiert, inwiefern die Potentiale aus dem ersten Test in einem realen Anwendungsfall umgesetzt werden. Um die Diagramme übersichtlich zu halten, konzentriert sich die Darstellung auf den Desktop-PC. Denn die Unterschiede und Trends sind auf beiden Geräten ähnlich. Abbildung 3.2 zeigt die durchschnittlichen Latenzzeiten beim Zugriff auf Bilddateien. Bun schnitt erneut besser ab als Node.js. Bei 50 gleichzeitigen Benutzern betrug die Latenzzeit für Bun 2 ms, während Node.js LTS und die neueste Version Latenzzeiten von 4,2 ms bzw. 3,5 ms aufwiesen. Diese Unterschiede wurden bei steigender Anzahl gleichzeitiger Benutzer noch deutlicher. Bei 250 Nutzern beläuft sich Buns Latenz auf ca. 10ms, der beste Wert von Node.js liegt bei ca. 21ms (Neuste Version). Bei 1.000 gleichzeitigen Benutzern benötigte Bun durchschnittlich 42 ms für die Antwort, während Node.js bei 116 ms (neueste Version) lag. Die Unterschiede von mehr als 50% führen zu erheblich schnelleren Ladezeiten von Webseiten, insbesondere bei einer hohen Anzahl von Bildern. Dadurch, dass Bun die Anfragen selbst deutlich schneller beantwortet,

bewältigt Bun gleichzeitig deutlich mehr Anfragen pro Sekunde. Trotz der höheren Effizienz konnte Bun alle Anfragen erfolgreich beantworten, unabhängig von der Anzahl gleichzeitiger Benutzer. In der neuesten Version von Node.js wurden ab 250 gleichzeitigen Benutzern nicht mehr alle Anfragen erfolgreich beantwortet. Bei 1.000 gleichzeitigen Nutzern sank die Erfolgsrate auf dem MacBook Pro auf 99,54%. Bun erzielte bei 50, 250 und 500 gleichzeitigen Benutzern eine hundertprozentige Erfolgsrate bei der Beantwortung aller Anfragen. Bei 1.000 simulierten Anwendern sank die Erfolgsrate auf 99,96%. Node.js LTS zeigte ebenfalls eine sehr hohe Erfolgsrate, bei der erst ab 1.000 gleichzeitigen Benutzern fehlerhafte Antworten zurückgeliefert wurden, was zu einer Erfolgsrate von 99,92% führte. Obwohl die absolute Anzahl der Anfragen mit Fehlern sehr niedrig war, ist es dennoch bemerkenswert, dass die neueste Version von Node.js hier deutlich größere Defizite aufwies. Möglicherweise sind Fehler im neusten Release enthalten, die diese Leistungsunterschiede erklären.

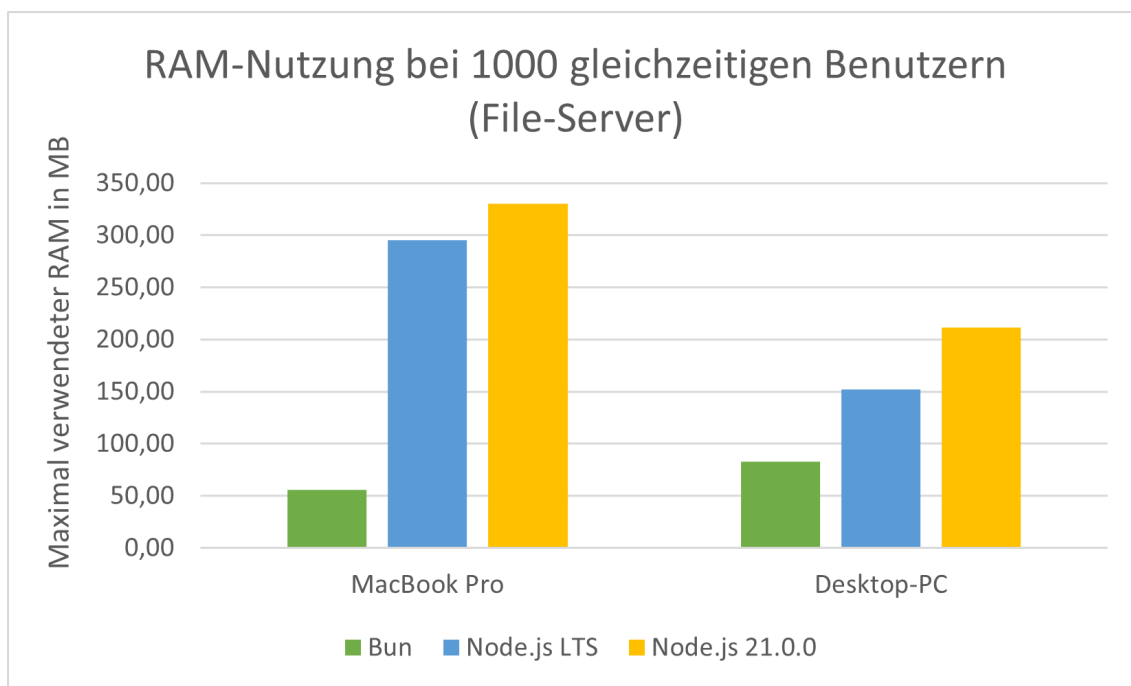


Abbildung 3.3: Datei-Server - Maximal verwendeter Arbeitsspeicher

Die RAM- und CPU-Nutzung der Laufzeitumgebungen werden bei 1.000 gleichzeitigen Benutzern verglichen. Denn bei der höchsten Last sind die Differenzen am besten zu erkennen. Abbildung 3.3 zeigt den maximal verwendeten Arbeitsspeicher während des 30-sekündigen Tests. Bun war auch hier effizienter als Node.js auf beiden getesteten Geräten. Auf dem MacBook Pro verbrauchte Bun etwa 56 MB Arbeitsspeicher, während Node.js LTS und die neueste Version etwa 296 MB bzw. 330 MB benötigten. Auf dem Desktop-PC betrug der Arbeitsspeicherverbrauch von

Bun etwa 84 MB, im Vergleich zu 152 MB (LTS) bzw. 212 MB (neueste Version) bei Node.js. Die Beobachtungen deuten auf klare Vorteile in Bezug auf Effizienz und Kosten. Bun kann mit begrenzten Ressourcen anspruchsvollere Aufgaben bewältigen.

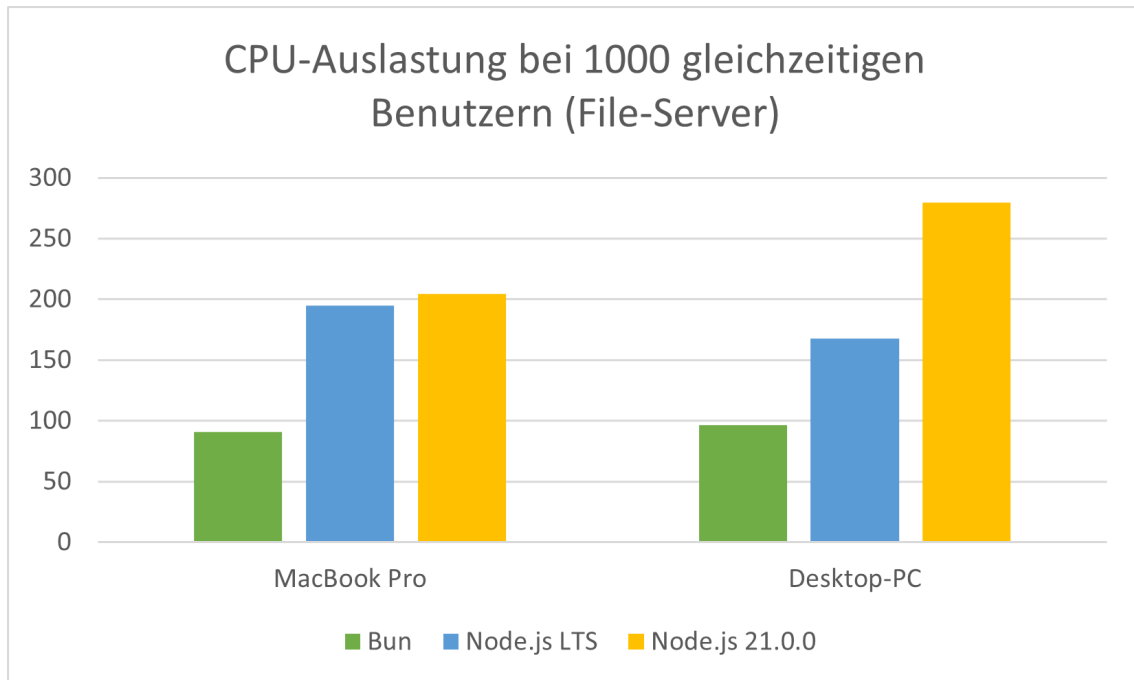


Abbildung 3.4: Datei-Server - CPU-Auslastung

Abbildung 3.4 zeigt die CPU-Auslastung bei 1.000 gleichzeitigen Benutzern in Prozent. Die CPU-Auslastung bestätigt, dass Bun mit den verfügbaren Ressourcen effizienter umgeht als Node.js. Die CPU-Nutzung bei Bun betrug etwa 91% auf dem MacBook Pro und 96% auf dem Desktop-PC. Node.js LTS hingegen benötigte etwa 195% auf dem MacBook Pro und 167% auf dem Desktop-PC, während die neueste Version noch schlechter abschnitt. Die Unterschiede in der CPU-Auslastung und Arbeitsspeichernutzung zeigen, dass Bun bei gleichzeitiger Last effizienter war und anspruchsvolle Aufgaben bewältigen konnte.

