

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Node.js	4
2.2 Bun	7
2.3 Performance als Qualitätsattribut	9
3 Performanceanalyse	12
3.1 Vorgehensweise	12
3.2 Versuchsaufbau	13
3.3 Implementierungen	14
3.3.1 HTTP-Server	14
3.3.2 Datei-Server	16
3.3.3 Fibonacci	17
3.4 Ergebnisse	18
3.5 Fazit	23
4 Kompatibilität von Projekten	24
4.1 Express	24
4.2 NestJS	26
4.3 Fazit	29
5 Schlussbetrachtung	30

5.1	Fazit	30
5.2	Ausblick	31
	Literaturverzeichnis	32
	A Ergebnisse des Benchmarks	35
A.1	HTTP-Server	35
A.2	Datei-Server	39
A.3	Fibonacci-Folge	49
A.4	Zusätzliche Diagramme	53

Abbildungsverzeichnis

Figure 1.1	Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitumgebungen	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	9
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	53

Tabellenverzeichnis

Table 3.1	Hardware für die Performanceanalyse	14
Table A.1	Messungen unter macOS (Bun)	35
Table A.2	Messungen unter macOS (Node.js LTS)	36
Table A.3	Messungen unter macOS (Node.js Latest)	36
Table A.4	Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun)	37
Table A.5	Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js LTS)	37
Table A.6	Messungen unter Ubuntu 23.10 (Node.js Current)	38
Table A.7	Messungen unter Ubuntu 23.10 (Bun)	39
Table A.8	Messungen unter Node.js LTS auf Ubuntu 23.10	41
Table A.9	Messungen unter Node.js Latest auf Ubuntu 23.10	42
Table A.10	Messungen unter Node.js Latest auf macOS	44
Table A.11	Messungen unter Node.js LTS auf macOS	46
Table A.12	Messungen unter Node.js Latest auf macOS	48
Table A.13	Messungen unter MacOS	50
Table A.14	Messungen unter Ubuntu 23.10	51

Abkürzungsverzeichnis

PoC Proof of Concept

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Thematik ein und motiviert, warum Bun evaluiert werden soll. Darauf werden die Ziele und der Aufbau dieser Arbeit vorgestellt.

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. Dies unterstreicht die hohe Relevanz des JavaScript-Ökosystems.[4]

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



Abbildung 1.1: Nutzungsstatistik von JavaScript-Laufzeitemgebungen [5]

der Umfrage zur aktuellen Verwendung von JavaScript gaben ca. 71% der 30.000 befragten Entwickler an, dass sie Node.js regelmäßig als Laufzeitemgebung verwenden [5]. Lediglich ca. 9% der befragten Entwickler verwenden Deno, während ungefähr 3% Bun als eine Alternative zu Node.js benutzen.

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 [1]. Die Entwickler von Bun werben mit Features wie erheblicher Leistungssteigerung, eleganten Schnittstellen und einer angenehmen Entwicklererfahrung.

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 Performanceanalyse 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 NestJS. Um die Kompatibilität bewerten zu können, werden 2 Anwendungen beispielhaft migriert. Die Ergebnisse werden in einem Fazit bewertet.

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.

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 Addon“, 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. Dieses 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 Module „http“ enthalten, um den Umgang mit dem HTTP-Protokoll zu vereinfachen. 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. Allerdings ist in der Standard-API keine Unterstützung für TypeScript enthalten. Hierzu muss der TypeScript Compiler separat installiert werden.[10, 11, 9]

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.[12]

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

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. 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, 10]

Allerdings existieren auch Nachteile bei der Verwendung von Node.js. Das Single-Thread-Modell kann bei rechenintensiven oder CPU-lastigen Aufgaben zu Engpässen führen, da es nur einen Hauptthread für die Ausführung von Code gibt [13]. Ein weiterer Nachteil ist, dass Node.js über eine begrenzte Standardbibliothek verfügt, sodass Entwickler häufig auf externe Module und Pakete zurückgreifen müssen, beispielsweise der Compiler für TypeScript [10].

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. 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.[1, 14]

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. In Node.js ist nur die Laufzeitumgebung enthalten, die anderen Komponenten müssen separat installiert werden. Dies bietet allerdings mehr Flexibilität bei der Auswahl der gewünschten Tools.[9, 15]

Bun ist in Zig geschrieben. Zig ist eine systemnahe Programmiersprache wie C und C++, die sich vor allem auf Einfachheit und Klarheit für ein besseres Verständnis konzentriert [16]. 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. Anstatt der V8 Engine von Google verwendet



Abbildung 2.2: Vergleich der Ökosysteme von Bun und Node.js [9, 15]

Bun die JavaScriptCore Engine. Das ist die Engine für WebKit, das unter anderem in Apple's Safari-Browser genutzt wird. In Kombination mit Zig sorgt die JavaScriptCore Engine für eine bessere Performance und zu drastisch reduzierten Startzeiten. Dies ist auf die Architektur der JavaScriptCore Engine mit 3 Just-In-Time-Kompilern zurückzuführen. Dadurch kann die Engine den Quellcode noch besser optimieren. 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.[15, 17, 18, 19]

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.[15]

Allerdings existieren auch viele Module und globale Objekte, für die die Unterstützung teilweise oder komplett fehlen, zum Beispiel „tel“, „net“ oder „http2“ [15]. 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.[20]



Abbildung 2.3: Node.js Architektur [20]

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 Software-Produkte zu verbessern und alle Teilbereiche zu beachten, indem der Standard als Leitfaden

vom Identifizieren der Anforderungen bis zur Qualitätskontrolle der Software unterstützt.[21]

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“ [22]

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 [21]. 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.[23]

Ressourcennutzung

Das Maß, in dem die Menge und Art der Ressource, die ein Produkt bei der Ausführung seiner Funktionalitäten beansprucht, entspricht der Ressourcennutzung [21]. 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.[23]

Kapazität

Die Kapazität entspricht dem Maß, in dem die maximalen Grenzen eines Parameters einer Software den Anforderungen entsprechen [21]. 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. 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.[23]

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 wird der verwendete Versuchsaufbau erläutert. Vor der Betrachtung der Ergebnisse folgt die Vorstellung der Beispielimplementierungen.

3.1 Vorgehensweise

Als Metriken für die Performanceanalyse 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). Diese sind auf variierende APIs der Laufzeitumgebungen zurückzuführen. Dadurch werden die Leistungen von Bun und Node.js bewertet, nicht die Performance des Quellcodes.

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.[24]

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 [25]. 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 verwendete Hardware und die dazugehörigen Betriebssysteme. Dies dient der Verifikation, ob etwaige Performance-Verbesserungen auf eine spezifi-

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

sche Systemumgebung zurückzuführen sind. Die native Implementierung von Bun für Windows ist experimentell und ist für die Öffentlichkeit nicht zugänglich [26]. 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 [27]. 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 [28]. 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 [29]. Zusätzlich enthält Version 21 weitere kleine Verbesserungen hinsichtlich der Performance [30].

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.

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

¹Stand 14.10.2023

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.

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    });
20  });
```

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

Abbildung 3.7: Datei-Server Node.js

Beide Server rufen dasselbe Bild aus dem Dateisystem ab, da in jeder Anfrage derselbe Pfad angegeben wird. Falls unter dem angeforderten Pfad keine Datei gefunden wird, geben beide Server 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

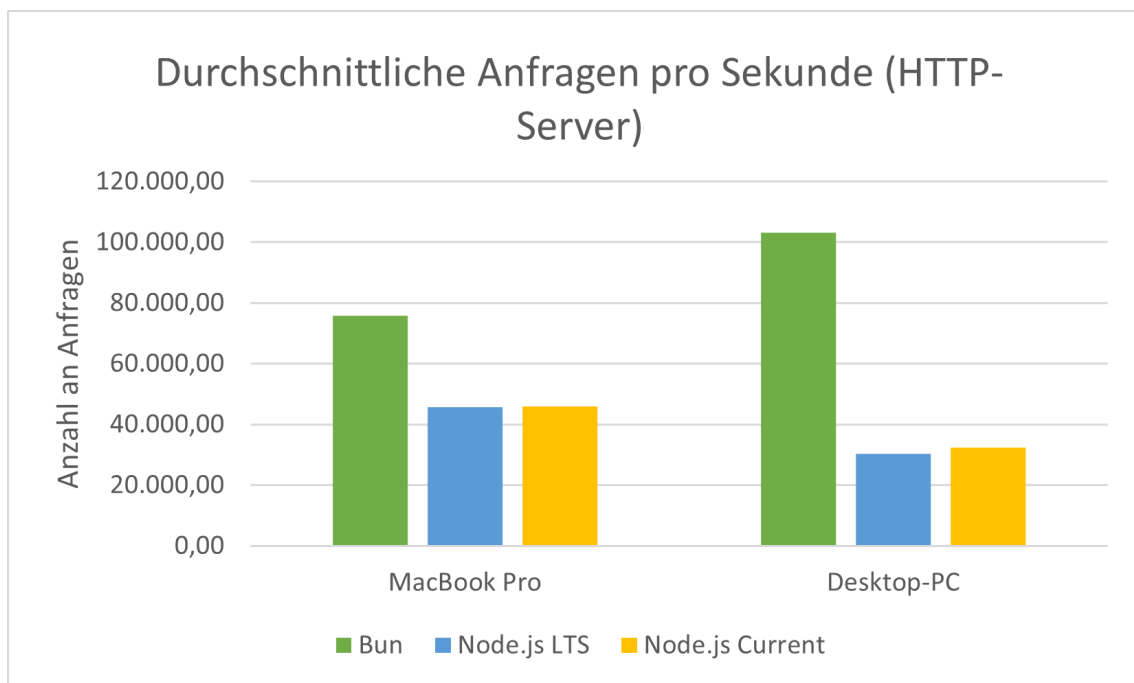


Abbildung 3.1: HTTP-Server - Durchschnittliche Anzahl an Anfragen pro Sekunde

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 auf beiden getesteten Geräten sowohl die LTS-Version als auch die neueste Version von Node.js. 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 Abbildung A.1 in Kapitel A.4).

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

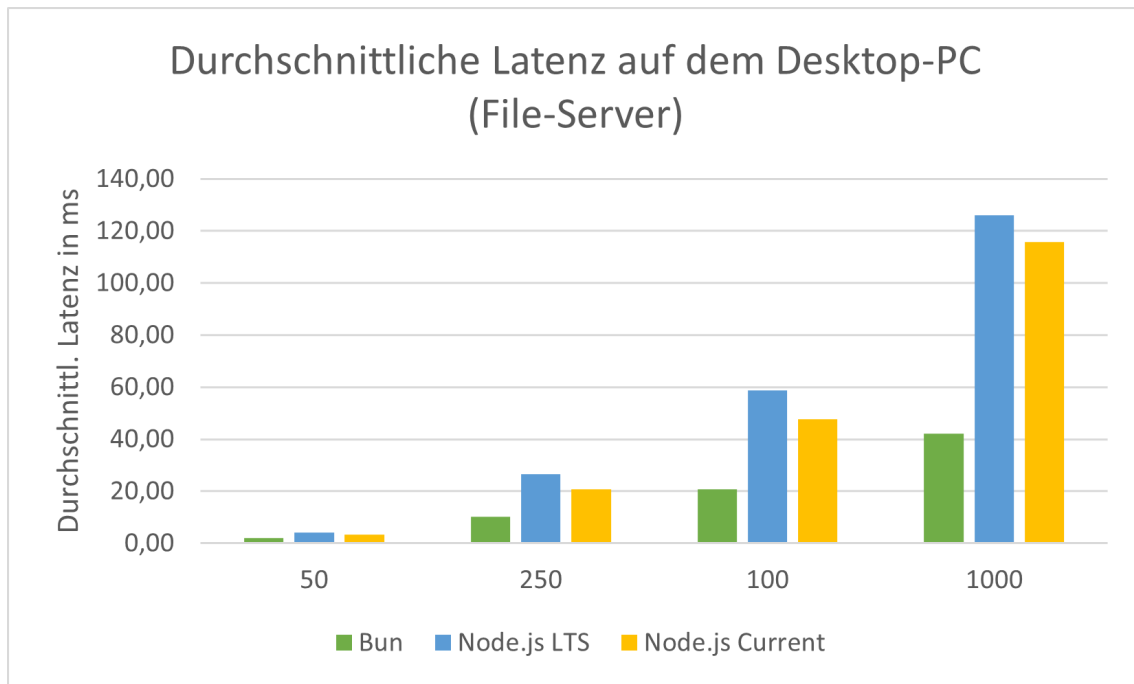


Abbildung 3.2: Datei-Server - Durchschnittliche Latenz

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 Latenzen 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 Latenzen 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.

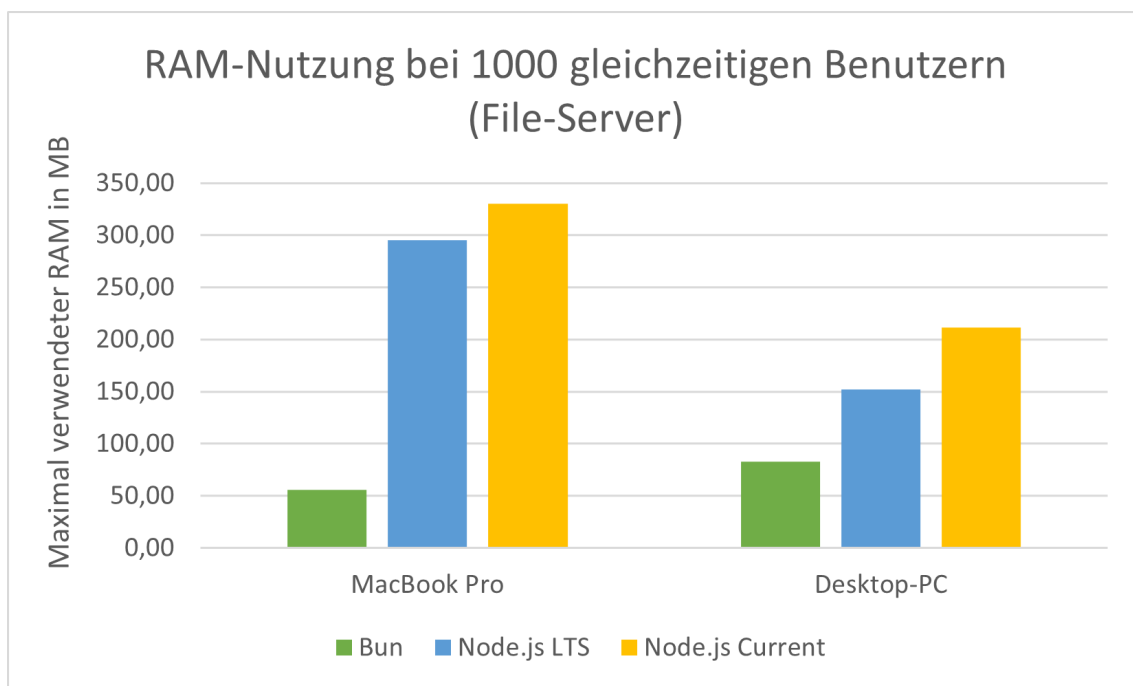


Abbildung 3.3: Datei-Server - Maximal verwendeter Arbeitsspeicher

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 hin. Bun kann mit begrenzten Ressourcen anspruchsvollere Aufgaben bewältigen.

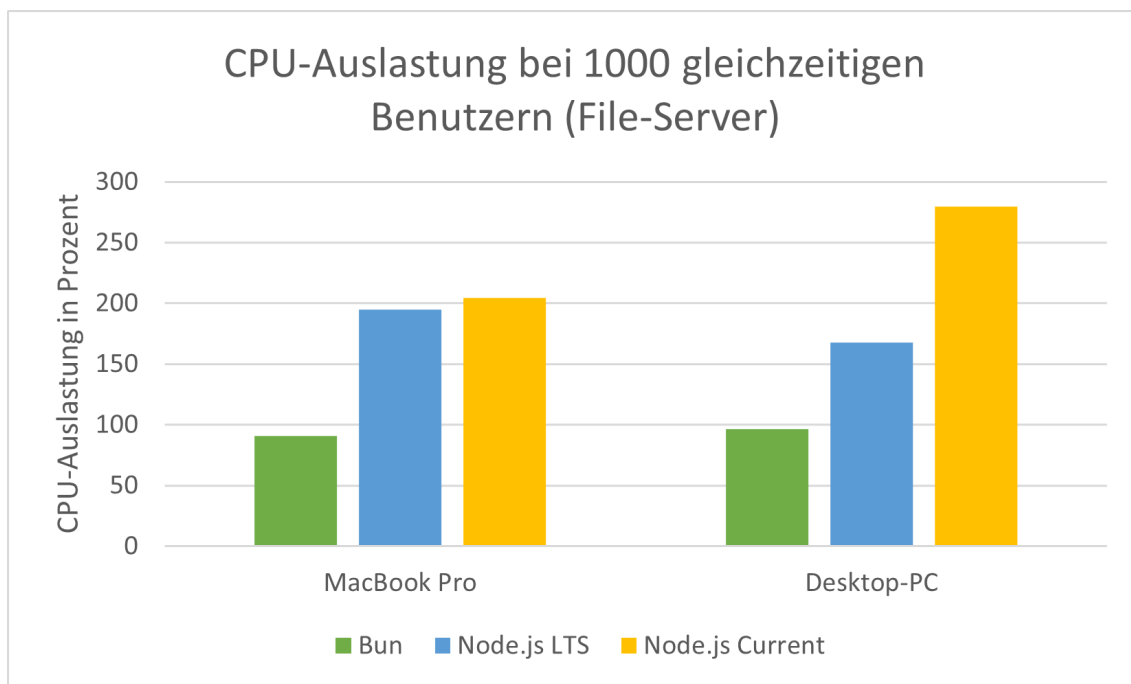


Abbildung 3.4: Datei-Server - CPU-Auslastung

Abbildung 3.4 zeigt die CPU-Auslastung bei 1.000 gleichzeitigen Benutzern in Prozent. Bei der CPU-Auslastung bedeuten 100%, dass ein Kern vollständig ausgelastet ist. Wenn ein Computer eine CPU mit 4 Kernen besitzt, beträgt die maximale CPU-Auslastung 400%. 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. Bun kommt mit einem Kern der CPU aus, während Node.js 2 oder auch 3 Kerne beansprucht. D. h. Node.js stellt ungefähr doppelt so starke Anforderungen an die CPU. Diese deutlichen Unterschiede in der CPU-Auslastung und Arbeitsspeichernutzung zeigen, dass Bun bei gleichzeitiger Last effizienter war und anspruchsvolle Aufgaben bewältigen konnte.