Mehr als 100% CPU Nutzung erklären

Performance bei der Berechnung der Fibonacci-Folge

Der dritte Testfall konzentriert sich auf die Leistung von Bun und Node.js bei der Ausübung rechenintensiver Aufgaben. Die Ausführungszeiten sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Bun war erheblich schneller, wobei die Berechnung in durchschnittlich 3,24 Sekunden auf dem MacBook Pro und 4,47 Sekunden auf dem Desktop-PC abgeschlossen wurde. Node.js zeigte kaum Unterschiede zwischen der LTS- und der neuesten Version, wobei die schnellste Berechnung 6,32 Sekunden (MacBook Pro) und 7,18 Sekunden (Desktop-PC) dauerte. Somit ist Bun auf dem MacBook Pro ca.

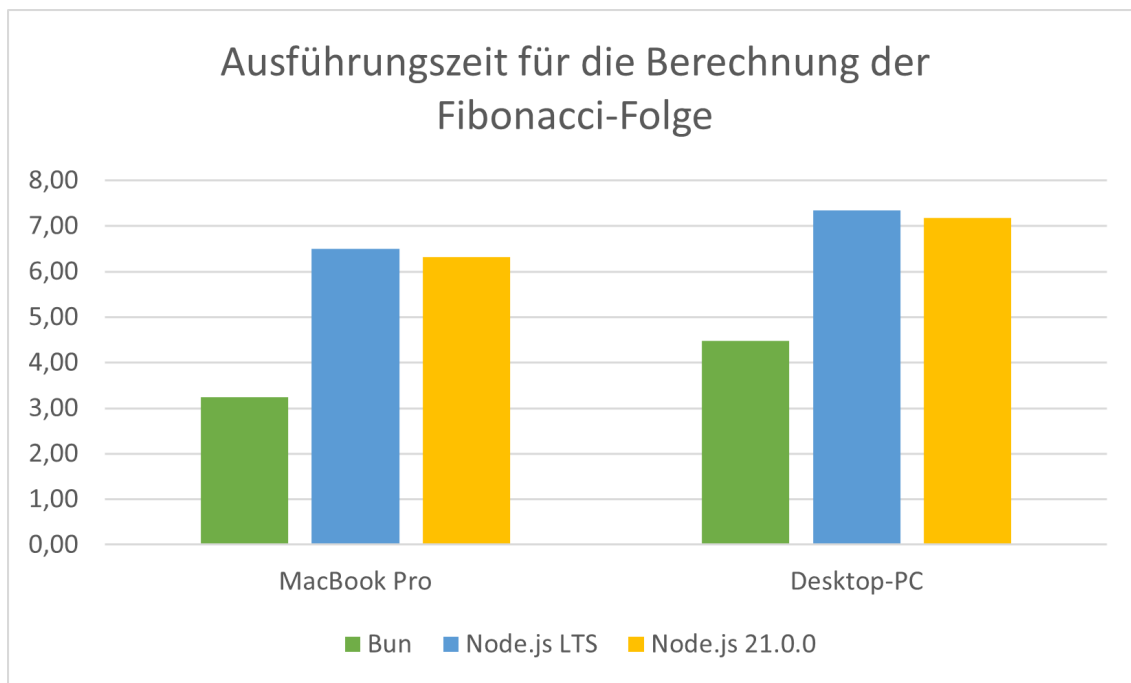


Abbildung 3.5: Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge

50% und auf dem Desktop-PC ungefähr 40% schneller. Die CPU-Auslastung beträgt sowohl bei Bun als auch bei Node.js ca. 100%. Der maximal verwendete Arbeitsspeicher unterscheidet sich auf dem Desktop-PC nur um maximal 3 MB. Erwähnenswert ist, dass hier die neuste Version von Node.js 1 MB weniger Arbeitsspeicher als Bun genutzt hat. Auf dem MacBook Pro sind die Unterschiede deutlich größer. Bun benötigt maximal ca. 26 MB RAM, Node.js im Vergleich dazu 42 MB (LTS) und 37 MB (Neuste Version).

Die Betrachtung der CPU-Auslastung, der RAM-Nutzung und der Ausführungszeiten bestätigt die beobachteten Leistungsunterschiede aus den beiden vorherigen Test-szenarien. Unabhängig von der betrachteten Metrik weist Bun eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit auf beiden Endgeräten auf.

3.5 Fazit

Dieses Kapitel widmet sich auf die Beantwortung der ersten Leitfrage “Welche konkreten Leistungsverbesserungen können in Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js festgestellt werden, und wie lassen sie sich quantifizieren?” (siehe Kapitel 1). Die Ergebnisse des Benchmarks verdeutlichen, dass Bun in sämtlichen Testszenarien signifikant bessere Leistungen als Node.js erzielt hat. Dies zeigt sich in einer deutlich reduzierten Latenz, in einer geringeren Inanspruchnahme von Arbeitsspeicher und CPU-Ressourcen

während der Verarbeitung von Netzwerkanfragen. Diese Resultate bestätigen sich bei der Ausführung rechenintensiver Aufgaben. Bun hat die Fibonacci-Folge bis zu 50% schneller berechnet als Node.js. In diesem Szenario beansprucht Bun ähnlich viel Arbeitsspeicher wie Node.js, weist jedoch eine geringere CPU-Auslastung auf. Die Ergebnisse unterstreichen, dass Bun im Entwicklungsprozess gute Entscheidungen bei der Auswahl seiner Komponenten getroffen hat. Die JavaScriptCore Engine mit mehreren JIT-Kompilern (siehe Kapitel 2.2) ermöglicht eine effizientere Optimierung des Maschinencodes. Die Auswahl von Zig als systemnahe Programmiersprache und das intensive Testen während der Entwicklung haben die Effizienz von Bun im Umgang mit den verfügbaren Ressourcen gesteigert. Allerdings ist die Performance nicht der alleinige Faktor bei der Wahl einer Laufzeitumgebung. Stabilität, Sicherheit, Zuverlässigkeit und auch Kompatibilität spielen eine ebenso wichtige Rolle.

Das Benchmark basiert auf den Vergleich ausgewählter Eigenschaften auf einem spezifischen Hardware-Setup. Es ist zu beachten, dass diese Ergebnisse unter Verwendung von Servern aus der Produktionsumgebung potenziell abweichen können. Des Weiteren sollten weitere Eigenschaften analysiert werden, um die Überlegenheit von Bun zu verifizieren. Selbst bei einer Reproduktion des Benchmarks auf identischer Hardware kann es aufgrund unterschiedlicher Systemkonfigurationen und laufender Hintergrundprozesse zu Abweichungen kommen. Zudem beschränken sich die bisherigen Analysen auf einfache Beispiele, die sich auf die Performance der Laufzeitumgebungen konzentrieren. In der Realität sind Anwendungsquellcodes oft umfangreicher und komplexer. Die vorliegenden Ergebnisse geben daher nicht zwangsläufig die Performance solcher komplexeren Anwendungen wieder.

Für eine umfassende Bewertung der Laufzeitleistung sollten die Unterschiede zwischen dem MacBook Pro und dem Desktop-PC genauer analysiert werden. Es ist wichtig, die Gründe für die signifikanten Unterschiede im Anteil erfolgreicher Anfragen zu ermitteln. Zudem sollte untersucht werden, warum die RAM-Nutzung bei der Berechnung der Fibonacci-Folge unter Ubuntu kaum variiert. Die Untersuchung sollte auf andere Hardware-Setups ausgeweitet werden, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Schließlich könnten umfangreichere Anwendungsbeispiele und realistischere Szenarien in die Analyse einbezogen werden, um die tatsächliche Performance in komplexen Umgebungen besser abzubilden.