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

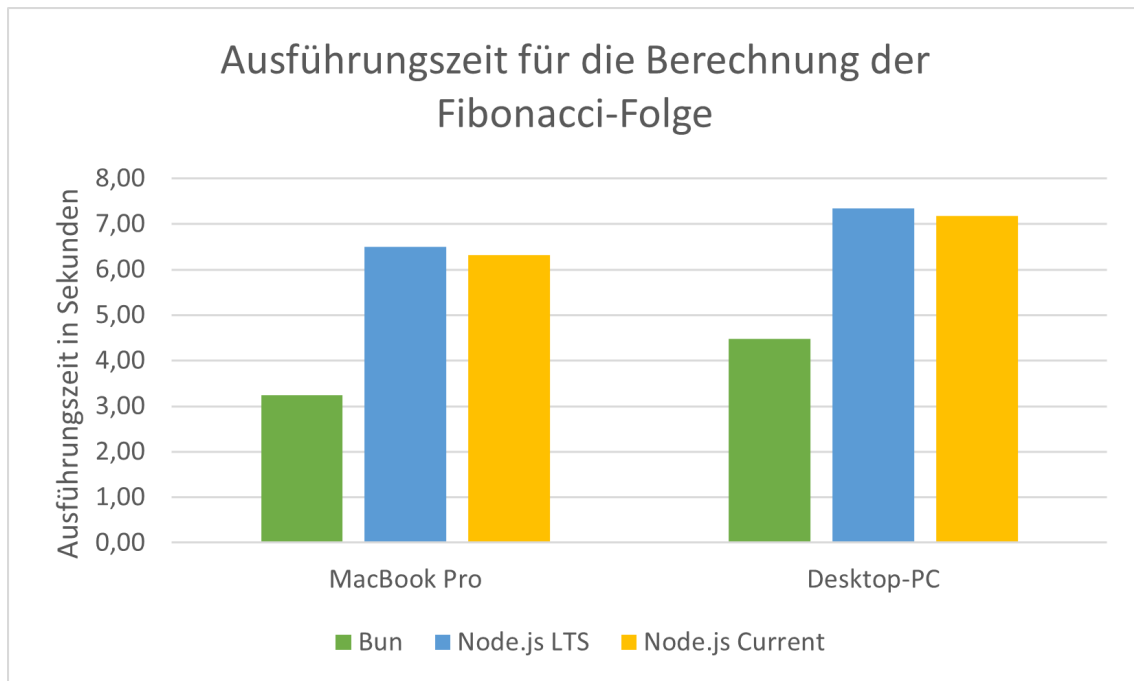


Abbildung 3.5: Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge

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. 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 (siehe Kapitel 2.2) die Effizienz von Bun im Umgang mit den verfügbaren Ressourcen gesteigert.

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. Die Analysen beschränken sich auf einfache Beispiele, die sich auf die Performance der Laufzeitumgebungen konzentrieren. In der Realität sind Anwendungs Quellcodes oft umfangreicher und komplexer. Die vorliegenden Ergebnisse geben daher nicht zwangsläufig die Performance solcher 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. Die Untersuchung sollte auf andere Hardware-Setups ausgeweitet werden, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Kapitel 4

Kompatibilität von Projekten

Dieses Kapitel behandelt die Kompatibilität zwischen Node.js und Bun. Es beschäftigt sich mit der Beantwortung der zweiten Leitfrage „Inwiefern sind Node.js-Projekte kompatibel mit Bun? Wie schwierig gestaltet sich die Migration?“. Nur wenn der Migrationsaufwand für den Wechsel der Laufzeitumgebung möglichst gering 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 [5] handelt es sich dabei um Express und NestJS.

4.1 Express

Express ist ein beliebtes Open-Source-Framework für Node.js, das die Entwicklung von Webanwendungen und APIs vereinfacht. Es stellt eine Vielzahl von Funktionen und Tools zur Verfügung, die Entwicklern bei der Handhabung von HTTP-Anfragen und -Antworten, Routing und weiteren Aufgaben zu helfen. Express nutzt ausschließlich die HTTP-Schnittstelle der Node.js-API. Diese implementiert Bun bereits (siehe Kapitel 2.2).[2]

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

- Winston als Logger,
- Helmet zum Schutz der API,

- Morgan zur Protokollierung der ein- und ausgehenden HTTP-Anfragen,
- Mongoose als ORM zur Speicherung von Daten in MongoDB,
- Joi zur Validierung der Bücher und Autoren in den HTTP-Anfragen,
- Compression zur Komprimierung der HTTP-Antworten,
- ein zentraler Error-Handler, um bei Fehlern verständliche Nachrichten an den Benutzer zurückzugeben.

Abkürzungsverzeichnis
und erklären?

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“, die auch von Buns Paketmanager genutzt wird. Für eine komplette Neuinstallation werden der Ordner „node_modules“ und die Datei „package-lock.json“ gelöscht. In diesem Ordner speichert Node.js alle lokal installierten Abhängigkeiten. Node.js nutzt die „package-lock.json“, um die installierten Abhängigkeiten lokal zu speichern. Dies sorgt dafür, dass auf anderen Geräten die Versionen installiert werden, die während der Entwicklung verwendet wurden.

Im zweiten Schritt müssen veraltete 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), 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, damit global auf Buns API ohne Kompilierungsfehler zugegriffen werden kann. Diese Datei definiert Einstellungen und Optionen für den TypeScript-Compiler. Die Werte der Konfigurationsoptionen, die sowohl in der aktuellen Datei als auch in in Buns Empfehlungen vorhanden sind, werden an den empfohlenen Wert angepasst [31].