Kapitel 4

Kompatibilität von Projekten

Dieses Kapitel betrachtet die Kompatibilität zwischen Node.js und Bun. Es ist von hoher Bedeutung, dass Bun möglichst viele Frameworks und Pakete aus dem Ökosystem von Node.js unterstützt. Nur wenn der Migrationsaufwand für den Wechsel der Laufzeitumgebung möglichst gering und einfach ist, kann Bun Node.js als Platzhirsch verdrängen. Die Betrachtung konzentriert sich auf die Kompatibilität häufig verwendeter Backend-Frameworks, da diese auf einem Server direkt von Bun oder Node.js ausgeführt werden. Laut der Umfrage “State of JavaScript 2022” handelt es sich dabei um Express und NestJS [5].

4.1 Express

Express ist ein beliebtes Open-Source-Framework für Node.js. Das Framework möchte die Erstellung von Webanwendungen und APIs in Node.js vereinfachen. Dafür stellt es eine Vielzahl von Funktionen und Tools zur Verfügung, die Entwicklern die Handhabung von HTTP-Anfragen und -Antworten, Routing und weiteren Aufgaben helfen. Express nutzt von nur die HTTP-Schnittstelle der Node.js API. Laut der Dokumentation von Bun ist diese Schnittstelle bereits implementiert. Demnach sollte die Migration funktionieren.

Um die Kompatibilität von Express mit Bun zu testen, wird eine einfache Anwendung genutzt, die über eine API das Erstellen, Aktualisieren, Lesen und Löschen von Büchern und ihren Autoren ermöglicht. Die API nutzt Express und TypeScript. Sie wird um einige Middleware-Funktionalitäten erweitert, um die Migration repräsentativer zu gestalten. Die folgenden Komponenten werden verwendet:

- Winston als Logger, um die Bearbeitung der Anfragen transparent zu gestalten und die Fehleranalyse bei der Migration zu vereinfachen,

- Helmet, um die API zu schützen,
- Morgan, um die ein- und ausgehenden HTTP-Anfragen zu loggen,
- Mongoose als ORM, um die Daten in einer MongoDB speichern zu können,
- Joi, um die Bücher und Autoren in den HTTP-Anfragen zu validieren,
- Compression, um die HTTP-Antworten zu komprimieren,
- einen zentralen Error-Handler, um bei Fehlern möglichst verständliche Nachrichten in der HTTP-Anfrage zu inkludieren.

Um die App von Node.js auf Bun zu migrieren, muss Buns integrierter Paketmanager verwendet werden, um die passenden Abhängigkeiten zu installieren. Node.js speichert die installierten Abhängigkeiten in der “package.json”. Diese kann auch Buns Paketmanager nutzen. Für eine komplette Neuinstallation muss der Ordner “node_modules”, in dem sich die lokal installierten Abhängigkeiten befinden, gelöscht werden. Zusätzlich wird die Datei “package-lock.json” entfernt. Node.js nutzt diese Datei, um lokal die installierten Abhängigkeiten zu speichern. Dies beschleunigt die Installation der Pakete und sorgt dafür, dass die Versionen installiert werden, die während der Entwicklung verwendet wurden. Zusätzlich erhöht die “package-lock.json” die Sicherheit, da sie die Installation aus vertrauenswürdigen Quellen sicherstellt. Bun nutzt für diesen Mechanismus eine andere Datei.

Im zweiten Schritt müssen obsoleete Abhängigkeiten aus dem Projekt entfernt und weitere benötigte Abhängigkeiten hinzugefügt werden. Die Typdefinitionen von Node.js und die Pakete, die es unter Node.js ermöglichen TypeScript auszuführen (siehe Kapitel 2.1). Denn diese werden unter Bun nicht mehr benötigt. Als Abhängigkeit müssen die Typdefinitionen von Bun hinzugefügt werden. Diese werden auch in der Datei “ts-config.json” inkludiert werden, damit global auf Buns API ohne Fehler des Compilers zugegriffen werden kann. Diese Datei definiert Einstellungen und Optionen für den TypeScript-Kompiler. Zusätzlich werden die Einstellungen an die Empfehlungen aus der Dokumentation von Bun angepasst .

Quelle hinzufügen

Im dritten Schritt werden die Befehle in der “package.json” angepasst, die die Ausführung des Projekts ermöglichen. Hierbei wird dafür gesorgt, dass Bun als Laufzeitumgebung verwendet wird. Zuletzt müssen die Pakete mit Buns Paketmanager installiert werden, indem der Befehl “bun install” ausgeführt wird. Nachfolgend kann nun über “bun run dev” der angepasste Befehl aus der “package.json” genutzt werden, um die API zu starten.

Der erste Start der App ist nicht erfolgreich. Die Konsolenausgabe zeigt den Fehler an “SyntaxError: Import named ‘Request’ not found in module ‘node_modules/express/-index.js”.

Das bedeutet, dass der Kompiler den Import des Typs ‘Request’ aus dem Express-Framework nicht auflösen kann. Um die generelle Funktionsweise der App zu verifizieren, werden die Importe aller Typen aus dem Express-Framework entfernt. Ein erneuter Start der App zeigt, dass die App erfolgreich ausgeführt werden kann. Da es sich um ein Problem mit den Typdefinition handelt, liegt die Vermutung nahe, dass eine Einstellung des TypeScript-Kompilers die Ursache ist. In einem schnellen Test, in dem mit Hilfe des Leitfadens von Bun eine minimale Express-App generiert und ausgeführt wird, funktionieren diese Importe. Ein Vergleich der “ts-config.json”

beider Projekte zeigt, dass im aktuellen Projekten “emitDecoratorMetadata” aktiviert ist. Diese Option steuert, ob der Kompiler Metadaten über Dekoratoren im generierten JavaScript-Quellcode generiert. Ist diese Option aktiviert, kann zur Laufzeit auf die Metadaten der Dekoratoren zugegriffen werden. Wenn diese Informationen zur Laufzeit nicht benötigt werden, ist es empfohlen, die Option zu deaktivieren. Mit der deaktivierten Option läuft diese App nun. Das Absenden von HTTP-Anfragen an die Applikation zeigt, dass alle API-Operationen erfolgreich funktionieren.

Rechtschreibung
prüfen

Quelle hinzu-
fügen

Wenn man die App nun produktiv nutzen möchte, verwendet man minifizierten JavaScript-Quellcode. Dieser wird mit Hilfe eines Bundlers erstellt. Bun bietet einen integrierten Bundler an (siehe Kapitel 2.2). Abbildung TODO zeigt den Befehl mit dem Bundler. Wichtig ist hierbei, Bun als Zielplattform zu spezifizieren. Denn alternativ kann auch Node.js als Zielplattform ausgewählt werden, um den Code produktiv mit Node.js auszuführen. Führt man nun das Ergebnis des Bundlers aus, erscheint eine kryptische Fehlermeldung: “TypeError: d is not a function. (In ‘d(target, key, r)’, ‘d’ is an instance of Object)”. Eine Analyse zeigt, dass ein verwendeter Dekorator nicht funktioniert. Der verwendete Dekorator sorgt, dass beim Binding der Listener für die API-Funktionen auch der Kontext der Klasse gesetzt wird, sodass der this-Kontext innerhalb des Listeners funktioniert. Dies muss nun manuell über angepassten Quellcode erledigt werden. Nun startet die App in der produktiven Nutzung ohne Fehler. Das Absenden von HTTP-Anfragen an die Applikation zeigt, dass auch alle API-Operationen erfolgreich funktionieren. Offiziell handelt es sich bei der Option “experimentalDecorators” um ein experimentelles Feature, das von

Node.js bereits unterstützt wird und von Bun noch nicht.

Quelle hinzu-
fügen

4.2 NestJS

Nest.js ist ein Open-Source-Framework für die Entwicklung von serverseitigen Anwendungen und APIs in Node.js. Es wurde entwickelt, um die Erstellung von skalierbaren, gut strukturierten und leicht wartbaren Anwendungen zu erleichtern. Nest.js basiert auf TypeScript und bietet eine Abstraktionsebene über gängige HTTP-Servern wie z. B. Express an. Nest ermöglicht den Entwicklern über APIs andere Server zu benutzen. So haben die Entwickler Wahlfreiheit für die zugrunde liegende Plattform. Bun unterstützt offiziell Nest.js noch nicht vollständig. Mit Version 1.0.3 wird der TypeScript-Dekorator “emitDecoratorMetadata” unterstützt, auf den Nest.js aufbaut. Dadurch soll es möglich sein Nest.js mit ORMs grundsätzlich zu nutzen. Denn aus der Node-API wird auch nur die HTTP-Schnittstelle benötigt, sofern keine Message Broker wie Kafka genutzt werden. Denn diese Message Broker nutzen “tel” und “net” aus der Node.js API, die von Bun nicht vollständig implementiert sind.