Im dritten Schritt werden die Befehle in der „package.json“ angepasst, die die Ausführung des Projekts ermöglichen. Zum Ausführen des Projekts wird ab sofort „bun watch src/index.ts“ genutzt. Zuletzt müssen die Pakete mit Buns Paketmanager installiert werden, indem der Befehl „bun install“ ausgeführt wird. Danach kann die Anwendung gestartet werden.

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 Compiler den Import des Typs „Request“ aus dem Express-Framework nicht auflösen kann. Um die generelle Funktionsweise der App

zu überprüfen, werden die Importe aller Typen aus dem Express-Framework entfernt. Ein erneuter Start der App bestätigt die generelle Funktionsweise. Da es sich um ein Problem mit den Typdefinition handelt, liegt die Vermutung nahe, dass eine Einstellung des TypeScript-Compilers die Ursache ist. Eine minimale Express-App mit der empfohlenen Konfiguration des TypeScript-Compilers zeigt, dass die App auch mit den verwendeten Typen funktioniert. Der Vergleich der Konfiguration des Compilers in beiden Projekten zeigt, dass im aktuellen Projekt „emitDecoratorMetadata“ aktiviert ist. Diese Option steuert, ob der Compiler Metadaten über Dekoratoren im generierten JavaScript-Quellcode generiert. Ist diese Option aktiviert, kann zur Laufzeit auf die Metadaten der Dekoratoren zugegriffen werden. Mit deaktivierter Option startet die App. Das Absenden von HTTP-Anfragen an die Applikation zeigt, dass alle API-Operationen erfolgreich funktionieren. Offiziell unterstützt Bun diese Option seit der Version 1.0.3 und wurde auch erfolgreich getestet (siehe Kapitel 4.2) [32]. Möglicherweise liegt hier auch ein Fehler im Express-Framework vor.

Wenn man die App nun produktiv nutzen möchte, verwendet man minimierten Quellcode, der mit Hilfe eines Bundlers erstellt wird. Bun bietet einen integrierten Bundler an (siehe Kapitel 2.2). Dieser wird durch den Befehl „bun build src/index.ts --outdir ./dist --target bun“ erzeugt. Dabei ist es wichtig, Bun als Zielplattform zur Ausführung zu spezifizieren, da alternativ auch Node.js als Zielplattform genutzt werden kann. 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)“. Die Analyse zeigt, dass ein verwendeter Dekorator nicht funktioniert. Dieser sorgt dafür, dass beim Binding der Listener für die API-Funktionen 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 [33].

4.2 NestJS

NestJS ist ein Open-Source-Framework für die Entwicklung von serverseitigen Anwendungen und APIs in Node.js [34]. Es wurde entwickelt, um die Erstellung von skalierbaren, gut strukturierten und leicht wartbaren Anwendungen zu erleichtern. NestJS basiert auf TypeScript und bietet eine Abstraktionsebene über gängige

HTTP-Servern wie z. B. Express an. Alternativ können Entwickler über APIs andere Server integrieren und benutzen. Bun unterstützt NestJS noch nicht vollständig [35]. Mit Version 1.0.3 wird der TypeScript-Dekorator „emitDecoratorMetadata“ unterstützt, auf dem NestJS aufbaut [32]. Dadurch wird der Support von NestJS verbessert.

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:

- Rollenbasierte Authentifizierung und Autorisierung,
- ORM-Integration mit TypeORM,
- Logging mit Winston,
- Validierungen mit Joi.

Als Datenbank wird eine lokale PostgreSQL-Instanz verwendet. Den Verbindungsaufbau übernimmt TypeORM unter Angabe der korrekten Daten. Die Schritte der Migration entsprechen bis zum ersten Starten der Applikation der Migration von Express (siehe Kapitel 4.1). Daher werden im Folgenden nur die Unterschiede betrachtet. Die Konfiguration des Compilers entspricht den Empfehlungen. Lediglich die Optionen, die Bun als Best Practices deklariert, werden nicht übernommen. Denn diese sind in den Best Practices von NestJS explizit nicht enthalten.

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 [36]. Dabei handelt es sich um ein Open-Source-Build-Tool, das zum Erstellen und Kompilieren nativer Node Module eingesetzt wird [11]. 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 node-gyp auszuführen. Bun blockiert diese standardmäßig, da diese Skripte potentielle Sicherheitsrisiken darstellen [31]. 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.

Die Konsolenausgabe zeigt beim nächsten Start der App einen Laufzeitfehler an: „ReferenceError: Cannot access uninitialized variable.“. Dies tritt an den Stellen auf, in denen die Relation zwischen den Entitäten „Article“ und „User“ definiert werden.

Das führt zu einer zirkulären Abhängigkeit zwischen „User“ und „Article“. [37] zeigt, dass zirkuläre Abhängigkeiten vermieden werden können, wenn bei der Definition der Relation der Typ „User“ durch „Relation<User>“ ersetzt wird. Dann löst TypeORM die Definitionen entsprechend auf, ohne dabei zirkuläre Abhängigkeiten zu erzeugen.

Die Konsole zeigt beim erneuten Start der Applikation keine Fehler mehr. Sendet man nun HTTP-Anfragen an die API, wird die Fehlermeldung „Die Metadaten für die Entität User können nicht gefunden werden.“ zurückgegeben. TypeORM sucht aktuell alle Entitäten über ein String, der ein Pattern für den Pfad der Entitäten definiert. Laut [38] ist diese Variante veraltet. Die Entitäten müssen direkt als Referenz übergeben werden, indem sie über einen Import inkludiert werden.

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 sich ein neuer Benutzer registriert oder ein vorhandener Benutzer einloggt. Über die Log-Einträge kann nachvollzogen werden, dass der Server abstürzt, sobald Bcrypt zum Hashen der Passwörter aufgerufen wird. Laut [39] funktioniert Bcrypt nicht, wenn es asynchron aufgerufen wird. Ein synchroner Aufruf der entsprechenden Funktionen verläuft allerdings erfolgreich. Da ein synchroner Aufruf dieser Funktion die Ausführung anderer Aufgaben blockiert, ist diese Lösung nicht optimal. Bun bietet für diesen Zweck 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 funktionieren auch. Daraus folgt, dass NestJS unter Bun funktioniert. Allerdings bedeutet der Wechsel auf die API von Bun, dass das Versprechen eines Eins-zu-Eins-Ersatzes für Node.js nicht gehalten werden kann, da die Migration aktive Eingriffe in die Abhängigkeiten der Applikation erfordert.

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 zahlreiche Fehlermeldungen an. Der Bundler meldet viele Abhängigkeiten, die er nicht auflösen kann. Auffällig ist, dass die als fehlend deklarierten Abhängigkeiten in den direkten Abhängigkeiten des Projekts nicht vorhanden sind. [40] zeigt, dass bereits andere Entwickler mit demselben Problem konfrontiert sind. Da dieses Problem derzeit ungelöst ist, funktioniert der Bundler für NestJS nicht. Hier muss gewartet werden, bis eine entsprechende Lösung per Update nachgereicht wird.

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 Migration von Node.js-Projekten auf Bun kann erfolgreich sein, erfordert jedoch in der Regel Anpassungen in den Abhängigkeiten und Konfigurationen. Der Aufwand hängt stark von der Applikation und den verwendeten Abhängigkeiten ab. Beispielsweise erfordert die Umstellung der NestJS-Applikation zusätzliche Anpassungen, insbesondere bei der asynchronen Verwendung von Bcrypt. Obwohl die Anwendung unter Bun funktioniert, ist festzustellen, dass die Migration aktive Eingriffe in die Abhängigkeiten der Anwendung erfordert. Zusätzlich funktioniert der Bundler nicht. Die Tatsache, dass die minifizierte Version der NestJS-Anwendung unter Bun nicht funktionierte, wirft Fragen zur Stabilität und Zuverlässigkeit von Bun auf. Es bleibt abzuwarten, ob zukünftige Updates diese Probleme beheben können.

Es gilt anzumerken, dass die verwendeten Beispiele einfachere Applikationen waren. Produktiv genutzte 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

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst und reflektiert. Darauffolgend wird ein Ausblick auf die Zukunft von Bun und über mögliche weitergehende Forschungsthemen gegeben.

5.1 Fazit

Diese Arbeit evaluiert Bun im Vergleich zu dem etablierten Standard Node.js. Dabei liegt der Fokus auf zwei Hauptaspekten: Performance und Kompatibilität. Die Performance wurde durch mehrere Benchmarks analysiert, während die Kompatibilität durch die Migration existierender Node.js-Projekte zu Bun überprüft wurde.

Die Performance-Tests beantworten die erste der drei Leitfragen „Welche konkreten Leistungsverbesserungen können in Bun 1.0 im Vergleich zu Node.js festgestellt werden, und wie lassen sie sich quantifizieren?“ (siehe Kapitel 1.2). Die Ergebnisse zeigen, dass Bun in allen Szenarien eine signifikant bessere Leistung als Node.js aufweist (siehe Kapitel 3.4). Dies äußert sich in einer deutlich verringerten Latenz, einer geringeren Inanspruchnahme von Arbeitsspeicher und CPU-Ressourcen. Dies gilt sowohl für die Verarbeitung von Netzwerkanfragen als auch für die Ausführung rechenintensiver Aufgaben. Bun besitzt das Potenzial, in realen Szenarien erheblich schneller zu sein als Node.js. Insbesondere die effiziente Nutzung der Ressourcen könnte erhebliche Auswirkungen auf die Skalierbarkeit und Kosten in Produktionsumgebungen besitzen.

Die zweiten Leitfrage „Inwiefern sind Node.js-Projekte kompatibel mit Bun? Wie schwierig gestaltet sich die Migration?“ (siehe Kapitel 1.2) beschäftigt sich mit der Kompatibilität von bestehenden Node.js-Projekten. Die Analyse (siehe Kapitel 4) zeigt, dass die Migration bestehender Projekte in der Regel Anpassungen in den

Abhängigkeiten und Konfigurationen erfordert. Der Aufwand dafür hängt stark von der spezifischen Anwendung und den genutzten Abhängigkeiten ab. Die Migration der untersuchten Express- und NestJS-Anwendungen war erfolgreich, erforderte aber aktive Eingriffe. Darüber hinaus führt die Verwendung des Bundlers im NestJS-Projekt zu Fehlern. Das wirft Fragen zur Zuverlässigkeit und Stabilität von Bun auf.

Zusammenfassend lässt sich 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?“ (siehe Kapitel 1.2) wie folgt beantworten: Bun ist aufgrund seiner hohen Performance eine gute Alternative im Vergleich zu Node.js. Allerdings benötigt Bun etwas Zeit, um offene Fehler zu lösen und die Kompatibilität mit der Node.js-API und anderen Frameworks zu verbessern. Für neuen Projekten ohne zusätzliche Frameworks, kann Bun aufgrund der besseren Performance bereits in Betracht gezogen werden.

5.2 Ausblick

In zukünftigen Forschungsarbeiten kann es interessant sein, die Performance und Kompatibilität von tatsächlich produktiv verwendeten Applikationen zu analysieren. Diese weisen oft komplexere Lösungen auf und verwenden bereits ein Framework oder andere Bibliotheken, das die Performance der verwendeten Laufzeitumgebung beeinflussen kann. Darüber hinaus können weitere Aspekte, wie die Sicherheit, Stabilität oder Buns Paketmanager betrachtet werden. Zusätzlich können die Performance und Kompatibilität von Buns Bundler und der integrierten Bibliothek zum Testen analysiert werden und mit etablierten Lösungen verglichen werden. Dadurch ist eine komplette Bewertung von Bun mit allen integrierten Komponenten möglich.

Schließlich bleibt abzuwarten, wie sich Bun weiterentwickelt und ob es sein Versprechen hinsichtlich Performance und Kompatibilität auch in zukünftigen Versionen erfüllt. Zukünftige Updates können die identifizierten Probleme lösen und die Kompatibilität verbessern. Denn die Roadmap für die Entwicklung besitzt viele offene Punkte. Gleichzeitig existieren zahlreiche offene Fehler, beispielsweise die Funktionsfähigkeit des Bundlers (siehe Kapitel 4.2). Daher ist es sinnvoll, die Leistung und den Migrationsprozess in regelmäßigen Abständen neu zu analysieren, um die Entwicklungsfortschritte zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] JARED SUMNER und PARTOVI, ASHCON, MCDONNEL, COLIN. *Bun 1.0*, 2023. URL: <https://bun.sh/blog/bun-v1.0>.
- [2] ETHAN BROWN. *Web development with Node and Express : leveraging the JavaScript stack*, Beijing, November 2019. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2295093>.
- [3] 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, Hrsg. *Introduction to Node.js*, 2022. URL: <https://nodejs.dev/en/learn/>.
- [11] OPENJS FOUNDATION. *Node.js API reference documentation*, o. J. URL: <https://nodejs.org/api/documentation.html>.

- [12] OPENJS FOUNDATION. *The Event Loop*, o. J. URL: <https://nodejs.org/en/docs/guides/event-loop-timers-and-nexttick#what-is-the-event-loop>.
- [13] NIMESH CHHETRI. *A comparative analysis of node.js (server-side javascript)*. 2016. URL: https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/5/.
- [14] MATTHEW TYSON. *Explore bun.js: The all-in-one JavaScript runtime*, 2023. URL: <https://www.infoworld.com/article/3688330/explore-bunjs-the-all-in-one-javascript-runtime.html>.
- [15] BUN, Hrsg. *Offizielle Dokumentation*, URL: <https://bun.sh/docs>.
- [16] ZIG SOFTWARE FOUNDATION. *Why Zig When There is Already C++, D, and Rust?*, o. J. URL: https://ziglang.org/learn/why_zig_rust_d_cpp/#a-package-manager-and-build-system-for-existing-projects.
- [17] APPLE, Hrsg. *WebKit*, o. J. URL: <https://webkit.org/>.
- [18] APPLE. *WebKit Documentation - JavaScriptCore*, o.J. URL: <https://docs.webkit.org/Deep%20Dive/JSC/JavaScriptCore.html>.
- [19] 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: [10.1145/3423211.3425682](https://doi.org/10.1145/3423211.3425682).
- [20] ISO/IEC 25010, 2022. URL: <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010>.
- [21] ISO / IEC. *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*, URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:25010:ed-1:v1:en>.
- [22] IEEE. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*, Piscataway, NJ, USA. DOI: [10.1109/IEEESTD.1990.101064](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1990.101064).
- [23] MARIO BARBACCI u. a. „Quality Attributes“. In: (1995).
- [24] MAKSIM FEDOSEEV und ET AL. *Bombardier*, 2016. URL: <https://github.com/codesenberg/bombardier>.
- [25] FREE SOFTWARE FOUNDATION. *GNU Time*, 2018. URL: <https://www.gnu.org/software/time/>.

- [26] BERT VERHELST. *Add note that windows binaries are not yet available*, 2023. URL: <https://github.com/oven-sh/bun/pull/4780>.
- [27] JARED SUMNER. *Bun v1.0.6*, 2023. URL: <https://bun.sh/blog/bun-v1.0.6>.
- [28] OPENJS FOUNDATION. *Node.js*, o. J. URL: <https://nodejs.org/en>.
- [29] OPENJS FOUNDATION. *Node.js 20 ChangeLog*, 2023. URL: https://github.com/nodejs/node/blob/main/doc/changelogs/CHANGELOG_V20.md.
- [30] OPENJS FOUNDATION. *Node.js 21 ChangeLog*, 2023. URL: https://github.com/nodejs/node/blob/main/doc/changelogs/CHANGELOG_V21.md#21.0.0.
- [31] OVEN-SH. *Add a trusted dependency with Bun*, 2023. URL: <https://bun.sh/guides/install/trusted>.
- [32] COLIN MCDONNEL. *Bun v1.0.3*, 2023. URL: <https://bun.sh/blog/bun-v1.0.3>.
- [33] MICROSOFT, Hrsg. *TSCConfig Reference*, 2023. URL: <https://www.typescriptlang.org/tsconfig#experimentalDecorators>.
- [34] KAMIL MYSLIWIEC. *Introduction*, 2023. URL: <https://docs.nestjs.com/>.
- [35] JARRED SUMNER. *Support NestJS*, 2022. URL: <https://github.com/oven-sh/bun/issues/1641>.
- [36] NICOLAS DEL GOBBO und ET AL. *node.bcrypt.js*, 2018. URL: <https://github.com/kelektiv/node.bcrypt.js>.
- [37] TYPEORM. *TypeORM - Dokumentation*, URL: <https://typeorm.io/#relations-in-esm-projects>.
- [38] TYPEORM. *Changelog*, 2021. URL: <https://github.com/typeorm/typeorm/blob/master/CHANGELOG.md#deprecations>.
- [39] JARED SUMNER. *bcrypt async functions segfault*, 2023. URL: <https://github.com/oven-sh/bun/issues/3201>.
- [40] KRYSTIAN POSTEK. *Unable to build NestJS based project*, 2023. URL: <https://github.com/oven-sh/bun/issues/4803>.

Anhang A

Ergebnisse des Benchmarks

35

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.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)
1000 Benutzer						
Nr.	Request/s	Durchschn. Latenz (ms)	Max. Latenz (ms)	Erfolgr. Req (%)	Max. CPU-Ausl. (%)	Max. RAM (kB)
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
Tabelle A.10: 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	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
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

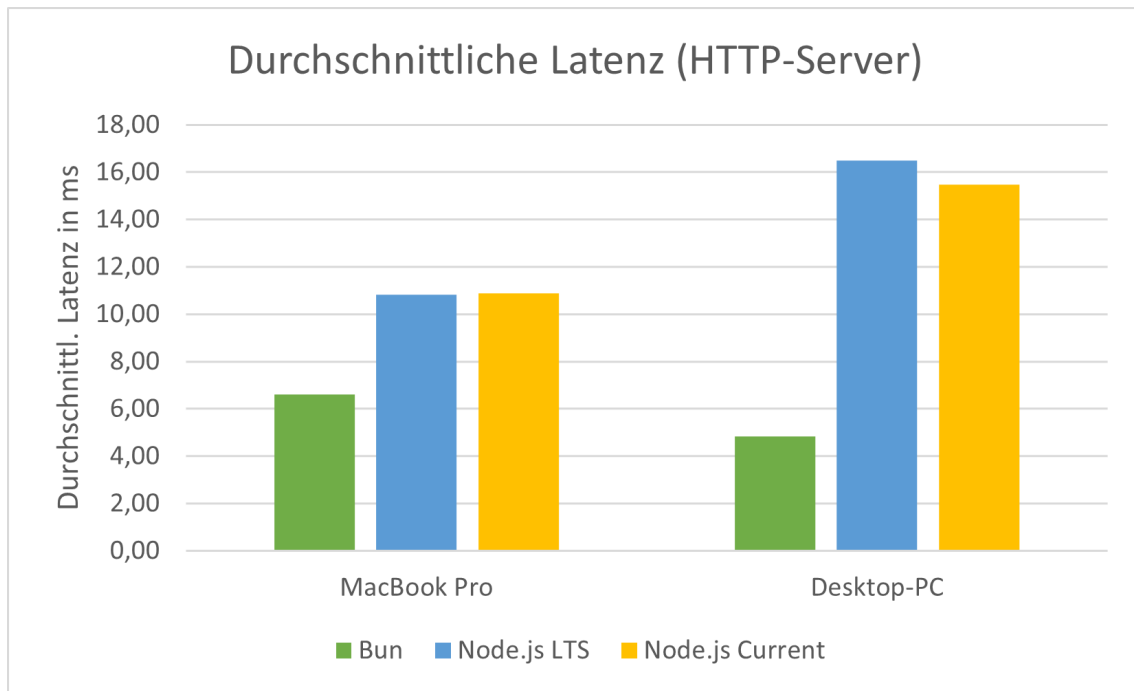


Abbildung A.1: Ausführungszeit für die Berechnung der Fibonacci-Folge