Quelle

<https://github.com/ovsh/bun/issues/1541><https://bun.sh/blog/v1.0.3>

Erklären?

Quelle Bun Doku und GitHub Issue

Zur Prüfung der Kompatibilität wird eine App verwendet, die es ermöglicht über eine API Artikel zu erstellen, aktualisieren, lesen und zu löschen. Der Autor ist ein Benutzer, der sich zuvor Registrieren muss. Die Anwendung verwendet die folgenden Features:

- Authentifizierung und Autorisierung über Tokens ,
- ORM-Integration mit TypeORM,
- Logging mit Winstong,
- Validierungen mit Joi und Class-Validator .

RBAC?

Was macht der?

Als Datenbank wird eine lokale PostgreSQL-Instanz verwendet. Den Verbindungsaufbau übernimmt TypeORM unter Angabe der korrekten Daten. Die Migration startet wie bei Express mit dem Löschen der installierten Abhängigkeiten und der “package-lock.json”. Im zweiten Schritt werden die nicht mehr benötigten Abhängigkeiten, z. B. die Typdefinitionen von Node.js, entfernt. Es werden wieder die Typdefinitionen von Bun hinzugefügt. Im dritten Schritt wird die “ts-config.json” an die Empfehlungen von Bun angepasst und die Typdefinitionen von Bun inkludiert. Die Optionen, die Bun als Best Practices bezeichnet, werden nicht übernommen. Denn diese sind in den Best Practices von Nest.js explizit nicht enthalten. Im vierten Schritt werden die Befehle in der “package.json” angepasst, um die Applikation starten zu können. Abschließend werden die Abhängigkeiten über Buns Paketmanager installiert. Beim Start der App erscheint nun die Fehlermeldung “Error: Cannot find module

'node_modules/bcrypt/lib/binding/napi-v3/bcrypt_lib.node'. Das Paket "bcrypt" wird verwendet, um die Passwörter zu hashen und beim Login zu validieren. Bcrypt nutzt node-gyp als Abhängigkeit. Dabei handelt es sich um ein Open-Source-Build-Tool, das zum Erstellen und Kompilieren nativer Node Module eingesetzt wird. In diesem Kontext wird oft postinstall verwendet, eine Lifecycle-Methode beim Installieren der Abhängigkeiten. Im Anschluss an die Installation des Pakets wird ein Skript ausgeführt, um beispielsweise einen Build auszuführen. Bun blockiert diese standardmäßig, da diese Skripte potentielle Sicherheitsrisiken darstellen. Vertraut man einem Paket, muss man dieses in der "package.json" als vertraute Abhängigkeit deklarieren. Fügt man nun Bcrypt hinzu und installiert alle Pakete komplett neu, ist der Fehler gelöst.

Quelle: <https://github.com/kelecs>

Quelle?

<https://bun.sh/guides>

Die Konsolenausgabe zeigt beim erneuten Start der App einen Laufzeitfehler an: "ReferenceError: Cannot access uninitialized variable.". Abbildung TODO zeigt die Stelle, die diese Fehlermeldung verursacht. Die Entität "Article" definiert eine Relation zu der Entität "User". Das führt zu einer zirkulären Abhängigkeit zwischen "User" und "Article". Die Dokumentation von TypeORM zeigt, dass zirkuläre Abhängigkeiten vermieden werden können, wenn "User" durch "Relation<User>" ersetzt wird. Dann löst TypeORM die Definitionen entsprechend auf, ohne dabei zirkuläre Importe zu erzeugen.

Code Listing
Entity Definition

Die Konsole zeigt beim erneuten Start der Applikation keine Fehler mehr an. Sendet man nun HTTP-Anfragen an die API, wird die Fehlermeldung "Die Metadaten für die Entität User können nicht gefunden werden." zurückgegeben. TypeORM sucht alle Entitäten über ein String geladen, der ein Pattern für den Pfad der Entitäten sucht. Laut Changelog von TypeORM ist diese Variante veraltet. Die Entitäten müssen direkt als Referenz übergeben werden, indem sie über einen Import inkludiert.

Quelle Changelog TypeORM

Startet man die App erneut und führt HTTP-Anfragen aus, erhält man keine Fehlermeldungen mehr. Allerdings stürzt der Server mit der Meldung "Segmentation Fault" ab, sobald ein sich ein neuer Benutzer registrieren oder ein vorhandener Benutzer einloggen möchte. Über die Logs kann nachvollzogen werden, dass der Server abstürzt, sobald Bcrypt zum Hashen der Passwörter aufgerufen wird. Eine Recherche zu dieser Fehlermeldung in Kombination mit Bcrypt hat keine Treffer ergeben und die neuste Version wird bereits verwendet. Daher bleibt nur die Option in der Dokumentation von Bun nach Empfehlungen für das Hashen von Passwörtern zu suchen. Bun bietet hierfür tatsächlich eine eigene API an. Nutzt man diese in der Applikation, sind auch die HTTP-Anfragen zum Registrieren oder Einloggen von Benutzern erfolgreich. Die anderen Endpunkte der API funktioniert auch. Daraus folgt, dass Nest.js unter

Bun funktionieren kann. Allerdings bedeutet der Wechsel auf die API von Bun, dass das Versprechen eines Eins-zu-Eins-Ersatzes für Node.js nicht gehalten werden kann. Denn es erfordert aktive Eingriffe in die Abhängigkeiten der Applikation.

Als letzten Punkt wird, wie bei Express zuvor, versucht die minifizierte Version der Anwendung zu erzeugen und lokal auszuführen. Sobald man den Bundler aufruft zeigt dieser viele Fehlermeldungen an, die in Abbildung TODO zu sehen sind. Auffällig ist, dass die Abhängigkeiten, die hier als fehlend deklariert werden, in den direkten Abhängigkeiten des Projekts nicht vorhanden sind. zeigt, dass bereits andere Entwickler dasselbe Problem besitzen. Da dieses Issue aktuell noch offen ist, funktioniert Buns Bundler für Nest.js noch nicht. Hier gilt es Updates abzuwarten.

Quelle:
<https://github.com/ovsh/bun/issues/4803>

4.3 Fazit

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der zweiten Leitfrage “Inwiefern sind Node.js-Projekte kompatibel mit Bun? Wie schwierig gestaltet sich die Migration?” (siehe Kapitel 1.2). Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen, dass Bun Applikationen auf der Basis von Express oder Nest.js ausführen kann. Der Migrationsaufwand hängt stark von der Applikation und den verwendeten Abhängigkeiten ab. Funktionieren nahezu alle Abhängigkeiten problemlos, wie zum Beispiel bei Express, ist die Migration in kurzer Zeit erledigt. Sobald bestimmte Module nicht kompatibel sind und Fehler verursachen, kann der Prozess für die Suche nach der Ursache und die Implementation einer Lösung sehr mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Letzendlich hängt die Funktionsfähigkeit eines Moduls davon ab, welche Schnittstelle der Node.js API genutzt werden. Wenn Bun die verwendeten Schnittstellen implementiert hat, funktionieren die Module. Andernfalls kann die Suche nach der Ursache und nach alternativen Lösungsansätzen zeitintensiv und schwierig werden. Selbst wenn alle verwendeten APIs unterstützt werden, kann es wie bei Bcrypt zu Laufzeitfehlern kommen. Deren Analyse ist als Entwickler, der nicht das Modul selbst entwickelt, äußerst schwierig.

Es gilt anzumerken, dass die verwendeten Beispiele einfachere Applikationen waren. Produktiv genutzt Anwendungen können komplexer sein und auch mehr Abhängigkeiten verwenden. Beide Beispiele beweisen, dass häufig verwendete Komponenten und Konzepte funktionieren. Dazu zählen Authentifizierung und Autorisierung, Logging, CRUD-Operationen für Entitäten, Integration mit einer Datenbank und auch Schutzmechanismen für die Applikation selbst. Auf diesen Konzepten bauen auch produktiv genutzte Anwendungen auf. Sobald es über diese Konzepte hinausgeht,

muss die Funktionsweise unter Bun separat analysiert werden.

Kapitel 5

Schlussbetrachtung

5.1 Fazit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Evaluierung von Bun im Vergleich zu Node.js. Hierzu existieren drei Leitfragen. Um diese zu beantworten, wurden die Performance von Bun im Vergleich zu Node.js und die Kompatibilität mit bestehenden Projekten auf der Basis von Node.js analysiert.

Mehrere Benchmarks wurden durchgeführt, um die erste Leitfrage ist “Welche konkreten Leistungsverbesserungen können in Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js festgestellt werden, und wie lassen sie sich quantifizieren?” zu beantworten. Die Ergebnisse zeigen, dass Bun in allen betrachteten Szenarien deutlich besser performt als Node.js. Es können in derselben Zeit deutlich mehr HTTP-Anfragen erfolgreich bearbeitet werden. Hierbei ist die Auslastung des Prozessors und des Arbeitsspeicher geringer. Dieses Bild bestätigt sich auch bei der Ausführung rechenintensiver Anwendungen. Bun ist schneller und benötigt weniger Ressourcen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Performance von Bun grundlegend besser ist. Allerdings wurden hier native Anwendungen basierend auf den Spezifika der einzelnen Implementation verwendet. Ob die Performance beim Einsatz von Frameworks besser ist, hängt von der Implementation des Frameworks ab. Zusätzlich handelt es sich bei den betrachteten Beispielen um einfache Anwendungsszenarien.

Um die zweite Leitfrage “Inwiefern sind Node.js-Projekte kompatibel mit Bun? Wie schwierig gestaltet sich die Migration?” zu beantworten, wurden zwei Applikationen von Node.js zu Bun als Laufzeitumgebung migriert. Diese Applikationen basieren auf den zwei am häufigsten verwendeten Backend-Frameworks für Node.js. Grundsätzlich können beide Frameworks mit Bun ausgeführt werden. Die Migration und der dadurch entstehende Aufwand ist stark abhängig von den verwendeten Modulen und der

genutzten Schnittstellen der Node.js API. Bun implementiert die Node.js API noch nicht vollständig. Daher ist der Migrationsaufwand im besten Fall sehr niedrig, da Bun die verwendeten Schnittstellen unterstützt. Im schlechtesten Fall fällt der Aufwand durch Fehlersuche, Evaluierung von Alternativen und den möglichen Umbau der Applikation sehr hoch aus. Zusätzlich kann es noch zu Laufzeitfehlern kommen, die nachfolgend sehr schwierig zu analysieren sind. Es gilt anzumerken, dass Buns Bundler schafft es noch nicht schafft die Nest.js-Applikation zu minifizieren. Die Analyse dieser Arbeit beschränkt sich auf einfache, nicht produktiv verwendete Applikationen. Bei diesen kann sich der Migrationsaufwand anders verhalten. Darüber hinaus wurden der integrierten Bibliotheken zum Ausführen vom Test nicht betrachtet.

Die dritte Leitfrage“Welche Herausforderungen und potenziellen Vorteile ergeben sich bei der Verwendung von Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js für Entwickler und Projekte?“ fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen. Bun bietet das Potential für eine deutlich verbesserte Performance. Dies gilt für die Ausführung von Projekten, Installation von Abhängigkeiten, Minifizieren der Applikation und auch Ausführen von Tests. Darüber hinaus integriert das Executable von Bun direkt Bibliotheken zum Testen, zum Ausführen von TypeScript, zum Verwalten der Abhängigkeiten und zum Bündeln von Applikationen. Das vereinfacht die Entwicklung und Verwaltung von Anwendungen deutlich, da f+r diese grundsätzlichen Tätigkeiten keine Abhängigkeiten gewartet werden müssen. Die Migration kann dabei herausfordernd sein, da Bun viele Frameworks und Pakete noch nicht unterstützt. Daher empfiehlt es sich für die produktive Nutzung von Bun zu warten, bis das Ökosystem weiterentwickelt und die Unterstützung verbessert hat.

5.2 Ausblick

Es gilt die Entwicklung von Bun weiterhin zu beobachten. Die Roadmap für die Entwicklung besitzt noch viele offene Punkte. Zusätzlich kommen durch den offiziellen Release der Version 1.0 viele neue Nutzer dazu, die neue Anwendungsfälle haben oder auch Bugs finden. Inwiefern das Entwicklerteam von Bun dies alles stemmen kann, gilt es zu abzuwarten.

Auf Basis dieser Arbeit können die zwei zentralen Themen Performance und Kompatibilität tiefergehender analysiert werden. Die Evaluation der Performance kann auf die Verwendung von Frameworks ausgeweitet werden. Ist die Performance von Bun mit Express oder Nest.js immer noch höher? Wie viele Ressourcen verwendet Bun beim Ausführen der Frameworks? Darüber hinaus können die Performance-Benchmarks dieser Arbeit in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt werden, um

die Weiterentwicklung von Bun zu bewerten. Wird die Performance besser oder schlechter? Zusätzlich kann die Performance von Buns Paketmanager und Bibliothek zum Testen analysiert werden und mit etablierten Lösungen verglichen werden. Dadurch ist eine komplette Bewertung mit allen integrierten Komponenten in Bun möglich.

In die Untersuchung der Kompatibilität können tatsächlich produktiv verwendete Anwendungen einbezogen werden, die oft komplexere Prozesse und Middleware nutzen. Dadurch können fundiertere Aussagen über Bun als Eins-zu-Eins-Ersatz für Node.js getroffen werden. Darüber hinaus werden neuere Versionen von Bun die Kompatibilität erhöhen und den Migrationsprozess vereinfachen. Sobald hier entscheidende Verbesserungen getroffen werden, gilt es die Betrachtung zu wiederholen.

Literatur

- [1] JARED SUMNER. *Bun v1.0.6*, 2023. URL: <https://bun.sh/blog/bun-v1.0.6>.
- [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] MICROSOFT. *TypeScript is JavaScript with syntax for types*. o. J. URL: <https://www.typescriptlang.org/>.
- [4] STACK OVERFLOW. *Stack Overflow Developer Survey 2023*, 2023. URL: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#overview>.
- [5] SACHA GREIF und ERIC BUREL. *State of JavaScript 2022*, 2022. URL: <https://2022.stateofjs.com/en-US/other-tools/>.
- [6] Q-SUCCESS, Hrsg. *Usage statistics of JavaScript for websites*, 2023. URL: <https://w3techs.com/technologies/details/pl-js>.
- [7] OPENJS FOUNDATION, Hrsg. *An introduction to the NPM package manager*, 2022. URL: <https://nodejs.dev/en/learn/an-introduction-to-the-npm-package-manager/>.
- [8] 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/>.
- [9] 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.
- [10] OPENJS FOUNDATION. *Node.js API reference documentation*, o. J. URL: <https://nodejs.org/api/documentation.html>.
- [11] OPENJS FOUNDATION. *Node.js*, o. J. URL: <https://nodejs.org/en>.

- [12] NIMESH CHHETRI. *A comparative analysis of node.js (server-side javascript)*. 2016. URL: [\url{https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/5/}](https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/5/).
- [13] 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).
- [14] BUN, Hrsg. *Offizielle Dokumentation*, URL: [\url{https://bun.sh/docs}](https://bun.sh/docs).
- [15] 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).
- [16] APPLE, Hrsg. *WebKit*, o. J. URL: [\url{https://webkit.org/}](https://webkit.org/).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] MARIO BARBACCI u. a. „Quality Attributes“. In: (1995).
- [22] BERT VERHELST. *Add note that windows binaries are not yet available*, 2023. URL: [\url{https://github.com/oven-sh/bun/pull/4780}](https://github.com/oven-sh/bun/pull/4780).
- [23] OPENJS FOUNDATION. *Node.js 20 ChangeLog*, 2023.
- [24] OPENJS FOUNDATION. *Node.js 21 ChangeLog*, 2023. URL: [\url{https://github.com/nodejs/node/blob/main/doc/changelogs/CHANGELOG_V21.md#21.0.0}](https://github.com/nodejs/node/blob/main/doc/changelogs/CHANGELOG_V21.md#21.0.0).

Anhang A

Ergebnisse des Benchmarks

36

A.1 HTTP-Server

Tabelle A.1: Messungen unter macOS (Bun)

| Nr. | Req/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 75.482,69 | 6,62 | 191,00 | 100,00 | 83,00 | 28.928,00 |
| 2 | 75.978,26 | 6,58 | 162,00 | 100,00 | 83,00 | 28.960,00 |
| 3 | 76.467,36 | 6,54 | 168,00 | 100,00 | 81,00 | 28.832,00 |
| 4 | 72.942,36 | 6,85 | 123,00 | 100,00 | 83,00 | 28.992,00 |
| 5 | 77.558,43 | 6,45 | 194,00 | 100,00 | 83,00 | 28.800,00 |
| Durchschnitt | 75.685,82 | 6,61 | 167,70 | 100,00 | 82,60 | 28.902,40 |

Tabelle A.2: Messungen unter macOS (Node.js LTS)

| Nr. | Req/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 46.037,35 | 10,36 | 180,00 | 100,00 | 84,00 | 93.536,00 |
| 2 | 46.323,80 | 10,86 | 202,00 | 100,00 | 84,00 | 94.432,00 |
| 3 | 45.762,30 | 10,92 | 199,00 | 100,00 | 85,00 | 93.456,00 |
| 4 | 45.035,39 | 11,10 | 195,00 | 100,00 | 86,00 | 93.584,00 |
| 5 | 45.776,81 | 10,92 | 144,00 | 100,00 | 85,00 | 94.016,00 |
| Durchschnitt | 45.787,13 | 10,83 | 184,60 | 100,00 | 84,80 | 93.804,80 |

Tabelle A.3: Messungen unter macOS (Node.js Latest)

| Nr. | Req/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 45.680,37 | 10,94 | 1840,00 | 100,00 | 86,00 | 85.584,00 |
| 2 | 45.880,89 | 10,89 | 1860,00 | 100,00 | 86,00 | 85.520,00 |
| 3 | 45.939,12 | 10,88 | 1570,00 | 100,00 | 85,00 | 84.386,00 |
| 4 | 45.932,14 | 10,88 | 1650,00 | 100,00 | 86,00 | 83.616,00 |
| 5 | 45.974,99 | 10,87 | 1120,00 | 100,00 | 85,00 | 85.680,00 |
| Durchschnitt | 45.881,50 | 10,89 | 1608,00 | 100,00 | 85,60 | 84.957,20 |

Tabelle A.4: Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun)

| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|------------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 103.290,25 | 4,84 | 92,06 | 100,00 | 89,00 | 47.188,00 |
| 2 | 102.852,75 | 4,86 | 120,86 | 100,00 | 97,00 | 47.608,00 |
| 3 | 102.414,80 | 4,88 | 98,60 | 100,00 | 96,00 | 49.392,00 |
| 4 | 103.809,80 | 4,81 | 104,46 | 100,00 | 98,00 | 47.260,00 |
| 5 | 103.707,81 | 4,82 | 99,36 | 100,00 | 97,00 | 48.484,00 |
| Durchschnitt | 103.215,08 | 4,84 | 103,07 | 100,00 | 95,40 | 47.986,40 |

Tabelle A.5: Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js LTS)

| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 30.421,51 | 16,44 | 230,80 | 100,00 | 96,00 | 93.856,00 |
| 2 | 30.448,93 | 16,42 | 208,43 | 100,00 | 96,00 | 93.212,00 |
| 3 | 29.999,89 | 16,67 | 215,64 | 100,00 | 95,00 | 93.144,00 |
| 4 | 30.122,16 | 16,59 | 176,54 | 100,00 | 94,00 | 92.928,00 |
| 5 | 30.488,92 | 16,39 | 199,07 | 100,00 | 96,00 | 93.116,00 |
| Durchschnitt | 30.296,28 | 16,50 | 206,10 | 100,00 | 95,40 | 93.251,20 |

Tabelle A.6: Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js Current)

| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 32.358,13 | 15,45 | 7960,00 | 100,00 | 100,00 | 86.652,00 |
| 2 | 31.700,99 | 15,78 | 8340,00 | 100,00 | 90,00 | 86.396,00 |
| 3 | 32.244,05 | 15,51 | 9280,00 | 100,00 | 95,00 | 86.280,00 |
| 4 | 32.856,68 | 15,21 | 8210,00 | 100,00 | 99,00 | 86.284,00 |
| 5 | 32.269,21 | 15,50 | 8440,00 | 100,00 | 98,00 | 86.636,00 |
| Durchschnitt | 32.285,81 | 15,49 | 8446,00 | 100,00 | 96,40 | 86.449,60 |

A.1. HTTP-Server

A.2 Datei-Server

Tabelle A.7: Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun)

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 24.555,25 | 2,03 | 25,73 | 100,00 | 98,00 | 83.484,00 |
| 2 | 24.688,31 | 2,02 | 40,45 | 100,00 | 100,00 | 82.824,00 |
| 3 | 25.083,61 | 1,99 | 30,04 | 100,00 | 98,00 | 83.876,00 |
| 4 | 24.978,84 | 2,00 | 25,65 | 100,00 | 101,00 | 83.756,00 |
| 5 | 24.503,56 | 2,04 | 29,26 | 100,00 | 98,00 | 82.056,00 |
| Durchschnitt | 24.761,91 | 2,02 | 30,23 | 100,00 | 99,00 | 83.199,20 |
| 250 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 24.585,85 | 10,17 | 100,97 | 100,00 | 98,00 | 82.372,00 |
| 2 | 24.988,13 | 10,00 | 96,19 | 100,00 | 97,00 | 83.272,00 |
| 3 | 24.290,11 | 10,29 | 73,98 | 100,00 | 97,00 | 83.132,00 |
| 4 | 24.399,87 | 10,24 | 105,26 | 100,00 | 98,00 | 82.808,00 |
| 5 | 24.926,90 | 10,03 | 80,57 | 100,00 | 97,00 | 84.088,00 |
| Durchschnitt | 24.638,17 | 10,15 | 91,39 | 100,00 | 97,40 | 83.134,40 |
| 500 Benutzer | | | | | | |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 23.899,18 | 20,91 | 116,19 | 100,00 | 96,00 | 82.128,00 |
| 2 | 24.201,74 | 20,65 | 108,40 | 100,00 | 96,00 | 83.196,00 |
| 3 | 24.153,93 | 20,69 | 115,38 | 100,00 | 100,00 | 82.692,00 |
| 4 | 23.658,70 | 21,12 | 119,64 | 100,00 | 98,00 | 82.672,00 |
| 5 | 24.399,08 | 20,50 | 117,62 | 100,00 | 99,00 | 82.948,00 |
| Durchschnitt | 24.155,31 | 20,69 | 116,36 | 100,00 | 98,40 | 83.124,80 |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 23.963,96 | 41,81 | 1230,00 | 100,00 | 98,00 | 82.180,00 |
| 2 | 23.684,71 | 42,25 | 1160,00 | 100,00 | 95,00 | 81.876,00 |
| 3 | 23.702,16 | 42,25 | 1170,00 | 100,00 | 93,00 | 83.052,00 |
| 4 | 23.546,82 | 42,53 | 1160,00 | 100,00 | 98,00 | 82.880,00 |
| 5 | 24.036,35 | 41,63 | 1130,00 | 100,00 | 97,00 | 83.320,00 |
| Durchschnitt | 23.786,80 | 42,09 | 1170,00 | 100,00 | 96,20 | 82.661,60 |

Tabelle A.8: Messungen unter Node.js LTS auf Ubuntu 23.10

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 11.853,46 | 4,22 | 78,54 | 100,00 | 137,00 | 69.480,00 |
| 2 | 11.924,96 | 4,08 | 71,56 | 100,00 | 135,00 | 71.184,00 |
| 3 | 12.253,47 | 4,08 | 71,51 | 100,00 | 135,00 | 74.640,00 |
| 4 | 11.806,59 | 4,23 | 64,23 | 100,00 | 134,00 | 71.224,00 |
| 5 | 11.819,12 | 4,23 | 73,19 | 100,00 | 133,00 | 76.260,00 |
| Durchschnitt | 11.931,52 | 4,17 | 71,81 | 100,00 | 134,80 | 72.557,60 |
| 250 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 9454,04 | 26,38 | 249,57 | 100,00 | 169,00 | 115.504,00 |
| 2 | 9395,36 | 26,55 | 221,37 | 100,00 | 169,00 | 121.036,00 |
| 3 | 9276,20 | 26,89 | 215,68 | 100,00 | 173,00 | 112.908,00 |
| 4 | 9379,20 | 26,59 | 192,39 | 100,00 | 167,00 | 122.620,00 |
| 5 | 9362,02 | 26,64 | 223,04 | 100,00 | 171,00 | 114.472,00 |
| Durchschnitt | 9373,36 | 26,61 | 220,41 | 100,00 | 169,80 | 117.308,00 |
| 500 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 7650,31 | 64,53 | 287,70 | 100,00 | 166,00 | 105.356,00 |
| 2 | 8460,46 | 58,41 | 305,46 | 100,00 | 176,00 | 106.928,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 3 | 8428,35 | 58,51 | 285,69 | 100,00 | 166,00 | 103.704,00 |
| 4 | 8292,37 | 59,61 | 313,21 | 100,00 | 171,00 | 106.108,00 |
| 5 | 8410,83 | 58,73 | 292,88 | 100,00 | 165,00 | 104.264,00 |
| Durchschnitt | 8398,00 | 58,82 | 299,31 | 100,00 | 169,50 | 105.251,00 |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 8491,34 | 118,31 | 1260,00 | 100,00 | 170,00 | 140.472,00 |
| 2 | 7656,16 | 130,42 | 1260,00 | 100,00 | 178,00 | 143.180,00 |
| 3 | 7714,78 | 129,42 | 1270,00 | 100,00 | 160,00 | 178.588,00 |
| 4 | 8174,67 | 123,02 | 1270,00 | 100,00 | 152,00 | 149.484,00 |
| 5 | 7698,82 | 129,62 | 1260,00 | 100,00 | 177,00 | 147.612,00 |
| Durchschnitt | 7947,15 | 126,16 | 1264,00 | 100,00 | 167,40 | 151.867,20 |
| Tabelle A.9: Messungen unter Node.js Latest auf Ubuntu 23.10 | | | | | | |
| 50 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 14.237,06 | 3,51 | 116,84 | 100,00 | 174,00 | 88.056,00 |
| 2 | 14.305,85 | 3,49 | 135,14 | 100,00 | 194,00 | 84.784,00 |
| 3 | 14.685,70 | 3,40 | 146,92 | 100,00 | 193,00 | 82.028,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 4 | 14.253,49 | 3,51 | 161,68 | 100,00 | 193,00 | 85.144,00 |
| 5 | 14.690,78 | 3,40 | 127,55 | 100,00 | 197,00 | 86.808,00 |
| Durchschnitt | 14.434,58 | 3,46 | 137,63 | 100,00 | 190,20 | 85.364,00 |
| 250 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 12.075,16 | 20,70 | 860,00 | 100,00 | 222,00 | 128.460,00 |
| 2 | 12.006,80 | 20,81 | 816,63 | 100,00 | 218,00 | 124.552,00 |
| 3 | 12.038,16 | 20,76 | 880,00 | 100,00 | 220,00 | 121.192,00 |
| 4 | 11.927,89 | 20,95 | 845,54 | 100,00 | 221,00 | 121.700,00 |
| 5 | 12.158,18 | 20,56 | 860,00 | 100,00 | 221,00 | 121.488,00 |
| Durchschnitt | 12.041,24 | 20,76 | 852,43 | 100,00 | 220,40 | 123.478,40 |
| 500 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 10.322,75 | 47,96 | 1710,00 | 100,00 | 268,00 | 172.996,00 |
| 2 | 10.462,03 | 47,33 | 1740,00 | 100,00 | 265,00 | 118.604,00 |
| 3 | 10.337,76 | 47,97 | 1770,00 | 100,00 | 250,00 | 174.576,00 |
| 4 | 10.478,85 | 47,32 | 1740,00 | 100,00 | 264,00 | 175.628,00 |
| 5 | 10.254,00 | 48,39 | 1740,00 | 100,00 | 262,00 | 175.036,00 |
| Durchschnitt | 10.383,16 | 47,75 | 1747,50 | 100,00 | 260,25 | 160.961,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| <hr/> | | | | | | |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| <hr/> | | | | | | |
| 1 | 8535,43 | 116,42 | 4240,00 | 100,00 | 278,00 | 213.864,00 |
| 2 | 8553,51 | 116,28 | 3810,00 | 100,00 | 279,00 | 209.776,00 |
| 3 | 8573,22 | 115,88 | 4240,00 | 100,00 | 277,00 | 209.276,00 |
| 4 | 8655,02 | 114,96 | 4100,00 | 100,00 | 281,00 | 211.692,00 |
| 5 | 8630,10 | 115,30 | 4070,00 | 100,00 | 283,00 | 213.220,00 |
| Durchschnitt | 8589,46 | 115,77 | 4092,00 | 100,00 | 279,60 | 211.565,60 |
| <hr/> | | | | | | |
| Tabelle A.10: Messungen unter Node.js Latest auf macOS | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | |
| 50 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| <hr/> | | | | | | |
| 1 | 25.276,77 | 1,98 | 18,82 | 100,00 | 92,00 | 67.328,00 |
| 2 | 25.302,77 | 1,97 | 14,40 | 100,00 | 94,00 | 65.744,00 |
| 3 | 25.293,36 | 1,98 | 14,06 | 100,00 | 95,00 | 65.840,00 |
| 4 | 25.292,46 | 1,98 | 13,51 | 100,00 | 93,00 | 65.956,00 |
| 5 | 25.330,78 | 1,97 | 16,10 | 100,00 | 94,00 | 654.230,00 |
| Durchschnitt | 25.299,23 | 1,98 | 15,38 | 100,00 | 93,60 | 183.819,60 |
| <hr/> | | | | | | |
| 250 Benutzer | | | | | | |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 25.464,61 | 9,82 | 55,58 | 100,00 | 89,00 | 66.698,00 |
| 2 | 25.435,68 | 9,83 | 52,12 | 100,00 | 92,00 | 66.384,00 |
| 3 | 25.476,74 | 9,81 | 50,91 | 100,00 | 93,00 | 66.464,00 |
| 4 | 25.372,19 | 9,85 | 49,03 | 100,00 | 92,00 | 66.640,00 |
| 5 | 25.451,01 | 9,82 | 49,88 | 100,00 | 93,00 | 66.560,00 |
| Durchschnitt | 25.440,05 | 9,83 | 51,50 | 100,00 | 91,80 | 66.549,20 |
| 500 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 23.707,59 | 21,08 | 195,63 | 100,00 | 90,00 | 64.264,00 |
| 2 | 23.920,81 | 20,90 | 239,50 | 100,00 | 86,00 | 65.040,00 |
| 3 | 23.909,89 | 20,90 | 204,46 | 100,00 | 90,00 | 65.024,00 |
| 4 | 23.825,78 | 20,98 | 206,59 | 100,00 | 89,00 | 64.880,00 |
| 5 | 23.879,56 | 20,93 | 220,08 | 100,00 | 90,00 | 64.880,00 |
| Durchschnitt | 23.848,73 | 20,96 | 213,25 | 100,00 | 89,00 | 64.817,60 |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 24.846,18 | 40,22 | 451,41 | 99,96 | 91,00 | 68.192,00 |
| 2 | 24.776,04 | 40,34 | 466,86 | 99,95 | 90,00 | 67.472,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|---|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 3 | 24.789,88 | 40,38 | 479,30 | 99,95 | 91,00 | 67.280,00 |
| 4 | 24.746,30 | 40,38 | 479,30 | 99,96 | 90,00 | 6824,00 |
| 5 | 24.773,90 | 40,34 | 462,65 | 99,96 | 91,00 | 67.952,00 |
| Durchschnitt | 24.786,46 | 40,33 | 467,90 | 99,96 | 90,60 | 55.544,00 |
| Tabelle A.11: Messungen unter Node.js LTS auf macOS | | | | | | |
| 50 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 21.515,00 | 2,32 | 33,96 | 100,00 | 146,00 | 120.544,00 |
| 2 | 19.785,30 | 2,53 | 36,05 | 100,00 | 142,00 | 125.616,00 |
| 3 | 19.363,94 | 2,58 | 33,90 | 100,00 | 143,00 | 124.096,00 |
| 4 | 21.722,08 | 2,30 | 29,84 | 100,00 | 143,00 | 109.568,00 |
| 5 | 21.449,79 | 2,33 | 33,51 | 100,00 | 145,00 | 119.792,00 |
| Durchschnitt | 20.767,22 | 2,41 | 33,45 | 100,00 | 143,80 | 119.923,20 |
| 250 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 15.917,54 | 15,55 | 70,35 | 100,00 | 193,00 | 195.552,00 |
| 2 | 16.075,37 | 15,51 | 81,90 | 100,00 | 186,00 | 168.992,00 |
| 3 | 16.074,26 | 15,55 | 65,21 | 100,00 | 189,00 | 191.920,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 4 | 16.111,43 | 15,51 | 81,90 | 100,00 | 188,00 | 189.536,00 |
| 5 | 15.924,32 | 15,70 | 70,46 | 100,00 | 191,00 | 176.272,00 |
| Durchschnitt | 16.020,58 | 15,56 | 73,96 | 100,00 | 189,40 | 184.454,40 |
| 500 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 14.317,65 | 34,93 | 248,08 | 100,00 | 189,00 | 229.776,00 |
| 2 | 14.508,20 | 34,46 | 231,62 | 100,00 | 197,00 | 198.496,00 |
| 3 | 14.466,72 | 34,56 | 214,82 | 100,00 | 185,00 | 208.496,00 |
| 4 | 14.610,55 | 34,21 | 198,59 | 100,00 | 176,00 | 212.880,00 |
| 5 | 14.647,90 | 34,12 | 238,61 | 100,00 | 190,00 | 209.896,00 |
| Durchschnitt | 14.510,20 | 34,46 | 226,34 | 100,00 | 187,40 | 211.908,80 |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 14.970,63 | 66,75 | 511,17 | 99,92 | 193,00 | 284.000,00 |
| 2 | 14.629,17 | 68,36 | 452,81 | 99,93 | 198,00 | 300.096,00 |
| 3 | 14.524,19 | 68,75 | 594,74 | 99,92 | 195,00 | 286.704,00 |
| 4 | 14.274,59 | 69,98 | 572,31 | 99,92 | 199,00 | 294.704,00 |
| 5 | 13.378,25 | 74,77 | 550,02 | 99,92 | 190,00 | 311.296,00 |
| Durchschnitt | 14.355,37 | 69,72 | 536,21 | 99,92 | 195,00 | 295.360,00 |

Tabelle A.12: Messungen unter Node.js Latest auf macOS

| 50 Benutzer | | | | | | |
|--------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 21.553,66 | 2,32 | 81,25 | 100,00 | 146,00 | 117.296,00 |
| 2 | 21.499,51 | 2,32 | 61,80 | 100,00 | 148,00 | 109.888,00 |
| 3 | 21.808,63 | 2,29 | 61,93 | 100,00 | 146,00 | 112.464,00 |
| 4 | 21.799,37 | 2,29 | 63,66 | 100,00 | 144,00 | 119.520,00 |
| 5 | 21.519,05 | 2,32 | 60,17 | 100,00 | 148,00 | 115.120,00 |
| Durchschnitt | 21.636,04 | 2,31 | 65,76 | 100,00 | 146,40 | 114.857,60 |
| 250 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 17.388,28 | 14,38 | 469,75 | 99,99 | 190,00 | 203.264,00 |
| 2 | 17.301,54 | 14,45 | 484,46 | 99,99 | 191,00 | 202.544,00 |
| 3 | 17.374,50 | 14,39 | 455,17 | 100,00 | 186,00 | 184.224,00 |
| 4 | 17.193,03 | 14,54 | 478,60 | 99,99 | 186,00 | 208.992,00 |
| 5 | 16.918,40 | 5,55 | 492,50 | 100,00 | 187,00 | 198.144,00 |
| Durchschnitt | 17.235,15 | 12,66 | 476,10 | 99,99 | 188,00 | 199.433,60 |
| 500 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 14.790,27 | 33,81 | 1720,00 | 99,50 | 195,00 | 221.728,00 |
| 2 | 14.729,20 | 33,93 | 1790,00 | 99,40 | 194,00 | 219.552,00 |

| 50 Benutzer | | | | | | |
|---------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 3 | 14.749,95 | 33,91 | 1649,00 | 99,70 | 198,00 | 234.800,00 |
| 4 | 14.722,22 | 33,98 | 1920,00 | 99,40 | 193,00 | 243.920,00 |
| 5 | 14.628,28 | 34,14 | 1820,00 | 99,70 | 194,00 | 257.200,00 |
| Durchschnitt | 14.723,98 | 33,95 | 1779,80 | 99,54 | 194,80 | 235.440,00 |
| 1000 Benutzer | | | | | | |
| Nr. | Request/s | Durchschn. Latenz (ms) | Max. Latenz (ms) | Erfolgr. Req (%) | Max. CPU-Ausl. (%) | Max. RAM (kB) |
| 1 | 14.937,53 | 66,91 | 6000,00 | 99,87 | 210,00 | 283.264,00 |
| 2 | 14.518,01 | 68,83 | 5140,00 | 99,48 | 206,00 | 366.512,00 |
| 3 | 14.594,26 | 67,85 | 4350,00 | 99,46 | 203,00 | 317.392,00 |
| 4 | 14.719,55 | 68,20 | 4540,00 | 99,38 | 198,00 | 361.280,00 |
| 5 | 14.651,76 | 68,20 | 4540,00 | 99,50 | 206,00 | 323.952,00 |
| Durchschnitt | 14.684,22 | 68,00 | 4914,00 | 99,54 | 204,60 | 330.480,00 |

A.3 Fibonacci-Folge

Tabelle A.13: Messungen unter MacOS

| Bun | | | |
|----------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 3,23 | 100 | 25.840,00 |
| 2 | 3,23 | 100 | 25.776,00 |
| 3 | 3,24 | 100 | 25.904,00 |
| 4 | 3,26 | 100 | 26.160,00 |
| 5 | 3,26 | 100 | 25.952,00 |
| Durchschnitt | 3,24 | 100,00 | 25.926,40 |
| Node.js LTS | | | |
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 6,56 | 99 | 42.496,00 |
| 2 | 6,50 | 99 | 40.976,00 |
| 3 | 6,48 | 99 | 40.848,00 |
| 4 | 6,50 | 99 | 42.448,00 |
| 5 | 6,49 | 99 | 43.120,00 |
| Durchschnitt | 6,51 | 99,00 | 41.977,60 |
| Node.js Latest | | | |
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 6,32 | 99 | 36.688,00 |
| 2 | 6,32 | 99 | 36.608,00 |

| Bun | | | |
|--------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 3 | 6,32 | 99 | 36.912,00 |
| 4 | 6,32 | 99 | 36.800,00 |
| 5 | 6,33 | 99 | 36.672,00 |
| Durchschnitt | 6,32 | 99,00 | 36.736,00 |

Tabelle A.14: Messungen unter Ubuntu 23.10

| Bun | | | |
|--------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 4,48 | 100 | 44.624,00 |
| 2 | 4,49 | 100 | 45.644,00 |
| 3 | 4,46 | 100 | 45.380,00 |
| 4 | 4,47 | 100 | 44.744,00 |
| 5 | 4,46 | 100 | 43.844,00 |
| Durchschnitt | 4,47 | 100,00 | 44.847,20 |

| Node.js LTS | | | |
|-------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 7,39 | 98 | 45.696,00 |
| 2 | 7,29 | 99 | 46.336,00 |
| 3 | 7,35 | 100 | 46.336,00 |

| Bun | | | |
|--------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 4 | 7,29 | 99 | 46.336,00 |
| 5 | 7,41 | 100 | 46.080,00 |
| Durchschnitt | 7,35 | 99,20 | 46.156,80 |

| Node.js Latest | | | |
|----------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Nr. | Ausführungszeit (s) | CPU-Auslastung | Maximale RAM-Nutzung (kbytes) |
| 1 | 7,19 | 100 | 43.904,00 |
| 2 | 7,17 | 100 | 43.904,00 |
| 3 | 7,17 | 100 | 43.776,00 |
| 4 | 7,17 | 99 | 43.776,00 |
| 5 | 7,20 | 99 | 43.776,00 |
| Durchschnitt | 7,18 | 99,60 | 43.827,20 |

A.4 Zusätzliche Diagramme

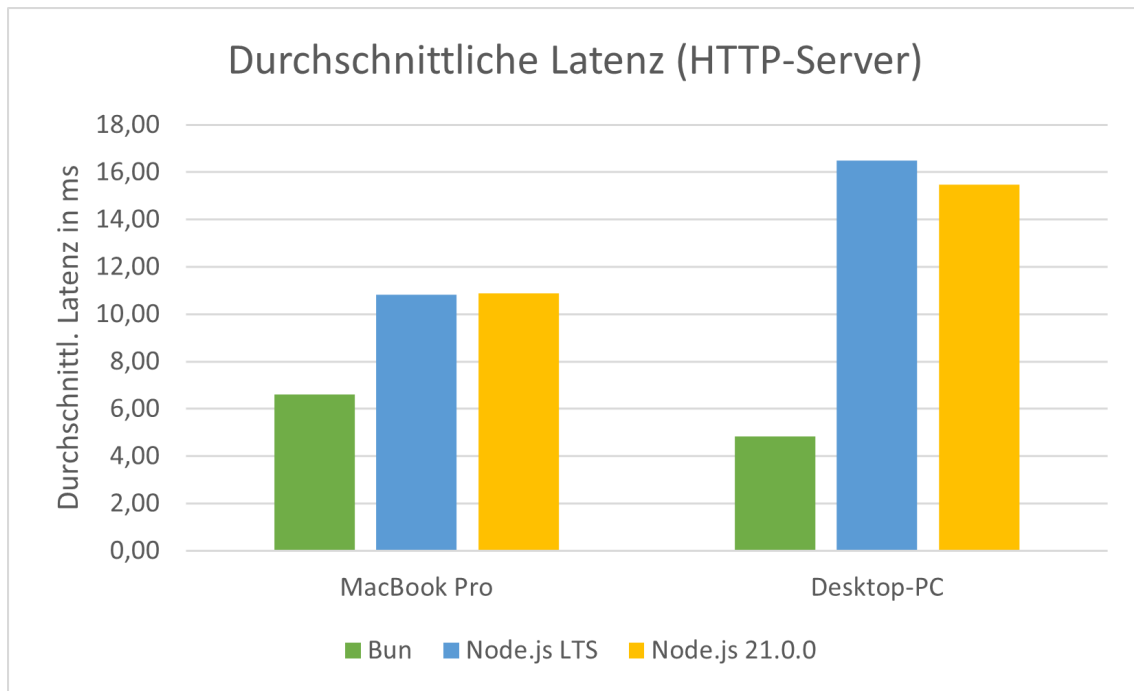


Abbildung A.1: Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge