

# Bachelorarbeit

## Analyse der Echtzeitfähigkeit von Micro-ROS und FreeRTOS am Beispiel einer Robotersteuerungssoftware

An der Fachhochschule Dortmund  
im Fachbereich Informatik  
Studiengang Technische Informatik  
erstellte Thesis  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science  
B. Sc.

Xu, Zijian  
geboren am 25.09.1998  
7204211

**Betreuung durch:** Prof. Dr. Christof Röhrig  
M. Sc. Alexander Miller  
**Version vom:** Dortmund, 22. Mai 2025

## Kurzfassung

Diese Arbeit analysiert die Echtzeitfähigkeit von Micro-ROS und FreeRTOS anhand einer Robotersteuerungssoftware. Ziel ist der Vergleich beider Systeme hinsichtlich ihres Echtzeitverhaltens mit Schwerpunkt auf den Ausführungszeiten. Dazu wird zunächst die bestehende Steuerungssoftware von Micro-ROS auf FreeRTOS portiert. Anschließend wird eine zyklengetreue Messmethode mittels Data Watchpoint and Trace Unit (DWT) für den Programmlauf entwickelt. Dadurch lassen sich Laufzeitdaten aufzeichnen, die das Echtzeitverhalten des Systems abbilden, um abschließend visuell dargestellt und ausgewertet zu werden. Die Ergebnisse verdeutlichen die unterschiedlichen Schwerpunkte beider Plattformen: Micro-ROS punktet durch die Kompatibilität mit dem ROS-Ökosystem, während FreeRTOS mit minimalen Latenzen und deterministischem Scheduling deutlich besseres Echtzeitverhalten bietet. Die Analyse bestätigt zudem den maßgeblichen Einfluss der Cache-Nutzung auf die Rechenleistung.

## Abstract

This thesis analyzes the real-time capabilities of micro-ROS and FreeRTOS using a robotic control software. The goal is to compare both systems regarding their real-time behavior emphasized on the execution times. First, the existing micro-ROS control software is ported to FreeRTOS. Next, a cycle-accurate measurement method for program execution based on ARM's Data Watchpoint and Trace Unit (DWT) is developed. Finally, the runtime data is evaluated. The evaluation of the results highlights the different strengths of both platforms: micro-ROS stands out due to its compatibility with the ROS ecosystem, while FreeRTOS achieves superior real-time behavior through minimal latencies and deterministic scheduling. Additionally, the analysis confirms the significant impact of the cache utilization on system performance.

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>                                    | <b>II</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>                                      | <b>III</b> |
| <b>Quellcodeverzeichnis . . . . .</b>                                     | <b>IV</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis . . . . .</b>                                    | <b>V</b>   |
| <b>1 Einleitung . . . . .</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2 Grundlagen . . . . .</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 FreeRTOS . . . . .  | 3          |
| 2.2 Caches . . . . .  | 6          |
| 2.2.1 Cache-Kohärenz . . . . .  | 8          |
| 2.3 Data Watchpoint and Trace Unit . . . . .                              | 9          |
| <b>3 Vorbereitung . . . . .</b>   | <b>10</b>  |
| 3.1 Umstellung auf FreeRTOS . . . . .                                     | 10         |
| 3.1.1 Übertragung von Sollgeschwindigkeiten . . . . .                     | 10         |
| 3.1.2 Steuerungskomponenten als FreeRTOS-Tasks . . . . .                  | 13         |
| 3.2 Aktivierung von Instruktions- und Datencache . . . . .                | 16         |
| <b>4 Umsetzung . . . . .</b>  | <b>20</b>  |
| 4.1 Multi-Producer-Senke . . . . .  | 20         |
| 4.1.1 Aufbau . . . . .  | 21         |
| 4.1.2 Schreibvorgang . . . . .  | 22         |
| 4.1.3 Lesevorgang . . . . .   | 24         |
| 4.2 Aufzeichnung von Zyklustempeln . . . . .                              | 26         |
| 4.3 Streaming-Mode via Button . . . . .                                   | 31         |
| 4.4 Exkurs: Laufzeitdaten – Überblick . . . . .                           | 31         |
| <b>5 Evaluation . . . . .</b>   | <b>34</b>  |
| 5.1 Laufzeit-Statistik – Micro-ROS . . . . .                              | 36         |
| 5.2 Laufzeit-Statistik – FreeRTOS . . . . .                               | 37         |
| 5.3 Vergleich zwischen Micro-ROS und FreeRTOS . . . . .                   | 38         |
| 5.3.1 Experimentelle Bestimmung der maximalen Regelungsfrequenz . . . . . | 38         |
| 5.3.2 Dauer von Regelungsfunktionen . . . . .                             | 44         |
| <b>6 Zusammenfassung . . . . .</b>  | <b>46</b>  |
| <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>                                     | <b>I</b>   |

## Abbildungsverzeichnis

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Micro-ROS Architektur[Kou23, S. 6]                          | 1  |
| 2  | Prioritätsinversion   | 4  |
| 3  | Prioritätsvererbung   | 5  |
| 4  | STM32F7 Systemarchitektur-Matrix [STMb, S. 9]               | 6  |
| 5  | STM32F7 Speicheradressen [STMb, S. 14]                      | 7  |
| 6  | MPU-Konfiguration aus STM32CubeMX                           | 17 |
| 7  | Micro-ROS-Agent Debugausgaben                               | 18 |
| 8  | Laufzeit-Statistik unter Micro-ROS – Überblick              | 34 |
| 9  | Laufzeit-Statistik unter FreeRTOS – Überblick               | 34 |
| 10 | Laufzeit-Statistik unter Micro-ROS – Ausschnitt             | 36 |
| 11 | Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter FreeRTOS               | 39 |
| 12 | Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt  | 40 |
| 13 | Laufzeit-Statistik mit 5000 Hz unter FreeRTOS               | 40 |
| 14 | Laufzeit-Statistik mit 5000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt  | 41 |
| 15 | Laufzeit-Statistik mit 10000 Hz unter FreeRTOS              | 42 |
| 16 | Laufzeit-Statistik mit 10000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt | 42 |
| 17 | Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter Micro-ROS              | 44 |
| 18 | Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter Micro-ROS – Ausschnitt | 44 |

## Tabellenverzeichnis

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Kommunikationskanal-Matrix . . . . .                                 | 14 |
| 2  | Laufzeit-Statistik ohne Caching . . . . .                            | 36 |
| 3  | Laufzeit-Statistik mit Caching . . . . .                             | 36 |
| 4  | Laufzeit-Statistik ohne Caching . . . . .                            | 37 |
| 5  | Laufzeit-Statistik mit Caching . . . . .                             | 37 |
| 6  | Laufzeit-Statistik ohne Caching . . . . .                            | 38 |
| 7  | Laufzeit-Statistik mit Caching . . . . .                             | 38 |
| 8  | Laufzeit-Statistik ohne Caching . . . . .                            | 38 |
| 9  | Laufzeit-Statistik mit Caching . . . . .                             | 38 |
| 10 | Vergleich der Rechenzeiten zwischen Micro-ROS und FreeRTOS . . . . . | 45 |

## Quellcodeverzeichnis

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Definition Speicherbereich im Linker-Script für STM32F7 . . . . .     | 7  |
| 2  | Cache-Funktionen . . . . .  | 8  |
| 3  | Definition der Struktur für die Sollgeschwindigkeit . . . . .         | 10 |
| 4  | Definition des UART-Daten-Frames . . . . .                            | 11 |
| 5  | Datenempfang über UART via Interrupt . . . . .                        | 11 |
| 6  | FreeRTOS-Task zum Parsen von Geschwindigkeitswerten . . . . .         | 12 |
| 7  | ROS2-Node Implementierung für Geschwindigkeitsübertragung . . . . .   | 13 |
| 8  | CRC-Berechnung im Konstruktor . . . . .                               | 13 |
| 9  | FreeRTOS-Task zur Encoderwertabfrage und -übertragung . . . . .       | 14 |
| 10 | Deklaration der Queue-Objekte . . . . .                               | 14 |
| 11 | Initialisierung von FreeRTOS-Tasks . . . . .                          | 15 |
| 12 | Dynamische Allokation eines FreeRTOS-Tasks . . . . .                  | 15 |
| 13 | Statische Allokation eines FreeRTOS-Tasks . . . . .                   | 16 |
| 14 | Statische Allokation einer FreeRTOS-Queue . . . . .                   | 16 |
| 15 | Modifizierung des ST-Treibercodes in Diffansicht [Mau25] . . . . .    | 18 |
| 16 | Struktur der Senke . . . . .  | 22 |
| 17 | atomare Schreiboperation in der Senke . . . . .                       | 23 |
| 18 | Blockierende Schreiboperation in die Senke . . . . .                  | 24 |
| 19 | Implementierung der Task zur Datenverarbeitung . . . . .              | 25 |
| 20 | Callback-Funktion für die Task-Notification . . . . .                 | 26 |
| 21 | Interrupt-Callback bei Abschluss einer UART-Übertragung . . . . .     | 26 |
| 22 | Initialisierung der Senke mit DMA . . . . .                           | 26 |
| 23 | Aktivierung der DWT [Plo16] . . . . .                                 | 27 |
| 24 | Definition des Zyklenstempels . . . . .                               | 27 |
| 25 | Konkrete Definition der Trace-Hook-Makros . . . . .                   | 28 |
| 26 | Funktion zur Zyklenstempelgenerierung beim Kontextwechsel . . . . .   | 28 |
| 27 | Temporärpuffer mit dessen atomaren Schreibzeiger und Aktivierungsflag | 28 |
| 28 | Callback zur Ausgabe von ISR-Zyklenstempeln . . . . .                 | 29 |
| 29 | Funktion zur Ausgabe von Zyklenstempeln . . . . .                     | 29 |
| 30 | Funktion zur Ausgabe von Zyklenstempeln . . . . .                     | 29 |
| 31 | Beispielnutzung einer RAII-Struktur . . . . .                         | 30 |
| 32 | RAII-basierter Zyklenstempel mit Memory-Barrier . . . . .             | 30 |
| 33 | Interrupt-Callback für den User-Button . . . . .                      | 31 |
| 34 | Ausschnitt der Profiling-Daten . . . . .                              | 32 |
| 35 | Profiling-Daten in aufsteigender Reihenfolge . . . . .                | 33 |
| 36 | Auswertung Micro-ROS . . . . .  | 35 |
| 37 | Auswertung FreeRTOS . . . . .   | 35 |
| 38 | Profiling-Daten bei 5000 2000Hz . . . . .                             | 41 |
| 39 | Profiling-Daten bei 10000 5000Hz . . . . .                            | 43 |

## Abkürzungsverzeichnis

**DWT** Data Watchpoint and Trace Unit

**RTOS** Real-Time Operating System

**ROS 2** Robot Operating System 2

**DDS** Data Distribution Service

**SRAM** Static Random Access Memory

**AXI** Advanced eXtensible Interface

**AHB** High-performance Bus

**TCM** Tightly Coupled Memory

**HAL** Hardware Abstraction Library

**LwIP** Lightweight IP

**MPU** Memory Protection Unit

**MPSC** Multi Producer Single Consumer

**MPMC** Multi Producer Multi Consumer

**ISR** Interrupt Service Routine

**RAII** Resource Acquisition Is Initialization

**CAS** Compare-And-Swap

**EXTI** EXTernal Interrupt/Event

**XRCE** eXtremely Resource Constrained Environment

# 1 Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit hat zunächst als Ziel, die bestehende Robotersteuerungssoftware von Micro-ROS auf FreeRTOS zu portieren, um die Echtzeitleistung beider Plattformen miteinander zu vergleichen.

Beide Systeme sind für die PID-geregelte Steuerung eines mobilen Roboters auf einem Cortex-M7 Mikrocontroller ausgelegt, unterscheiden sich aber in ihrer zugrundeliegenden Softwarearchitektur: Während Micro-ROS auf dem Robot Operating System 2 (ROS 2) Framework aufbaut und somit eine höhere Abstraktionsebene durch eine standardisierte Kommunikationsschnittstelle in Form einer integrierten Data Distribution Service (DDS)-Middleware bietet, basiert dies selbst auf einem Real-Time Operating System (RTOS) wie FreeRTOS (1). Die Portierung kann daher als eine Reduzierung von Abhängigkeiten betrachtet werden. Dies ermöglicht eine direktere und damit effizientere Nutzung der zugrundeliegenden Echtzeit- sowie Speicherressourcen.

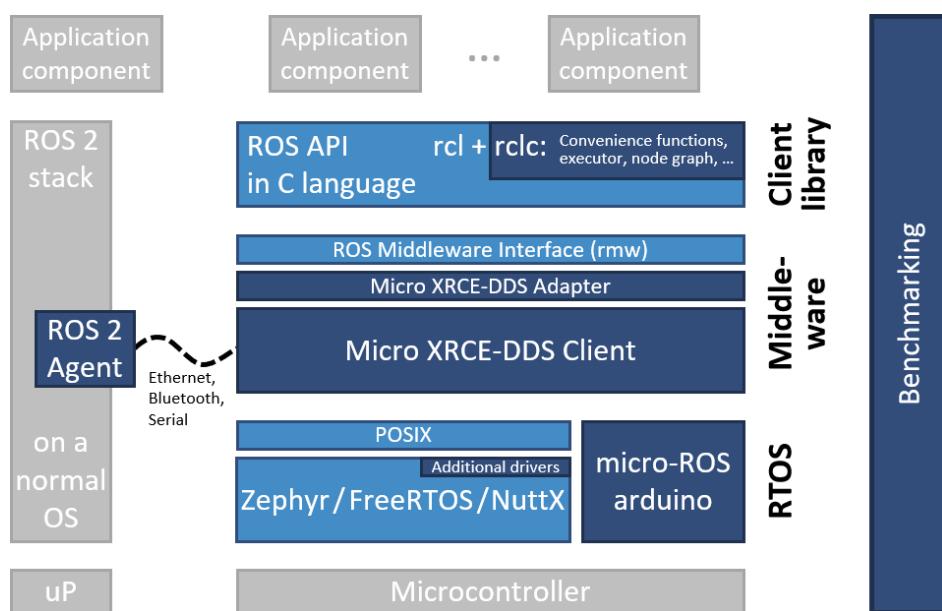


Abbildung 1: Micro-ROS Architektur[Kou23, S. 6]

Daher wird die Steuerungssoftware erneut auf Basis von FreeRTOS implementiert, um demnach die Echtzeitleistung auf beiden Plattformen zu analysieren und zu vergleichen. Die Analyse soll unter anderem aufzeigen, inwiefern FreeRTOS durch die Eliminierung dieser zusätzlichen Abhängigkeit eine effizientere und leichtgewichtigere Lösung darstellt. Dabei soll der Einsatz einer zyklengenauen Messung des Programmblaufs ermöglicht werden, um fundierte Aussagen über das Echtzeitverhalten beider Systeme zu treffen und den Leistungsgewinn quantitativ zu belegen.

Die Arbeit gliedert sich in vier Teile: Nach der Einführung in die grundlegenden Konzepte wird zunächst die Implementierung der Steuerungssoftware auf FreeRTOS be-

schrieben. Anschließend wird die Implementierung zur Erfassung von Laufzeitdaten detailliert gezeigt. Den Abschluss bildet die quantitative Präsentation der Ergebnisse, deren Bewertung sowie mögliche Optimierungsansätze.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zentralen Themen dieser Arbeit vorgestellt. Dazu gehören die Funktionsweise von FreeRTOS, die Prinzipien von Caches sowie die Erläuterung der Data Watchpoint and Trace Unit (DWT).

### 2.1 FreeRTOS

FreeRTOS ist ein leichtgewichtiges, quelloffenes RTOS, das speziell für Mikrocontroller und eingebettete Systeme entwickelt wurde. Es zeichnet sich unter anderem durch ein echtzeitfähiges [Fre23] und deterministisches Ausführungsverhalten sowie eine Konfigurierbarkeit von Heap-Allokationen aus.

FreeRTOS unterscheidet sich von der Bare-Metal-Programmierung dadurch, dass es dem Nutzer einen umfangreichen Abstraktionslayer in Kombination mit einem prioritätsbasierten Scheduling-Verfahren bereitstellt. Diese Abstraktionen ermöglichen es, komplexe (Echtzeit-)Operationen zu bewältigen, ohne dass der Nutzer die benötigten Funktionalitäten selbst implementieren muss. Beispiele hierfür sind unter anderem Timer mit konfigurierbarer Genauigkeit (basierend auf dem sogenannten Tick [Frec]), Queues, Semaphore sowie Mutexe.

Im Fokus dieser Arbeit stehen Queues für den Datenaustausch der Steuerungssoftware sowie sogenannte „Direct Task Notifications“ zur Inter-Task-Synchronisation. Ebenfalls relevant sind Mutexe und „Trace Hooks“ zur Erfassung von Laufzeitdaten. Diese Komponenten werden im Folgenden detailliert erläutert.

**Queues** Queues sind eine Kernkomponente von FreeRTOS. Sie ermöglichen nicht nur eine Inter-Task-Kommunikation durch threadsicheren FIFO-Datenaustausch, sondern dienen auch als Task-Synchronisationsmechanismen: Die Semaphore und Mutexe sind schlicht auf Queues aufgebaut [Free, Freb].

**Semaphore und Mutexe** Semaphore und Mutexe dienen zur Koordination des Zugriffs auf gemeinsame Ressourcen. Semaphore sind aber im Vergleich zu Mutexen besonders geeignet für Inter-Task-Synchronisation aufgrund ihrer Einfachheit [Frea]: Sie sind Synchronisationsmechanismen *ohne* Prioritätsvererbung – ein Konzept, bei dem eine niedrig priorisierte Task, die einen *Mutex* hält, temporär auf die höhere Priorität der auf den *Mutex* wartenden Task angehoben wird. Dieses Konzept ist kritisch für eine effiziente Zugriffskoordinierung auf gemeinsame Ressourcen, was mit Semaphoren

nicht gewährleistet werden kann und folglich zu Prioritätsinversion führen kann: Eine höher priorisierte Task wird blockiert, während der Scheduler eine andere, niedriger priorisierte Task ausführt, die den geforderten Mutex möglicherweise nicht besitzt – und das so lange, bis die Task mit dem Mutex die Ressource freigibt.

Die folgenden Sequenzdiagramme (2, 3) zeigen den Vergleich zwischen Prioritätsinversion bei Verwendung eines Semaphors und der Prioritätsvererbung bei einem Mutex, dargestellt an drei Tasks mit unterschiedlichen Prioritätsstufen:

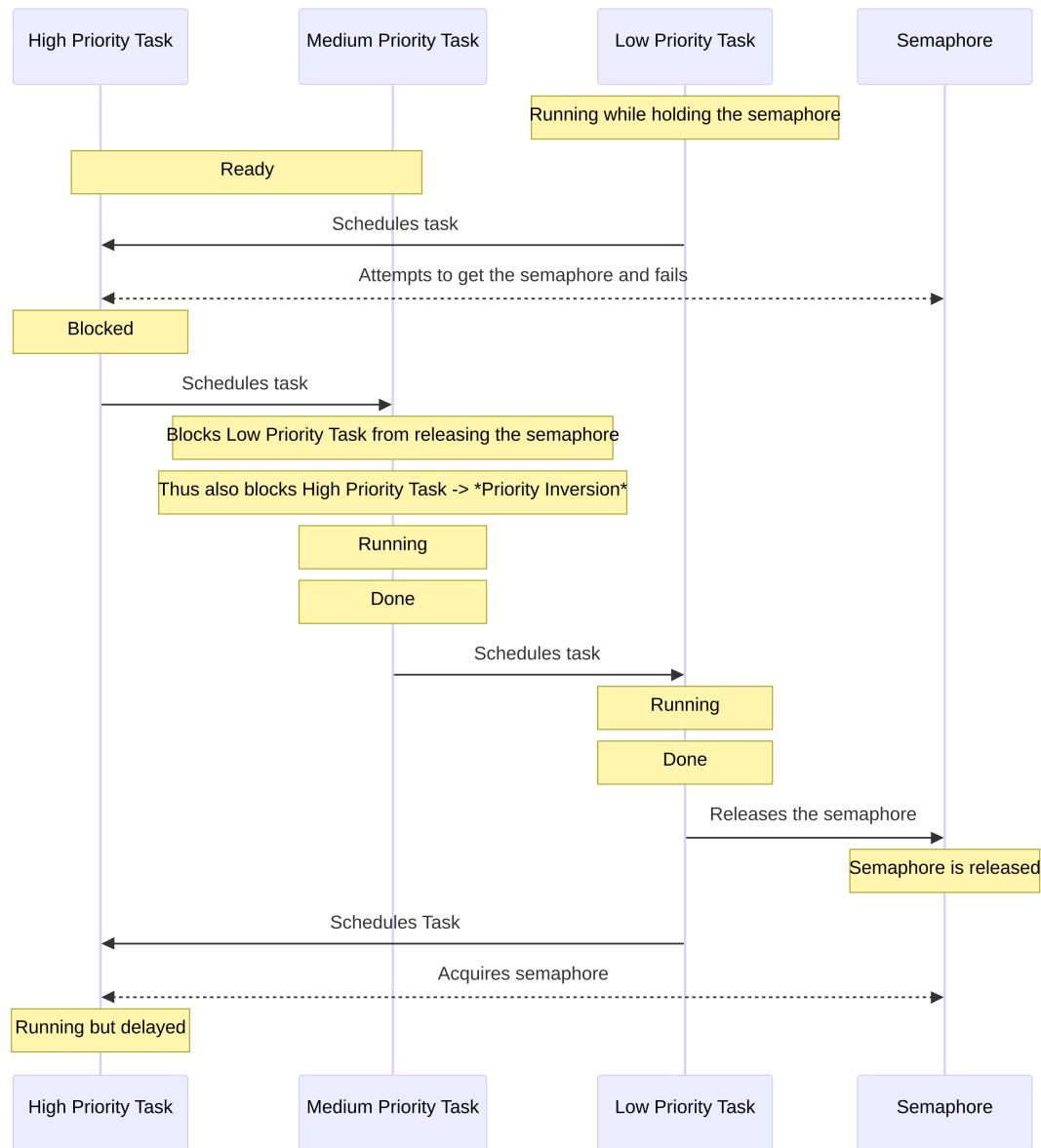


Abbildung 2: Prioritätsinversion

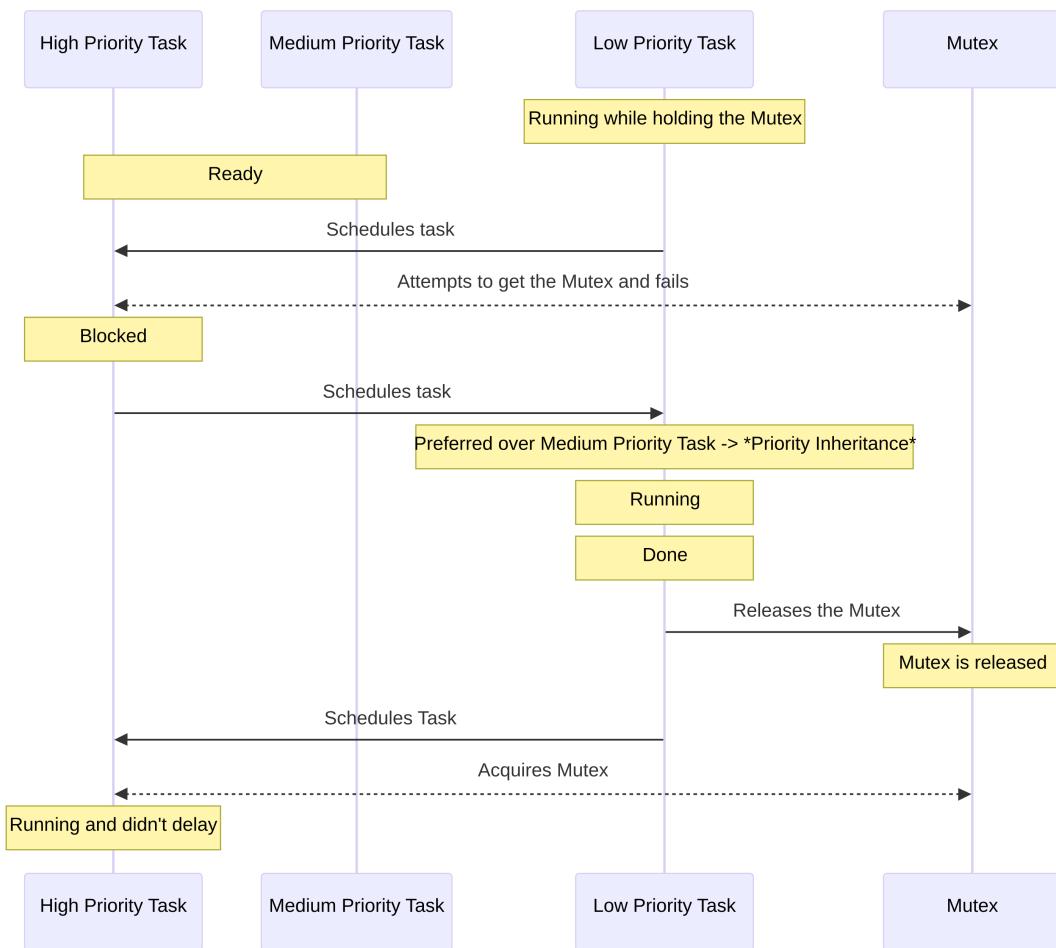


Abbildung 3: Prioritätsvererbung

**Direct-Task-Notifications** Direct-Task-Notifications sind ein effizienterer und ressourcenschonenderer Mechanismus zur Inter-Task-Synchronisation: Insbesondere soll das Entblocken mittels Direct-Task-Notifications bis zu 45 % schneller sein und weniger RAM benötigen [Freg]. Im Gegensatz zu Semaphoren, die als zusätzliche separate Objekte fungieren, koordinieren die Tasks direkt miteinander über einen internen Zähler [Freh]. Analog zur Verwendung von Semaphoren wird mittels Funktionen wie `xTaskNotifyGive()` dieser Zähler inkrementiert [Frei], während `ulTaskNotifyTake()` ihn wieder dekrementiert [Frej].

**Trace Hooks** „Trace Hooks“ sind spezielle, von FreeRTOS bereitgestellte Makros. Sie ermöglichen beispielsweise die Verfolgung bzw. Protokollierung von Systemereignissen. Diese Makros werden direkt innerhalb von Interrupts beim Scheduling aufgerufen und sollten stets vor der Einbindung von `FreeRTOS.h` definiert werden [Fred].

## 2.2 Caches

Caches sind schnelle Speicherkomponenten, die häufige Daten- und Befehlzugriffe beschleunigen und den Energieverbrauch senken, wodurch jedoch die Determinierbarkeit der Leistung verringert wird [ARMc]. In modernen Mikrocontrollern wie dem Cortex-M7 ist der L1-Cache (Level 1 Cache – die kleinste aber schnellste Cachekomponente) jeweils in einen Datencache (D-Cache) sowie einen Instruktionscache (I-Cache) unterteilt [STMb, S. 6]. Im Vergleich zum Flash-Speicher, bei dem Zugriffe mehrere Taktzyklen erfordern [Sch19], ermöglichen L1-Caches Zero-Wait-State-Zugriffe [STMb, S. 6]. Dadurch kann der Prozessor ohne zusätzliche Wartezyklen auf Daten zugreifen.

Der L1-Cache kann nur mit der Advanced eXtensible Interface (AXI)-Busschnittstelle genutzt werden [STMa, S. 4]. Hierzu zählen unter anderem der Flash, der Static Random Access Memory (SRAM) sowie die Peripheriebusse, die alle über den High-performance Bus (AHB) an die AXI angebunden sind (4).

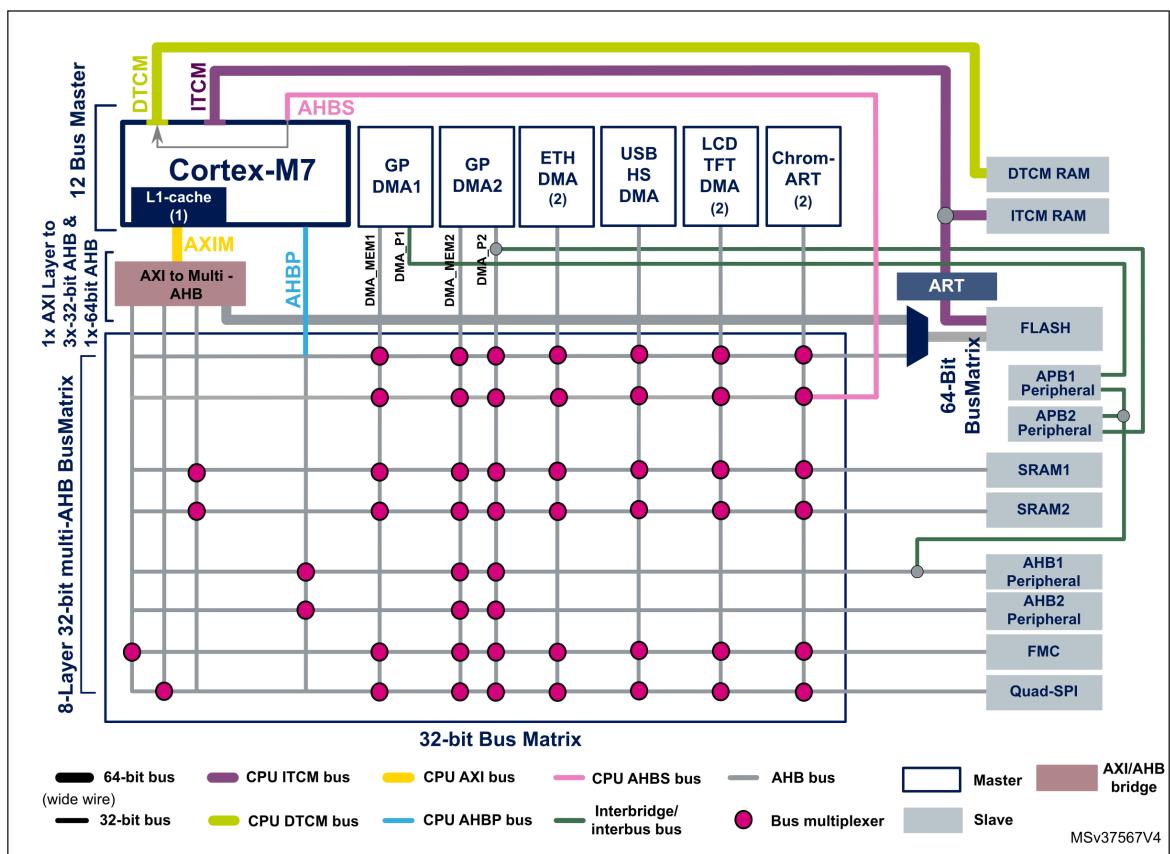


Abbildung 4: STM32F7 Systemarchitektur-Matrix [STMb, S. 9]

Aus der Matrix wird außerdem deutlich, dass für den Speicher zwischen SRAM und Tightly Coupled Memory (TCM)-RAM unterschieden wird. Der TCM verfügt jeweils für Instruktionen und Daten über einen dedizierten Kanal direkt zum Prozessor und ist *nicht* cachefähig, bietet aber als Besonderheit niedrigere und konsistenter Zugriffs-

zeiten als SRAM. Dies macht es besonders geeignet für zeitkritische Routinen, wie beispielsweise Interrupt-Handler. ([ARMf])

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird der TCM nicht genutzt und daher nicht weiter betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jeder normale Speicherbereich (kein Shared-Memory, Device-Memory oder Strongly-Ordered-Memory) gecacht werden kann [STMb, S. 7], sofern er über den AXI-Bus zugänglich ist.

| <b>Memory type</b> | <b>Memory region</b> | <b>Address start</b> | <b>Address end</b> | <b>Size</b>             | <b>Access interfaces</b>     |
|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|
| FLASH              | FLASH-ITCM           | 0x0020 0000          | 0x003F FFFF        | 2 Mbytes <sup>(1)</sup> | ITCM (64-bit)                |
|                    | FLASH-AXIM           | 0x0800 0000          | 0x081F FFFF        |                         | AHB (64-bit)<br>AHB (32-bit) |
| RAM                | DTCM-RAM             | 0x2000 0000          | 0x2001 FFFF        | 128 Kbytes              | DTCM (64-bit)                |
|                    | ITCM-RAM             | 0x0000 0000          | 0x0000 3FFF        | 16 Kbytes               | ITCM (64-bit)                |
|                    | SRAM1                | 0x2002 0000          | 0x2007 BFFF        | 368 Kbytes              | AHB (32-bit)                 |
|                    | SRAM2                | 0x2007 C000          | 0x2007 FFFF        | 16 KBytes               | AHB (32-bit)                 |

Abbildung 5: STM32F7 Speicheradressen [STMb, S. 14]

Aus der Abbildung 5 wird deutlich, dass der Flash ab der Adresse 0x08000000 über den AXI-Bus angesprochen wird. Diese Adresse ist auch im Linker-Skript (1) standardmäßig für den Flash festgelegt. Daher kann der Instruktionscache über den AXI-Bus für den Flash genutzt werden, sofern der Boot-Pin sowie die assoziierten Registerkonfigurationen (`BOOT_ADDx`) korrekt eingestellt sind [STMc, S. 28] und die Firmware an die Standardadresse geflasht und gestartet wird.

```

1 MEMORY
2 {
3   RAM (xrw)      : ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 512K
4   FLASH (rx)     : ORIGIN = 0x8000000, LENGTH = 2048K
5 }
```

Quellcode 1: Definition Speicherbereich im Linker-Script für STM32F7

Um Caches zu nutzen, bietet die Hardware Abstraction Library (HAL) von STM32 dedizierte Funktionen (2) als API an [STMa, S. 4]:

```

1 void SCB_EnableICache(void)
2 void SCB_DisableICache(void)
3 void SCB_EnableDCache(void)
4 void SCB_DisableDCache(void)
```

```
5 void SCB_InvalidateICache(void)
6 void SCB_InvalidateDCache(void)
7 void SCB_CleanDCache(void)
8 void SCB_CleanInvalidateDCache(void)
```

Quellcode 2: Cache-Funktionen

**Cache-Leerung** Bei einer Cache-Leerung (cache clean) werden die modifizierten Cache-Zeilen, die vom Prozessor während der Programmausführung aktualisiert wurden, zurück in den Hauptspeicher geschrieben. Dieser Vorgang wird gelegentlich auch als „flush“ bezeichnet.

**Cache-Invalidierung** Eine Cache-Invalidierung markiert hingegen den Cache als ungültig, sodass bei dem nachfolgenden Zugriff auf die assoziierten Daten diese zwingend erneut aus dem Hauptspeicher geladen werden und der Cache entsprechend aktualisiert wird.

### 2.2.1 Cache-Kohärenz

Bei der Nutzung von Caches kann für Speicherbereiche, die mit dem DMA-Controller geteilt werden, ein Cache-Kohärenzproblem (cache coherency) auftreten, da der Prozessor in diesem Fall nicht mehr der einzige Master ist, der auf diese Speicherbereiche zugreift.

Damit der DMA-Controller stets auf korrekte Daten zugreifen kann, ist eine manuelle Cache-Leerung *nach* jedem Schreibvorgang von Seiten der CPU erforderlich [STMa, S. 6]. Ohne diesen Schritt würden die Änderungen nicht umgehend im Speicher widergespiegelt werden und der DMA-Controller würde in der Zwischenzeit auf die veralteten und somit ungültigen Daten zugreifen.

Bei Daten, die aus einem Speicherbereich gelesen werden, der auch vom DMA-Controller modifiziert werden kann, ist *vor* jedem Lesevorgang eine Cache-Invalidierung notwendig [Emb]. Da der DMA-Controller asynchron und unabhängig von der CPU schreiben kann, sind die gecachten Daten immer potenziell veraltet und müssen stets manuell aktualisiert werden.

## 2.3 Data Watchpoint and Trace Unit

Für die Echtzeitfähigkeitsanalyse der Steuerungssoftware wird eine Methode benötigt, die Code- bzw. Ausführungsabschnitte flexibel messen kann. Da es sich dabei um eine Multithreaded-Anwendung handelt, muss gewährleistet sein, dass die Messungen trotz präemptives Scheduling, auftretender Interrupts sowie Software- und Hardwareoptimierungen threadsicher und präzise durchgeführt werden. Die endgültige Lösung muss garantieren, dass dabei keine Race Conditions entstehen und auch die Zeiterfassung selbst keinen nennenswerten Overhead verursacht.

Daher bietet sich die DWT als geeigneter Ansatz zur Protokollierung von Laufzeiten an. Die DWT ist eine in ARM-Prozessoren eingebaute Debugging-Einheit, die unter anderem ein funktionsreiches Profiling mittels verschiedener Zähler unterstützt [ARMa]. Ein für diese Arbeit zentraler Baustein ist der Zyklenzähler `DWT_CYCCNT`, der bei jedem CPU-Takt inkrementiert wird, solange sich der Prozessor nicht im Debug-Zustand befindet [ARMb]. Die DWT ermöglicht eine Laufzeit-Protokollierung mit zyklengenauer Präzision „unter normalen Betriebsbedingungen“ [ARMa].

Ein Beispiel hierfür ist Segger SystemView, ein Echtzeitanalyse-Tool, das die DWT nutzt, um Live-Code-Profiling auf eingebetteten Systemen durchzuführen [SEGb]. Das Tool nutzt den DWT-Zyklenzähler, indem die Funktion `SEGGER_SYSVIEW_GET_TIMESTAMP()` für Cortex-M3/4/7-Prozessoren einfach auf die hardkodierte Registeradresse des Zyklenzählers [Armd] zugreift [SEGa, S. 65], anstatt die interne Funktion `SEGGER_SYSVIEW_X_GetTimestamp()` aufzurufen.

## 3 Vorbereitung

Die Vorbereitungsphase umfasst größtenteils die Portierung der Steuerungssoftware von Micro-ROS auf FreeRTOS: Der Datenaustausch erfolgt intern über FreeRTOS-Queues, während die Inter-Task-Synchronisation auf den leichtgewichtigen Direct-Task-Notifications basiert. Zusätzlich wird die Methode zur Sollgeschwindigkeitseingabe per UART mit CRC-Überprüfung implementiert. Den Abschluss bildet die Aktivierung der Caches.

### 3.1 Umstellung auf FreeRTOS

#### 3.1.1 Übertragung von Sollgeschwindigkeiten

In der bisherigen Implementierung erhielt der Mikrocontroller als Client Geschwindigkeitssollwerte über das ROS2-Framework vom Micro-ROS-Agent auf einem Linux-Host. Da Micro-ROS und damit die Kompatibilität mit ROS2-Framework beseitigt wird, muss die Übertragung nun manuell realisiert werden.

Dazu wird zunächst eine Struktur `Vel2d` (3) definiert, der die 2D-Geschwindigkeitswerte bündelt, welche vom Host an den Mikrocontroller gesendet werden.

```

1 struct Vel2d {
2     double x;
3     double y;
4     double z;
5 };

```

Quellcode 3: Definition der Struktur für die Sollgeschwindigkeit

Darauf aufbauend wird eine weitere Struktur `Vel2dFrame` (4) definiert, die als UART-Daten-Frame dient. Sie enthält nur zusätzlich ein Feld `crc` für die CRC-Überprüfung und eine Methode `compare()`, die einen nachträglich zu berechnenden CRC-Wert als Parameter übernimmt und mit dem vorhandenen vergleicht. Durch das Attribut `packed` wird verhindert, dass zusätzliches Padding zur Speicherausrichtung eingefügt wird.

```

1 struct Vel2dFrame {
2     Vel2d vel;
3     uint32_t crc;
4
5     bool compare(uint32_t rhs) { return crc == rhs; }
6 } __attribute__((packed));

```

#### Quellcode 4: Definition des UART-Daten-Frames

Für die Übertragung über UART wird die Funktion `HAL_UARTEX_ReceiveToIdle_IT()` verwendet, um die serialisierten Bytes eines Daten-Frames mittels der STM32-HAL in einen statisch vorallokierten Puffer zu empfangen.

Die Funktionalität ist mit einem Interrupt-Callback `HAL_UARTEX_RxEventCallback()` (5) gekoppelt. Dieser Callback wird in zwei Fällen ausgelöst: Entweder wenn die HAL erkennt, dass die UART-Leitung nach einer Übertragung für eine bestimmte Zeit inaktiv ist (Idle-Zustand). Oder wird er auch ausgelöst, wenn der Puffer vollständig beschrieben wird [STMd]. Der zweite Parameter dieses Interrupt-Callbacks gibt immer die Größe der aktuell in den Puffer geschriebenen Daten an.

```

1 // preallocated buffer with the exact size of a data frame
2 static uint8_t uart_rx_buf[VEL2D_FRAME_LEN];
3 volatile static uint16_t rx_len;
4
5 void HAL_UARTEX_RxEventCallback(UART_HandleTypeDef* huart, uint16_t size) {
6     if (huart->Instance != huart3.Instance) return;
7
8     rx_len = size;
9
10    // unblock the task
11    static BaseType_t xHigherPriorityTaskWoken;
12    vTaskNotifyGiveFromISR(task_handle, &xHigherPriorityTaskWoken);
13    portYIELD_FROM_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
14
15    // reset reception from UART
16    HAL_UARTEX_ReceiveToIdle_IT(&huart3, uart_rx_buf, sizeof(uart_rx_buf));
17}
18
19 // setup reception from UART in task init
20 HAL_UARTEX_ReceiveToIdle_IT(&huart3, uart_rx_buf, sizeof(uart_rx_buf));

```

#### Quellcode 5: Datenempfang über UART via Interrupt

Mit diesem Setup kann der Mikrocontroller Bytes direkt von einem Linux-Host über UART empfangen. Die CRC-Prüfung kombiniert mit dem Idle/Timeout-Feature gewährleisten einen fehlertoleranten Datenempfang.

Um die empfangenen Bytes zu parsen, ohne dies aber während der Ausführung des Interrupt-Callbacks zu tun, wird eine eigenständige FreeRTOS-Task erstellt (6). Mittels des zuvor erwähnten Interrupt-Callbacks wird dieser Task signalisiert (2.1). Demnach werden die empfangenen Bytes durch `reinterpret_cast` zurück in ein Daten-Frame

deserialisiert.

Folglich lässt sich zur Kontrolle ein CRC-Wert lokal aus den empfangenen Geschwindigkeitswerten berechnen und mit dem Empfangenen vergleichen. Dabei kommt die dedizierte CRC-Hardware durch den Aufruf von `HAL_CRC_Calculate()` zum Einsatz, die beispielsweise auf einem STM32-F37x-Prozessor die Berechnung um das 60-fache beschleunigt und dabei nur **1,6 %** der Taktzyklen im Vergleich zur Softwarelösung benötigt [STMe, S. 9].

```

1  while (true) {
2      ulTaskNotifyTake(pdTRUE, portMAX_DELAY);
3
4      len = rx_len; // access atomic by default on ARM
5      if (len != VEL2D_FRAME_LEN) {
6          ULOG_ERROR("parsing velocity failed: insufficient bytes received");
7          continue;
8      }
9
10     auto frame = *reinterpret_cast<const Vel2dFrame*>(uart_rx_buf);
11     auto* vel_data = reinterpret_cast<uint8_t*>(&frame.vel);
12     if (!frame.compare(HAL_CRC_Calculate(
13         &hcrc, reinterpret_cast<uint32_t*>(vel_data), sizeof(frame.vel)))) {
14         ULOG_ERROR("crc mismatch!");
15         ++crc_err;
16         continue;
17     }
18
19     frame.vel.x *= 1000; // m to mm
20     frame.vel.y *= 1000; // m to mm
21
22     xQueueSend(freertos::vel_sp_queue, &frame.vel, NO_BLOCK);
23 }
```

Quellcode 6: FreeRTOS-Task zum Parsen von Geschwindigkeitswerten

Auf dem Host wird das ROS2-Paket `teleop_twist_keyboard` verwendet, um weiterhin Tastatureingaben als Geschwindigkeitswerte zu interpretieren. Um die Werte dann über UART zu übertragen, wird ein minimaler ROS2-Node als Brücke erstellt.

Dabei empfängt der Node (7) kontinuierlich Werte über einen Subscriber und überträgt sie zusammen mit dem im Konstruktor berechneten CRC-Wert an die UART-Schnittstelle, die als abstrahierter serieller Port unter Linux geöffnet ist.

```

1  class Vel2dBridge : public rclcpp::Node {
2  public:
3      Vel2dBridge() : Node{"vel2d_bridge"} {
```

```

4     twist_sub_ = create_subscription<Twist>(
5         "cmd_vel", 10, [this](Twist::UniquePtr twist) {
6             auto frame =
7                 Vel2dFrame{{twist->linear.x, twist->linear.y, twist->angular.z}};
8
9             uart.send(frame.data());
10        });
11    }
12
13 private:
14     rclcpp::Subscription<Twist>::SharedPtr twist_sub_;
15     SerialPort<VEL2D_FRAME_LEN> uart =
16         SerialPort<VEL2D_FRAME_LEN>(DEFAULT_PORT, B115200);
17 };

```

Quellcode 7: ROS2-Node Implementierung für Geschwindigkeitsübertragung

Die CRC-Berechnung hierbei erfolgt mithilfe einer quelloffenen C++-Bibliothek von Daniel Bahr [Bah22]. Der Algorithmus `CRC_32_MPEG2()` (8) entspricht demjenigen, der von der CRC-Hardware verwendet wird.

```

1 Vel2dFrame::Vel2dFrame(Vel2d vel)
2     : vel{std::move(vel)},
3      crc{CRC::Calculate(&vel, sizeof(vel), CRC::CRC_32_MPEG2())} {}

```

Quellcode 8: CRC-Berechnung im Konstruktor

### 3.1.2 Steuerungskomponenten als FreeRTOS-Tasks

Wie bei der Micro-ROS-Implementierung, wo die Steuerungskomponenten als Single-Threaded-Executor abstrahiert wurden, werden diese nun als eigenständige FreeRTOS-Tasks umgesetzt. Der Fokus liegt darauf, den zugrundeliegenden Datenaustausch ebenfalls über eine Publisher-Subscriber-Architektur mit Queues zu realisieren. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, gemeinsam genutzte Daten als globale Variablen mit Semaphoren oder Mutexen zu schützen, die in FreeRTOS ebenfalls nur als Queue-Objekte abstrahiert sind.

Zunächst wird eine FreeRTOS-Task (9) zur Abfrage und auch Übertragung von Encoderwerten implementiert. Diese stellt sicher, dass alle anderen Tasks bei jeder Iteration auf einheitliche Werte zugreifen können.

```

1 static void task_impl(void*) {
2     constexpr TickType_t NO_BLOCK = 0;

```

```

3   TickType_t xLastWakeTime = xTaskGetTickCount();
4   const TickType_t xFrequency = pdMS_TO_TICKS(WHEEL_CTRL_PERIOD_MS.count());
5
6   while (true) {
7       auto enc_delta = FourWheelData(hal_encoder_delta_rad());
8
9       xQueueSend(freertos::enc_delta_wheel_ctrl_queue, &enc_delta, NO_BLOCK);
10      xQueueOverwrite(freertos::enc_delta_odom_queue, &enc_delta);
11
12      vTaskDelayUntil(&xLastWakeTime, xFrequency);
13  }
14 }
```

Quellcode 9: FreeRTOS-Task zur Encoderwertabfrage und -übertragung

Die Empfänger-Task, welche mit `xQueueSend()` addressiert wird, läuft mit der selben Frequenz wie die Sender-Task. Die Übertragung erfolgt garantiert nicht-blockierend zusätzlich durch den übergebenen Null-Wert für die Wartezeit im Fall einer vollen Queue.

Im Gegensatz dazu ist `xQueueOverwrite()` eine Funktion, die ausschließlich für Queues mit einer maximalen Kapazität von einem Objekt vorgesehen ist: Sie überschreibt das vorhandene Objekt in der Queue – falls es existiert. Dadurch wird ebenfalls sichergestellt, dass die Übertragung nicht blockiert wird.

Darauf basierend lässt sich der gesamte Datenaustausch in Form einer Matrix (1) darstellen:

| Empfänger-Task<br>Sendertask | Odometrie | Posenregelung | Drehzahlregelung |
|------------------------------|-----------|---------------|------------------|
| <b>Odometrie</b>             |           | ↑             |                  |
| <b>Posenregelung</b>         |           |               | ↑                |
| <b>Encoder</b>               | ↑         |               | ↑                |
| <b>Sollgeschwindigkeit</b>   |           | ↑             |                  |

Tabelle 1: Kommunikationskanal-Matrix

Die Kanäle werden dementsprechend durch Queue-Objekte (10) repräsentiert:

```

1 extern QueueHandle_t enc_delta_odom_queue;
2 extern QueueHandle_t enc_delta_wheel_ctrl_queue;
3 extern QueueHandle_t vel_wheel_queue;
4 extern QueueHandle_t vel_sp_queue;
5 extern QueueHandle_t odom_queue;
```

### Quellcode 10: Deklaration der Queue-Objekte

Die grundlegende Implementierung der Steuerungskomponenten bleibt größtenteils gegenüber der Micro-ROS-Version erhalten. Die globale Initialisierungsfunktion (11) ist wie folgt definiert:

```

1 void init() {
2     hal_init();
3     queues_init();
4     task_hal_fetch_init();
5     task_vel_recv_init();
6     task_pose_ctrl_init();
7     task_wheel_ctrl_init();
8     task_odom_init();
9 }
```

### Quellcode 11: Initialisierung von FreeRTOS-Tasks

Ein üblicher Ansatz in FreeRTOS-Systemen – um unter anderem die Determinierbarkeit des Systems durch den Verzicht auf dynamische Speicherallokationen zu erhöhen [Fref] – besteht darin, FreeRTOS-Objekte statisch zu erzeugen.

Für eine (standardmäßig) dynamisch allokierte Task müssen die zugehörige Implementierungsfunktion als Funktionszeiger, der Name, die maximale Stackgröße sowie eine Priorität an die API (12) übergeben werden.

```

1 void task_impl(void* );
2
3 static TaskHandle_t task_handle;
4 constexpr size_t STACK_SIZE = configMINIMAL_STACK_SIZE * 4;
5
6 xTaskCreate(task_impl, "hal_fetch", STACK_SIZE, NULL, osPriorityNormal,
7             &task_handle);
```

### Quellcode 12: Dynamische Allokation eines FreeRTOS-Tasks

Wenn eine Task statisch initialisiert werden soll, muss der Nutzer zusätzlich sowohl einen ausreichenden Speicherpuffer für den Task-Stack, als auch für die Task-Struktur manuell definieren und an die API (13) übergeben.

```

1 void task_impl(void* );
2
3 static TaskHandle_t task_handle;
4 constexpr size_t STACK_SIZE = configMINIMAL_STACK_SIZE * 4;
5 static StackType_t taskStack[STACK_SIZE];
```

```

6 static StaticTask_t taskBuffer;
7
8 task_handle = xTaskCreateStatic(
9             task_impl, "hal_fetch", STACK_SIZE, NULL, osPriorityNormal,
10            taskStack, &taskBuffer);

```

Quellcode 13: Statische Allokation eines FreeRTOS-Tasks

Analog dazu muss für eine statische Initialisierung von Queue-Objekten ebenfalls zusätzlich ein Speicherpuffer sowie eine Queue-Struktur definiert werden (14).

```

1 constexpr size_t QUEUE_SIZE = 10;
2 static FourWheelData buf[QUEUE_SIZE];
3 static StaticQueue_t static_queue;
4
5 xQueueCreateStatic(QUEUE_SIZE, sizeof(*buf),
6                   reinterpret_cast<uint8_t*>(buf), &static_queue);

```

Quellcode 14: Statische Allokation einer FreeRTOS-Queue

Damit schließt der Abschnitt zur Portierung auf FreeRTOS ab. Der Code für die Steuerungssoftware sowie für den ROS2-Node ist im Repository [Xu25] im Branch `freertos-profiling` einsehbar.

## 3.2 Aktivierung von Instruktions- und Datencache

Zur Nutzung von dem Instruktionscache muss lediglich die Funktion `SCB_EnableICache()` aus der STM32-HAL aufgerufen werden.

Da der Instruktionscache ausschließlich schreibgeschützte Befehle zwischenspeichert, entfällt in diesem Fall die Notwendigkeit der Cache-Synchronisation für modifizierbare Daten.

Obwohl der Datencache ebenfalls durch den einfachen Funktionsaufruf `SCB_EnableDCache()` aktiviert werden kann, stellt dies jedoch noch nicht den abschließenden Schritt dar.

Die Transportfunktionen von Micro-ROS nutzen die Ethernet-Schnittstelle, die intern DMA einsetzt und durch die Integration des Lightweight IP (LwIP)-Stacks erweitert wird. Um sicherzustellen, dass die Daten korrekt verarbeitet werden, müssen sowohl der Heap für LwIP, als auch die Speicherbereiche für die Ethernet-RX- und TX-Deskriptoren mittels Memory Protection Unit (MPU) so konfiguriert werden (6), dass sie nicht gecacht werden [hot23].

|   |                      |  |
|---|----------------------|--|
| ▼ Cortex Memory Protection Unit Region 1 Settings |                      |  |
| MPU Region  | Enabled              |  |
| MPU Region Base Address                           | 0x30004000           |  |
| MPU Region Size                                   | 16KB                 |  |
| MPU SubRegion Disable                             | 0x0                  |  |
| MPU TEX field level                               | level 0              |  |
| MPU Access Permission                             | ALL ACCESS PERMITTED |  |
| MPU Instruction Access                            | DISABLE              |  |
| MPU Shareability Permission                       | DISABLE              |  |
| MPU Cacheable Permission                          | DISABLE              |  |
| MPU Bufferable Permission                         | DISABLE              |  |
| ▼ Cortex Memory Protection Unit Region 2 Settings |                      |  |
| MPU Region  | Enabled              |  |
| MPU Region Base Address                           | 0x2007c000           |  |
| MPU Region Size                                   | 512B                 |  |
| MPU SubRegion Disable                             | 0x0                  |  |
| MPU TEX field level                               | level 0              |  |
| MPU Access Permission                             | ALL ACCESS PERMITTED |  |
| MPU Instruction Access                            | DISABLE              |  |
| MPU Shareability Permission                       | ENABLE               |  |
| MPU Cacheable Permission                          | DISABLE              |  |
| MPU Bufferable Permission                         | ENABLE               |  |

Abbildung 6: MPU-Konfiguration aus STM32CubeMX

Hierbei sind die Anfangsadressen sowie die Größe der RX- und TX-Deskriptoren und des LwIP-Heaps aus den CubeMX-Standardkonfigurationen entnommen.

Obwohl die MPU korrekt konfiguriert wurde, tritt dennoch ein Fehler auf, sobald die Verbindung zum Micro-ROS-Client hergestellt wird. Der Fehler (7) deutet darauf hin, dass bei der Datenübertragung über UDP weiterhin Probleme auftreten. Insbesondere scheint der `client_key` bzw. die assoziierten Daten immer noch nicht ordentlich gecacht zu sein.

```

↳ ros2 run micro_ros_agent micro_ros_agent udp4 --port 8888 -v6
[1742552565.083969] info    | UDPv4AgentLinux.cpp | init           | running...          | port: 8888
[1742552565.084433] info    | Root.cpp        | set_verbose_level | logger setup       | verbose_level: 6
[1742552565.561902] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 80 00 00 00 02 01 08 00 00 00 FF FD 02 00 00 00
[1742552565.562472] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | send_message     | [** <<UDP>> **]
0000: 80 00 00 00 06 01 1C 00 00 0A FF FD 00 00 01 0D 58 52 43 45 01 00 01 0F 00 01 0D 00 01 00 00 00
0020: 00 00 00 00
[1742552565.562845] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 80 00 00 00 00 01 10 00 58 52 43 45 01 00 01 0F 60 C9 35 70 81 00 FC 01
[1742552565.563041] info    | Root.cpp        | create_client    | create             | client_key: 0x6DC93570, session_id: 0x81
[1742552565.563109] info    | SessionManager.hpp | establish_session | session established | client_key: 0x6DC93570, address: 192.168.1.249:19956
[1742552565.563207] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | send_message     | [** <<UDP>> **]
0000: 80 00 00 00 04 01 0B 00 00 00 58 52 43 45 01 00 01 0F 00 00 01 0D 58 52 43 45 01 00 01 0F 00 01 0D 00 01 00 00 00
[1742552565.563513] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 80 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0020: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
[1742552565.563611] info    | Root.cpp        | delete_client    | delete             | client_key: 0x6DC93570
[1742552565.563698] info    | SessionManager.hpp | destroy_session  | session closed    | client_key: 0x6DC93570, address: 192.168.1.249:19956
[1742552565.563714] warning | Root.cpp        | create_client    | invalid client key | client_key: 0x00000000
[1742552565.563794] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | send_message     | [** <<UDP>> **]
0000: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
[1742552565.663542] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 00 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552565.763587] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552565.863514] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552565.963539] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552566.063579] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552566.163547] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552566.263505] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552566.363522] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80
[1742552566.463506] debug   | UDPv4AgentLinux.cpp | recv_message     | [==>> UDP <==]
0000: 81 00 00 00 0B 01 05 00 00 00 00 00 80

```

Abbildung 7: Micro-ROS-Agent Debugausgaben

Bei der Recherche zu diesem Problem wurde ein Issue auf GitHub identifiziert [Mau24], welches genau dasselbe Verhalten beschreibt. Daraufhin wurde der Autor um eine Lösung (15) gebeten, die sich als effektiv erwies, um das Problem zu beheben.

```

1 @@ -54,6 +54,10 @@
2 /* USER CODE BEGIN 1 */
3 /* address has to be aligned to 32 bytes */
4 +#define ALIGN_ADDR(addr) ((uintptr_t)(addr) & ~0x1F)
5 +#define ALIGN_SIZE(addr, size) ((size) + ((uintptr_t)(addr) & 0x1f))
6 +#define FLUSH_CACHE_BY_ADDR(addr, size) \
7 +  SCB_CleanDCache_by_Addr((uint32_t *)ALIGN_ADDR(addr), ALIGN_SIZE(addr, size))
8 /* USER CODE END 1 */
9
10 /* Private variables -----*/
11 @@ -404,6 +408,8 @@
12     Txbuffer[i].buffer = q->payload;
13     Txbuffer[i].len = q->len;
14
15 +  FLUSH_CACHE_BY_ADDR(Txbuffer[i].buffer, Txbuffer[i].len);
16 +
17     if(i>0)
18     {
19         Txbuffer[i-1].next = &Txbuffer[i];

```

Quellcode 15: Modifizierung des ST-Treibercodes in Diffansicht [Mau25]

Die Lösung funktioniert folgendermaßen: Bei jeder Übertragung im Treibercode in `low_level_output()` muss der Cache für jeden Paketpuffer durch den Funktionsaufruf `SCB_CleanDCache_by_Addr()` geleert werden, sodass die Daten-Modifizierungen tatsächlich in den Speicher geschrieben und folglich auch beim DMA-Controller korrekt wiedergespiegelt werden (2.2.1). Dieser Ansatz ist ebenfalls sowohl in einem Beitrag aus dem Jahr 2018 im ST-Forum [Alm], als auch auf der offiziellen LwIP-Webseite [lwi] dokumentiert.

Dabei muss die übergebene Speicheradresse durch eine bitweise UND-Verknüpfung mit `~0x1F` auf eine 32-Byte-Grenze ausgerichtet werden [CMS23], indem die letzten 5 Bits gelöscht werden. Nach der Anpassung der Adresse muss die Größe dementsprechend wieder ergänzt werden, um die ausgegrenzten Bytes nach der Ausrichtung wieder zu berücksichtigen.

Hierbei ist zu beachten, dass ein Teil der Modifizierung direkt im generierten Treibercode vorgenommen wird, der bei nachfolgender Neugenerierung überschrieben wird: In der Funktion `low_level_output()` ist kein durch ST bereitgestellter Überschreibschutz für den User-Code vorhanden, und ein manuell hinzugefügter Überschreibschutz ist ebenfalls unwirksam. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine Patch-Datei erstellt, die nach jeder Neugenerierung auf die entsprechende Datei `LWIP/Target/ethernetif.c` angewendet werden muss.

## 4 Umsetzung

Nachdem die Steuerungssoftware sowohl für FreeRTOS als auch für Micro-ROS entwickelt wurde, wird nun eine Methode zur Erfassung von Laufzeitdaten entwickelt. Sie basiert auf FreeRTOS, um später die Portierung auf Micro-ROS nahtlos zu ermöglichen. Ziel dabei ist es, die Ausführungszeiten von Tasks und zeitkritischen Funktionen mittels DWT (2.3) präzise zu erfassen.

Der Ansatz besteht grundsätzlich darin, zu Beginn und am Ende jedes Messabschnitts die aktuelle Zyklenzahl zu speichern.

Aufgrund von Hardwareeinschränkungen und aus Gründen der Einfachheit wurde UART als Schnittstelle zur Datenübertragung zwischen Mikrocontroller und Host gewählt. Mit einer theoretischen Übertragungsrate von bis zu 12,5 Mbit/s bietet UART genügend Bandbreite [STMc, S. 2], um die erfassten Daten zur Laufzeit kontinuierlich zu übertragen.

Aus den inhärenten Eigenschaften der Multithreaded-Software ergibt sich zunächst die Notwendigkeit, eine threadsichere Multi Producer Single Consumer (MPSC)-Queue zu implementieren. Diese dient als eine Multi-Producer-Senke für die erfassten Laufzeitdaten und leitet sie zur Verarbeitung über UART weiter. Die vorhandenen Stream- oder Messagebuffer von FreeRTOS eignen sich nicht für mehrere Producer [Fre21], und können in dem Fall nicht verwendet werden.

### 4.1 Multi-Producer-Senke

Die grundlegende Idee sieht vor, dass Daten aus mehreren Tasks bzw. Threads direkt in die Senke – genauer gesagt in einen internen, statischen Ringpuffer – geschrieben werden. Die Speicherung in einem statischen Puffer ist wesentlich schneller als beispielsweise die Verwendung einer verketteten Liste, da diese unter anderem dynamische Heap-Allokationen erfordern würde und zudem auch nicht cache-optimal ist.

Da der vorab allokierte Speicher zwangsläufig begrenzt ist, muss die Senke im schlimmsten Fall erkennen können, wann sie weitere Schreibzugriffe blockieren muss. So wird verhindert, dass noch nicht verarbeitete Daten überschrieben werden.

Durch die Kombination von DMA mit Interrupts, die bei Abschluss jeder DMA-Übertragung ausgelöst werden, lässt sich dabei die I/O-gebundene Wartezeit eliminieren. In diesem Fall reduziert sich die Ausgabe von Laufzeitdaten auf das reine Schreiben in den Ringpuffer, während die eigentliche I/O-Operation durch den DMA-Controller

unabhängig vom Prozessor erfolgt. Vorausgesetzt die I/O überträgt die Daten schnell genug, um mit dem Eingangsdatenstrom Schritt zu halten, entstehen keine Blockaden, in denen Tasks oder Threads auf freien Speicherplatz warten müssen.

Daher wird der Ansatz mit DMA fortgeführt, da in diesem Fall die Datenausgabe idealerweise nur wenige Taktzyklen ohne Wartezeit benötigt und sich aus Sicht des Prozessors bzw. Threads nahezu als nicht-blockierende Operation verhält.

#### 4.1.1 Aufbau

Die Senke besteht im Wesentlichen aus einem statisch allokierten Ringpuffer gepaart mit einem Schreib- und Lesezeiger. Diese Zeiger bzw. Indizes ermöglichen es unter anderem, die Größe der geschriebenen Daten sowie den verbleibenden Speicherplatz zu ermitteln.

In der ersten Implementierungsversion wird die Menge der geschriebenen Daten als Differenz zwischen dem Schreib- und Leseindex berechnet, wenn der Schreibindex numerisch *nach* dem Leseindex liegt. Andernfalls umfassen die geschriebenen Daten die Reihe vom Leseindex bis zum Pufferende sowie vom Pufferanfang bis zum Schreibindex, da die beiden Indizes stets korrekt im Ringpuffer positioniert sind.

Hierbei muss zusätzlich der Sonderfall berücksichtigt werden, bei dem beide Indizes auf dieselbe Position zeigen: Entweder ist der Ringpuffer leer oder vollständig gefüllt. Das Problem lässt sich dadurch lösen, indem der Schreiber überprüft, ob das Byte an der aktuellen Position noch unverarbeitet ist, oder wurde es bereits gelesen und kann somit überschrieben werden. Bei dem Sonderfall impliziert dies: wenn das aktuelle Byte nicht mehr überschreibbar ist, dann ist die Senke voll beschrieben.

In einem C++-Konferenzvortrag über eine Multi Producer Multi Consumer (MPMC)-Queue [Str24] basiert deren Implementierung auf folgendem Prinzip: Jede Position des Datenpuffers besitzt eine eindeutige Schreibsequenznummer. Bei jedem Lesevorgang wird diese atomar um die Gesamtlänge  $N$  des Puffers erhöht. Dadurch wird signalisiert, dass die Daten in dieser Position in Iteration  $N$  verarbeitet wurden und in Iteration  $N + 1$  vom Schreiber überschrieben werden können. Die Entscheidung hierüber erfolgt durch Vergleich mit einer globalen Schreibsequenznummer, die ebenfalls nach jedem Schreibvorgang atomar inkrementiert wird.

Für den Fall einer Senke mit einem einzigen Consumer genügt es, den Zustand als `bool` zu speichern. Dieser gibt an, ob die Daten an einer bestimmten Position noch verarbeitet werden müssen oder bereits überschrieben werden können.

Um die Fallunterscheidungen mit den Schreib- und Leseindizes sowie den zusätzlichen Speicherbedarf zur Zustandsspeicherung in der finalen Implementierung zu eliminieren, können die Indizes auf eine stets korrekte Positionierung verzichten. Stattdessen können sie einfach über den Puffer hinaus zählen. Bei jeder Verwendung wird ihr Wert durch eine Modulo-Operation mit der Puffergröße normalisiert, wodurch sie dann auf die korrekte Position verweisen. Demnach reduziert sich die Berechnung der verfügbaren Datenmenge ebenfalls auf eine einfache Subtraktion zwischen beiden Indizes (16) – vorausgesetzt, dass beide Indizes vorzeichenlos sind.

Wenn die Puffergröße eine Zweierpotenz ist, kann die Modulo-Operation hier ebenfalls auf eine Ein-Zyklus-UND-Verknüpfung reduziert werden [Pfl11, ARM24].

```

1 #ifndef TSINK_CAPACITY
2 constexpr size_t TSINK_CAPACITY = 2048;
3 #endif
4 uint8_t sink[TSINK_CAPACITY]{};
5 volatile size_t read_idx = 0;
6 std::atomic<size_t> write_idx = 0;
7
8 size_t size() { return write_idx - read_idx; }
9 size_t space() { return TSINK_CAPACITY - size(); }
10 size_t normalize(size_t idx) { return idx % TSINK_CAPACITY; }
```

Quellcode 16: Struktur der Senke

#### 4.1.2 Schreibvorgang

Auf der ARM-Architektur sind Zugriffe auf Bytes, Halbdatenworte (16-Bit) sowie Datenworte (32-Bit) standardmäßig atomar, sofern sie im Speicher ausgerichtet sind [ARM21, S. A3-79] und verursachen somit keine Schreib-Lese-Konflikte.

Es muss aber sichergestellt werden, dass bei Multithreaded-Zugriffen nur ein Thread die nächste freie Position des Ringpuffers beschreibt.

Hier lässt sich eine Compare-And-Swap (CAS)-Operation (17) nutzen, um sicherzustellen, dass der Schreibindex bei konkurrierendem Zugriff durch den atomaren Vergleich mit einem übergebenen Wert nur von einem Thread inkrementiert wird. Nach erfolgreicher Inkrementierung darf dann der Thread Daten an der beanspruchten Indexposition beschreiben.

```

1 bool write_or_fail(uint8_t elem) {
2     auto expected = write_idx.load();
3     if (expected - read_idx == TSINK_CAPACITY) return false;
```

```

4     if (write_idx.compare_exchange_strong(expected, expected + 1)) {
5         sink[normalize(expected)] = elem;
6         return true;
7     }
8     return false;
9 }
```

Quellcode 17: atomare Schreiboperation in der Senke

Zunächst wird der aktuelle Schreibindex als lokale Variable `expected` zwischengespeichert. Dann wird geprüft, ob der Puffer mit diesem Schreibindex bereits voll ist – in diesem Fall erfolgt eine vorzeitige Rückkehr. Andernfalls ist diese Position frei und beschreibbar. Diese Garantie gilt ab diesem Zeitpunkt und bleibt auch in Zukunft bestehen, da die Senke danach nur noch weiteren Speicherplatz freigeben kann.

Anschließend wird die CAS-Operation durchgeführt, bei der der Schreibindex mit dem zwischengespeicherten Wert verglichen und nur bei Übereinstimmung inkrementiert wird.

Der zwischengespeicherte Wert erfüllt somit eine Doppelfunktion: Er dient sowohl zur Speicherplatzprüfung, als auch als Synchronisationstoken für die Indexinkrementierung. Falls der Schreibindex bereits inkrementiert wurde, scheitert der atomare Vergleich, sodass die CAS-Operation `false` zurückgibt und der Schreibvorgang abgebrochen wird.

Durch die Ausführung dieser kombinierten atomaren Operation (Vergleich und Inkrementierung) mit Statusrückmeldung wird sichergestellt, dass letztlich nur ein Thread den Schreibindex erfolgreich inkrementieren und folglich Daten schreiben kann. Diese CAS-basierte Synchronisation mit anderen Threads erfolgt daher nicht-blockierend im Vergleich zur einfachen Deaktivierung von Interrupts.

Um das Schreiben mehrerer Bytes ebenfalls threadsicher zu gestalten, muss der gesamte Schreibvorgang (18) durch geeignete Synchronisationsmechanismen geschützt werden [Bar19]. Hier wird ein Mutex verwendet, da dieser im Gegensatz zu einem Semaphore sicherstellt, dass der Thread den Mutex und damit die Kontrolle umgehend freigibt und nicht aufgrund niedrigerer Priorität blockiert wird (2.1).

```

1 struct mtx_guard {
2     mtx_guard() { configASSERT(xSemaphoreTake(write_mtx, portMAX_DELAY)); }
3     ~mtx_guard() { configASSERT(xSemaphoreGive(write_mtx)); }
4 };
5
6 void write_blocking(const uint8_t* ptr, size_t len) {
7     while (true) {
```

```

8     if (volatile auto _ = mtx_guard{}; space() >= len) {
9         for (size_t i = 0; i < len; ++i) configASSERT(write_or_fail(ptr[i]));
10        return;
11    }
12    vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1));
13 }
14 }
```

Quellcode 18: Blockierende Schreiboperation in die Senke

Der Mutex-Wrapper `struct mtx_guard` nutzt Resource Acquisition Is Initialization (RAII), um beim Erstellen eines Objekts automatisch den Mutex zu sperren und ihn beim Verlassen des Gültigkeitsbereichs – in diesem Fall beim Verlassen des `if`-Blocks – wieder freizugeben. Falls nicht genügend Platz in der Senke vorhanden ist, wird kooperativ der Kontrollfluss für eine Millisekunde an den Scheduler zurückgegeben, um andauerndes Polling zu vermeiden.

#### 4.1.3 Lesevorgang

Eine statisch allokierte FreeRTOS-Task (19) wird erzeugt, die kontinuierlich versucht, verfügbare Daten aus der Senke zu verarbeiten.

```

1 using consume_fn = void (*)(const uint8_t*, size_t);
2 consume_fn consume;
3
4 void task_impl(void*) {
5     auto consume_and_wait = [] (size_t pos, size_t size) static {
6         if (!size) return;
7         consume(sink + pos, size);
8         ulTaskNotifyTake(pdFALSE, portMAX_DELAY);
9     };
10
11     while (true) {
12         if (size_t sz = size(); sz) {
13             auto idx = normalize(read_idx);
14             auto wrap_around = ((idx + sz) / TSINK_CAPACITY) * // multiplier as bool
15                             ((idx + sz) % TSINK_CAPACITY); // actual amount
16             auto immediate = sz - wrap_around;
17             consume_and_wait(idx, immediate);
18             consume_and_wait(0, wrap_around);
19             read_idx += sz;
20         } else {
21             vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1));
22         }
23     }
}
```

24

}

### Quellcode 19: Implementierung der Task zur Datenverarbeitung

Zunächst wird der mögliche Anteil der verfügbaren Daten, der sich vom Pufferanfang bis zum Schreibindex erstreckt, mathematisch berechnet. Dieser Anteil existiert und wird nur gültig sein, wenn nach der Normalisierung der beiden Indizes der Schreibindex *hinter* dem Leseindex liegt: In diesem Fall wurde der Ringpuffer bereits bis zum Ende beschrieben und beginnt wieder am Anfang. Dann wird die (Teil-)Menge vom aktuellen Leseindex bis zum Schreibindex oder Pufferende – abhängig von dem zuvor berechneten Anteil – bestimmt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da die API zur UART-Übertragung nur einen Zeiger zu einem Datenpuffer und eine Größe als Parameter erwartet und der Ringpuffer aufgrund seiner Funktionsweise dies berücksichtigen muss.

Bei jedem Aufruf von `consume_and_wait()` wird durch die blockierende API zur Task-Notification (`vTaskNotifyTake()` 2.1) auf den Abschluss der aktuell laufenden I/O-Übertragung gewartet, bevor eine neue gestartet werden kann. Diese Vorgehensweise ist ebenfalls notwendig bei Übertragungen mittels DMA: Die zugehörige Übertragungsfunktion aus der STM32-HAL signalisiert dabei lediglich der Hardware den gewünschten Transfervorgang und kehrt sofort zurück [HAL], sodass der Programmfluss unmittelbar fortgesetzt wird. Zudem ist das globale, intern genutzte UART-Zustandsobjekt auch nicht wiedereintrittsfähig<sup>1</sup> [ST 23], weshalb die zugehörigen APIs nicht aus mehreren Threads gleichzeitig aufgerufen werden dürfen. Daher müssen nachfolgende Aufrufe hierbei miteinander synchronisiert werden.

Analog zu 5 wird die Task erst wieder entblockt, wenn eine Task-Notification durch den Aufruf der Callback-Funktion 20 eintrifft.

```

1 enum struct CALL_FROM { ISR, NON_ISR };

2

3 template <CALL_FROM callsite>
4 void consume_complete() {
5     if constexpr (callsite == CALL_FROM::ISR) {
6         static BaseType_t xHigherPriorityTaskWoken;
7         vTaskNotifyGiveFromISR(task_hdl, &xHigherPriorityTaskWoken);
8         portYIELD_FROM_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
9     } else {
10         xTaskNotifyGive(task_hdl);
11     }
12 }
```

<sup>1</sup> „Als wiedereintrittsfähig – zu englisch reentrant – wird ein Programm-Attribut beschrieben, welches die mehrfache (quasi-gleichzeitige) Nutzung eines Programm-Codes erlaubt, sodass sich gleichzeitig (oder quasi-gleichzeitig) ausgeführte Instanzen nicht gegenseitig beeinflussen.“ [Wik]

### Quellcode 20: Callback-Funktion für die Task-Notification

Für die Nutzung dieser Senke mit UART-DMA und aktiviertem Datencache muss somit zunächst eine ISR 21 definiert werden, das nach jeder DMA-Übertragung ausgelöst wird und die Callback-Funktion (20) aufruft.

```

1 void HAL_UART_TxCpltCallback(UART_HandleTypeDef* huart) {
2     if (huart->Instance == huart3.Instance)
3         tsink::consume_complete<tsink::CALL_FROM::ISR>();
4 }
```

### Quellcode 21: Interrupt-Callback bei Abschluss einer UART-Übertragung

Die Senke wird durch den Aufruf ihrer Initialisierungsfunktion (22) bereitgestellt. Diese erwartet einen Funktionszeiger, dessen Implementierung eine cache-kohärente Datenverarbeitung (15) durchführt, sowie eine Priorität für die interne Task (19) als Funktionsargumente.

```

1 void main() {
2     auto tsink_consume_dma = [] (const uint8_t* buf, size_t size) static {
3         auto flush_cache_aligned = [] (uintptr_t addr, size_t size) static {
4             constexpr auto align_addr = [] (uintptr_t addr) { return addr & ~0x1F; };
5             constexpr auto align_size = [] (uintptr_t addr, size_t size) {
6                 return size + ((addr) & 0x1F);
7             };
8
9             SCB_CleanDCache_by_Addr(reinterpret_cast<uint32_t*>(align_addr(addr)),
10                                     align_size(addr, size));
11         };
12
13         flush_cache_aligned(reinterpret_cast<uintptr_t>(buf), size);
14         HAL_UART_Transmit_DMA(&huart3, buf, size);
15     };
16     tsink::init(tsink_consume_dma, osPriorityAboveNormal);
17 }
```

### Quellcode 22: Initialisierung der Senke mit DMA

## 4.2 Aufzeichnung von Zyklenstempeln

Wie im vorherigen Abschnitt 2.3 erläutert, eignet sich die DWT zur Generierung von Laufzeitdaten in Form von Zyklenzahlen. Mit den folgenden Konfigurationsschritten (23) kann sie aktiviert werden:

```

1 void enable_dwt() {
2     CoreDebug->DEMCR |= CoreDebug_DEMCR_TRCENA_Msk;
3     DWT->LAR = 0xC5ACCE55; // software unlock
4     DWT->CYCCNT = 1;
5     DWT->CTRL |= DWT_CTRL_CYCCNTENA_Msk;
6 }
```

Quellcode 23: Aktivierung der DWT [Plo16]

Danach kann die aktuelle Zyklenzahl direkt über `DWT->CYCCNT` ausgelesen werden.

Drei wesentliche Informationen werden bei der Aufzeichnung von Zyklenstempeln erfasst: der Identifikator der zugehörigen Task oder Funktion, die aktuelle Zyklenzahl sowie ein Marker, der Beginn oder Ende einer Dauer kennzeichnet. Diese Daten werden in einer Struktur (24) gespeichert.

```

1 struct cycle_stamp {
2     const char* name;
3     size_t cycle;
4     bool is_begin;
5
6     static inline uint32_t initial_cycle = 0;
7 };
```

Quellcode 24: Definition des Zyklenstempels

Die statische Variable speichert zur Laufzeit die Zyklenzahl zu Beginn eines Samplings und dient als Referenzpunkt zur Normalisierung der Messwerte.

FreeRTOS bietet Makros (2.1), die beim Kontextwechsel – oder genauer gesagt zu Beginn und auch beim Abschluss jedes FreeRTOS-Zeitabschnitts (time slice) der aktuellen Task – als Callbacks aufgerufen werden. Das Makro `traceTASK_SWITCHED_IN()` wird aufgerufen, unmittelbar nachdem eine Task zum Ausführen bzw. Fortfahren ausgewählt wurde. `traceTASK_SWITCHED_OUT()` wird aufgerufen, unmittelbar bevor der Programmfluss zu einer neuen Task gewechselt wird. An diesen Zeitpunkten innerhalb vom Scheduling-Code enthält `pxCurrentTCB` – die interne Task-Control-Block-Struktur von FreeRTOS – die Metadaten der aktuellen Task, wodurch der Nutzer die Möglichkeit hat, direkt darauf als Funktionsargument zuzugreifen. ([Fred])

Diese Makros (25) werden somit jeweils als einen Aufruf der Funktion 26 mit dem Namen der aktuellen Task (`pcTaskName`) und einer booleschen Variable als Start/End-Marker definiert. Diese Funktion kann später in einer separaten Übersetzungseinheit implementiert werden.

```

1 void task_switched_isr(const char* name, uint8_t is_begin);
2 #define traceTASK_SWITCHED_IN() \
3     task_switched_isr(pxCurrentTCB->pCTaskName, 1)
4 #define traceTASK_SWITCHED_OUT() \
5     task_switched_isr(pxCurrentTCB->pCTaskName, 0)

```

Quellcode 25: Konkrete Definition der Trace-Hook-Makros

```

1 void task_switched_isr(const char* name, uint8_t is_begin) {
2     if (!stamping_enabled) return;
3     stamp(name, is_begin);
4     ctx_switch_cnt += 1;
5 }

```

Quellcode 26: Funktion zur Zyklenstempelgenerierung beim Kontextwechsel

Die Funktion überprüft zunächst, ob eine Aufzeichnung beim Kontextwechsel durchgeführt werden soll, und ruft anschließend `stamp()` auf – wenn dies der Fall ist. Nebenbei wird ein Zähler inkrementiert, der die kumulierte Anzahl von Kontextwechseln repräsentiert.

Da das threadsichere Schreiben eines Zyklenstempels, welcher der aus mehreren Bytes besteht, mittels Mutex schließlich eine blockierende Operation darstellt, kann es nicht direkt in einer ISR erfolgen. Stattdessen müssen die erfassten Daten zuerst in einen temporären Puffer geschrieben werden (27).

```

1 inline constexpr size_t STAMP_BUF_SIZE = 512;
2 inline cycle_stamp stamps[STAMP_BUF_SIZE]{};
3 volatile inline std::atomic<size_t> stamp_idx = 0;
4 volatile inline bool stamping_enabled = false;
5
6 inline void stamp(const char* name, bool is_begin) {
7     volatile auto cycle = DWT->CYCCNT;
8     volatile auto idx = stamp_idx.fetch_add(1);
9     stamps[idx % STAMP_BUF_SIZE] = {name, cycle, is_begin};
10 }

```

Quellcode 27: Temporärpuffer mit dessen atomaren Schreibzeiger und Aktivierungsflag

Der Schreibindex wird dabei als Variable vom Typ `std::atomic<size_t>` definiert, um eine atomare Inkrementierung mit gleichzeitiger Rückgabe des vorherigen Wertes zu ermöglichen.

Die erfassten ISR-Zyklenstempel müssen dann zusätzlich von einer FreeRTOS-Task (28) in ein menschenlesbares Format umgewandelt und in die Senke geschrieben werden.

```

1 static size_t prev_idx = 0;
2 auto output_stamps = []() static {
3     auto end = stamp_idx;
4     while (prev_idx != end) {
5         const auto& [name, cycle, is_begin] = stamps[normalized_index(prev_idx++)];
6         write_blocking(
7             buf,
8             snprintf(buf, sizeof(buf), "%s %u %u\n", name,
9                     cycle_to_us(cycle - cycle_stamp::initial_cycle), is_begin));
10    }
11 };

```

Quellcode 28: Callback zur Ausgabe von ISR-Zyklenstempeln

Für Nicht-ISR-Kontexte ist die Funktion (29) zur direkten Ausgabe eines Zyklenstempels wie folgt definiert:

```

1 inline void stamp_direct(const char* name, bool is_begin) {
2     char buf[50];
3     volatile auto cycle = DWT->CYCCNT;
4     tsink::write_blocking(
5         buf, snprintf(buf, sizeof(buf), "%s %u %u\n", name,
6                     cycle_to_us(cycle - cycle_stamp::initial_cycle), is_begin));
7 }

```

Quellcode 29: Funktion zur Ausgabe von Zyklenstempeln

Das RAII-Konzept (30) kommt ebenfalls hier zur Anwendung: Beim Erstellen eines Objekts dieses Typs wird automatisch die Funktion 29 aufgerufen, beim Zerstören erneut.

```

1 struct cycle_stamp_raii {
2     cycle_stamp_raii(const char* name) : name{name} {
3         if (stamping_enabled) stamp_direct(name, true);
4     }
5     ~cycle_stamp_raii() {
6         if (stamping_enabled) stamp_direct(name, false);
7     }
8     const char* name;
9 };
10

```

Quellcode 30: Funktion zur Ausgabe von Zyklenstempeln

Anhand des Beispiels 31 kann das RAII-Konzept strukturell veranschaulicht werden.

```

1 void func()
2 { // --> t1 stamp in
3     cycle_stamp_raii t1{"func"};
4
5     { // --> t2 stamp in
6         cycle_stamp_raii t2{"code block"};
7     } // --> t2 stamp out
8
9 } // --> t1 stamp out

```

Quellcode 31: Beispielnutzung einer RAII-Struktur

**Zeitliche Garantie der Erstellung** Unmittelbar nach der Erstellung eines solchen RAII-Objekts sollte ein sogenanntes Memory-Barrier (32) erfolgen. Damit wird sichergestellt, dass das Objekt tatsächlich zum definierten Zeitpunkt erstellt wird und nicht durch Hardwareoptimierungen umgeordnet wird [ARMe], was aufgrund des schwachen Speichermodells (weak memory ordering) der ARM-Architektur möglich wäre [KL22, S. 5].

```

1 volatile freertos::cycle_stamp_raii _{"p_ctrl"};
2 std::atomic_thread_fence(std::memory_order_seq_cst);

```

Quellcode 32: RAII-basierter Zyklustempel mit Memory-Barrier

Softwareseitig lässt sich das Schlüsselwort `volatile` nutzen, um die beabsichtigte Ausführungsreihenfolge auch bei aktivierten Compileroptimierungen wie `-Os` zu erzwingen.

**Zeitliche Garantie von Destruktor-Aufruf** Der Aufruf von Destruktoren mit „Side Effects“<sup>2</sup> wird nicht durch Optimierung eliminiert und erfolgt garantiert am Ende des Ausführungsblocks, selbst wenn das Objekt nicht genutzt zu sein scheint [iso20, §6.7.5.4 Abs. 3], und zwar immer in der umgekehrten Reihenfolge, wie die Objekte erzeugt worden sind [Fou25].

Durch die oben beschriebenen Maßnahmen lässt sich somit sicherstellen, dass die Erzeugung von Zyklustempeln in Nicht-ISR-Kontexten ebenfalls zur Echtzeit erfolgt.

---

<sup>2</sup>Zu „Side Effects“ zählen unter anderem Schreibzugriffe von Objekten sowie Schreib- und Lesezugriffe auf ein `volatile`-Objekt. [cpp]

### 4.3 Streaming-Mode via Button

Laut Benutzerhandbuch des Boards ist der User-Button standardmäßig mit dem I/O-Pin PC13 verbunden, was der EXTERNAL Interrupt/Event (EXTI)-Linie 13 entspricht. Praktischerweise muss in STM32CubeMX nur die Option für EXTI-Line-Interrupts der Linien 10 bis 15 unter *System Core/NVIC* aktiviert werden, sodass der Button bei jedem Druck einen Interrupt auslöst.

Im entsprechenden Interrupt-Callback (33) wird ein Toggle-Mechanismus implementiert: Bei jedem Auslösen wird die boolesche Variable `stamping_enabled` invertiert. Gleichzeitig wird die Profiling-Task benachrichtigt, um die ISR-Zyklenstempel in die Senke zu schreiben.

```

1 void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin) {
2     static constexpr uint8_t DEBOUNCE_TIME_MS = 100;
3     static volatile uint32_t last_interrupt_time = 0;
4
5     if (GPIO_Pin != USER_Btn_Pin) return;
6
7     uint32_t current_time = HAL_GetTick();
8     if (current_time - std::exchange(last_interrupt_time, current_time) >
9         DEBOUNCE_TIME_MS) {
10        stamping_enabled ^= 1;
11        if (stamping_enabled) {
12            stamp_idx = 0;
13            cycle_stamp::initial_cycle = DWT->CYCCNT;
14
15            static BaseType_t xHigherPriorityTaskWoken;
16            vTaskNotifyGiveFromISR(profiling_task_hdl, &xHigherPriorityTaskWoken);
17            portYIELD_FROM_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
18        }
19    }
20 }
```

Quellcode 33: Interrupt-Callback für den User-Button

Um ungewollte Mehrfachauslösungen durch unpräzises Drücken zu vermeiden, ist eine kurze Debounce-Zeit notwendig.

### 4.4 Exkurs: Laufzeitdaten – Überblick

Die Laufzeit- bzw. Profiling-Daten werden im menschenlesbaren Format ausgegeben. Sie bestehen aus:

```
<Identifikator> <konvertierte Zeit> <Start-/End-Marker>
```

Die Zyklenzahlen werden dabei in Mikrosekunden umgewandelt, indem man sie durch die Taktfrequenz teilt und auf die gewünschte Genauigkeit mit 1.000.000 multipliziert.

Die Profiling-Daten (34) folgen nicht einer aufsteigenden Reihenfolge nach den konvertierten Zeitpunkten, da die ISR-Zyklenstempel erst zwischengespeichert und später durch eine FreeRTOS-Task in einer frei wählbaren Frequenz ausgegeben werden müssen. Da jedoch jeder Zyklenstempel in einer ISR zur Echtzeit ohne Verzögerung erzeugt wird, spiegelt die zugehörige Zyklenzahl und somit auch der konvertierte Zeitpunkt den tatsächlichen Echtzeitaspekt des Systems korrekt wider. Daher ist eine strikt geordnete Ausgabe nicht zwingend erforderlich.

```

1 IDLE 1 0      << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
2 profile 2 1    << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
3 w_ctrl 7413 1 << in Echtzeit ausgegeben
4 w_ctrl 7504 0 << in Echtzeit ausgegeben
5 odom 7951 1   << in Echtzeit ausgegeben
6 odom 7969 0   << in Echtzeit ausgegeben
7 profile 28 0   << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
8 IDLE 29 1     << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
9 IDLE 332 0    << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
10 tsink 333 1   << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
11 tsink 336 0   << mittels FreeRTOS-Task periodisch ausgegeben
12 ...

```

Quellcode 34: Ausschnitt der Profiling-Daten

Es wird versucht, die Ausgabe miteinander zu synchronisieren: Jeder Thread ruft die Schreibfunktion der Senke mit einem globalen atomaren Zähler auf. Dieser wird dann mit dem internen Zähler verglichen. Stimmen die Werte überein, wird die Schreiboperation ausgeführt, andernfalls blockiert. Dieser Ansatz erweist sich als nicht erfolgreich, da sich die resultierende Systemleistung durch das nicht-deterministische Scheduling ohne Threadbevorzugung ungefähr um die Hälfte senkt.

Anschließend wird versucht, alle Zyklenstempel vorab in dem Zwischenpuffer zu speichern. Damit wird das Erzeugen und Ausgeben von Zyklenstempeln komplett voneinander getrennt. Mit diesem Ansatz kann die Reihenfolge (35) konsistent gehalten werden. Allerdings führt diese Lösung dazu, dass der Multithreaded-Aspekt der Queue bzw. Senke nicht mehr benötigt wird, da alle Daten nun von einem einzigen Producer stammen. Die Senke wird aber weiterhin zur Ausgabe verwendet und funktioniert auch in diesem Kontext technisch korrekt.

```
1 IDLE 1 0
```

```
2 profile 2 1
3 profile 28 0
4 IDLE 29 1
5 IDLE 556 0
6 tsink 557 1
7 tsink 560 0
8 uros 561 1
9 uros 623 0
10 IDLE 625 1
11 IDLE 667 0
12 ...
13 odom 6613 1
14 odom 6694 0
```

Quellcode 35: Profiling-Daten in aufsteigender Reihenfolge

Zusammenfassend zeigt sich, dass sich mit der DWT, FreeRTOS-Trace-Hooks sowie RAII-basierter Zyklenstempelerfassung in Kombination mit dem vorhandenen User-Button eine leichtgewichtige Profiling-Methode für FreeRTOS-Tasks und Codeabschnitte implementieren lässt.

## 5 Evaluation

In diesem Kapitel werden die erhobenen Profiling-Daten visualisiert und ausgewertet. Abschließend erfolgt ein direkter Vergleich hinsichtlich der maximalen Regelungsfrequenz und der Ausführungszeit von Regelungsfunktionen.

Die Profiling-Daten werden mit einem Python-Skript verarbeitet und als Gantt-Diagramm dargestellt (8, 9).

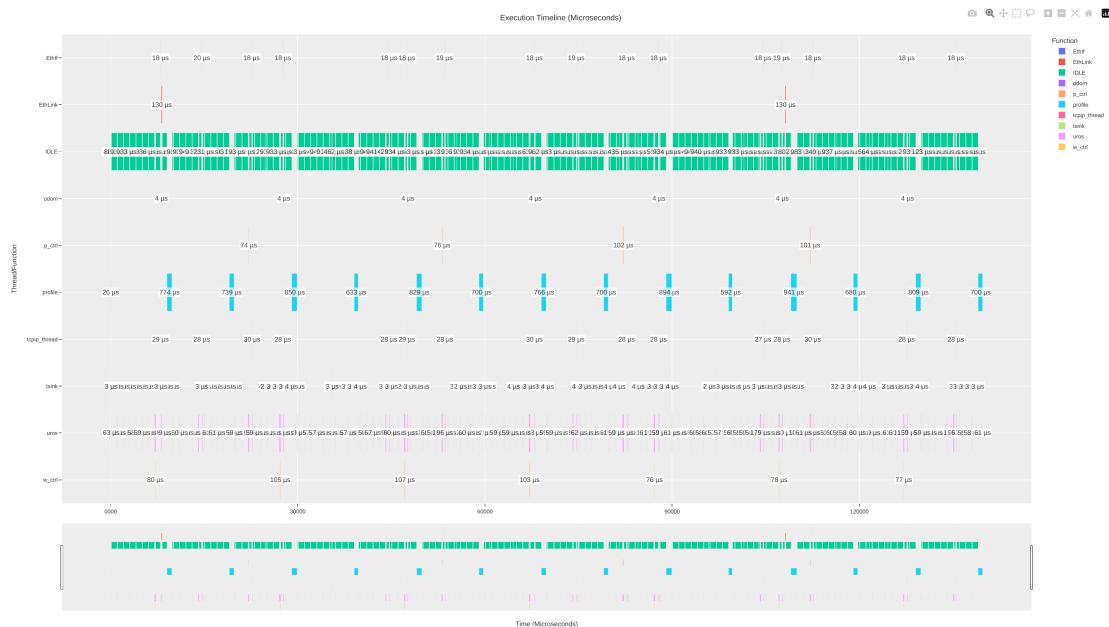


Abbildung 8: Laufzeit-Statistik unter Micro-ROS – Überblick

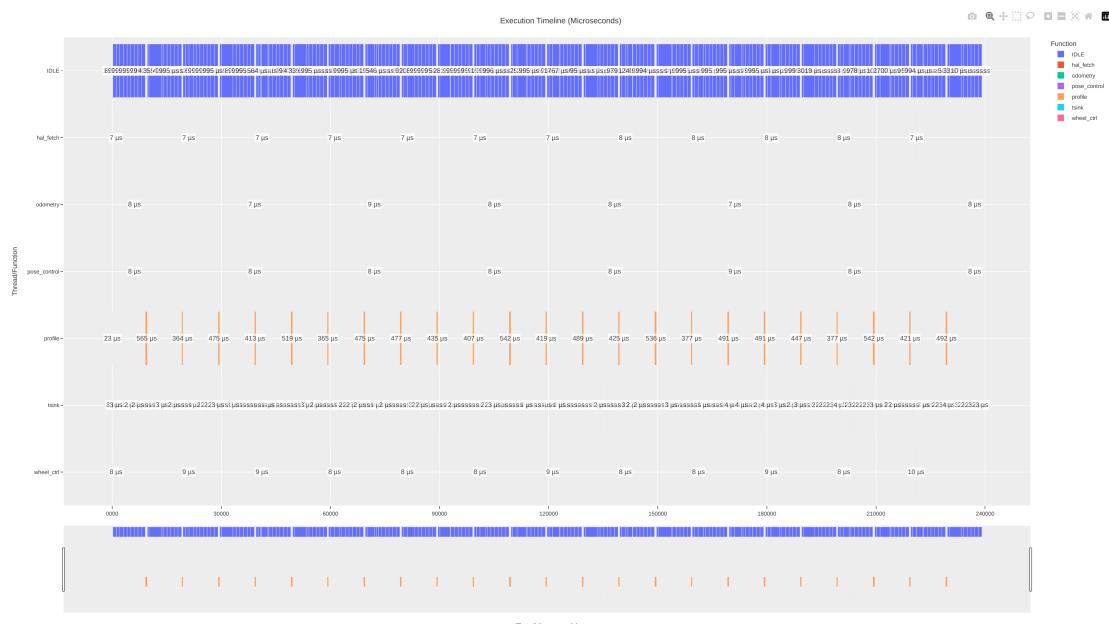


Abbildung 9: Laufzeit-Statistik unter FreeRTOS – Überblick

Die FreeRTOS-Funktionen `vTaskGetRunTimeStats()` und `vTaskList()` werden genutzt, um am Ende eines Samplings eine grob zusammenfassende Auswertung bereitzustellen (36, 37). Diese dokumentieren die kumulierten Ausführungszeiten sowie Zustände aller Tasks vom Systemstart bis zum Funktionsaufruf [Fre25].

| free heap: 4688          |         |      |       |     |
|--------------------------|---------|------|-------|-----|
| ctx switches: 126810     |         |      |       |     |
| Task                     | Time    | %    |       |     |
| profile                  | 33450   | 2%   |       |     |
| uros                     | 106984  | 8%   |       |     |
| IDLE                     | 1179311 | 88%  |       |     |
| EthLink                  | 1695    | <1%  |       |     |
| tcpip_thread             | 4526    | <1%  |       |     |
| tsink                    | 3762    | <1%  |       |     |
| Tmr Svc                  | 0       | <1%  |       |     |
| EthIf                    | 2730    | <1%  |       |     |
| -----                    |         |      |       |     |
| Task                     | State   | Prio | Stack | Num |
| uros                     | R       | 24   | 2548  | 3   |
| profile                  | X       | 24   | 892   | 2   |
| IDLE                     | R       | 0    | 108   | 4   |
| tcpip_thread             | B       | 24   | 180   | 6   |
| tsink                    | B       | 32   | 475   | 1   |
| EthLink                  | B       | 16   | 193   | 8   |
| EthIf                    | B       | 48   | 17    | 7   |
| Tmr Svc                  | B       | 2    | 223   | 5   |
| -----                    |         |      |       |     |
| profiled for 18881864 us |         |      |       |     |
| -----                    |         |      |       |     |
| free heap: 195696        |         |      |       |     |
| ctx switches: 76148      |         |      |       |     |
| Task                     | Time    | %%   |       |     |
| profile                  | 9669    | 4%   |       |     |
| IDLE                     | 201086  | 95%  |       |     |
| hal_fetch                | 81      | <1%  |       |     |
| wheel_ctrl               | 87      | <1%  |       |     |
| odometry                 | 49      | <1%  |       |     |
| pose_control             | 51      | <1%  |       |     |
| tsink                    | 615     | <1%  |       |     |
| Tmr Svc                  | 0       | <1%  |       |     |
| recv_vel                 | 0       | <1%  |       |     |
| -----                    |         |      |       |     |
| Task                     | State   | Prio | Stack | Num |
| profile                  | X       | 24   | 900   | 7   |
| IDLE                     | R       | 0    | 108   | 8   |
| wheel_ctrl               | B       | 24   | 420   | 5   |
| odometry                 | B       | 24   | 416   | 6   |
| pose_control             | B       | 24   | 410   | 4   |
| tsink                    | B       | 32   | 483   | 1   |
| hal_fetch                | B       | 24   | 443   | 2   |
| recv_vel                 | S       | 24   | 441   | 3   |
| Tmr Svc                  | B       | 2    | 223   | 9   |
| -----                    |         |      |       |     |
| profiled for 18779120 us |         |      |       |     |
| -----                    |         |      |       |     |

Quellcode 36: Auswertung Micro-ROS

Quellcode 37: Auswertung FreeRTOS

Die Abbildung 10 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt, der die Kontextwechsel visualisiert. Die gesamte Steuerungslogik wird ausschließlich innerhalb der Micro-ROS-Task (`uros` in Pink) verarbeitet, weswegen nur sie alle Regelungsfunktionen zeitlich überdeckt.

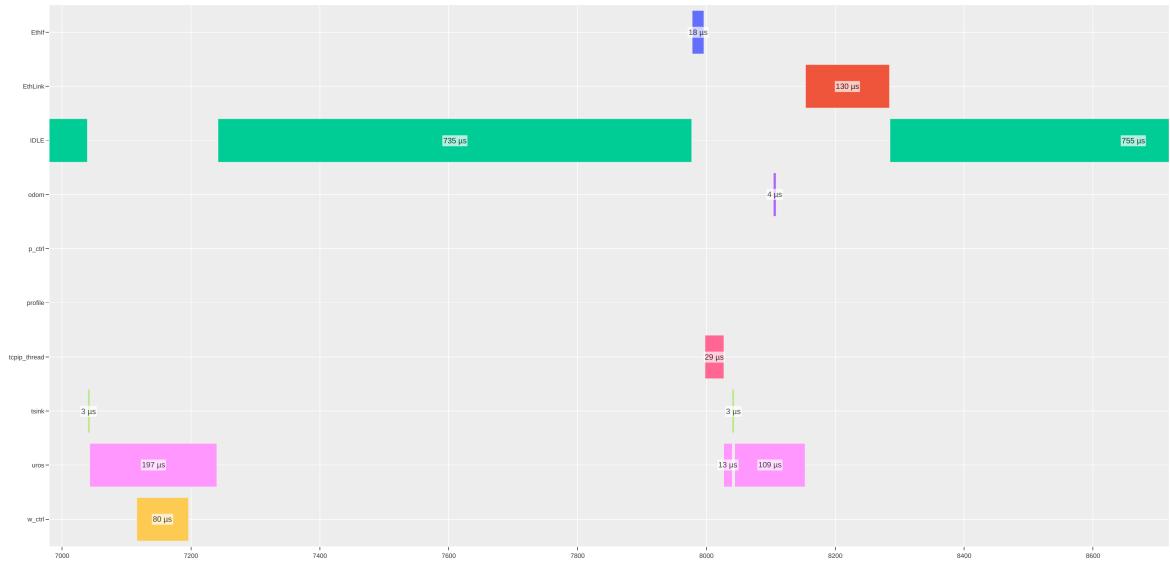


Abbildung 10: Laufzeit-Statistik unter Micro-ROS – Ausschnitt

## 5.1 Laufzeit-Statistik – Micro-ROS

Die Profiling-Daten werden nun pro Task/Funktion separat aufsummiert und der jeweilige Durchschnittswert berechnet.

Bei einer Sollfrequenz von 50 Hz für die Drehzahlregelung und 30 Hz für die Posenregelung sowie Odometrie zeigen die Messergebnisse nach etwa 18 Sekunden Sampling folgende Werte – jeweils ohne und mit Nutzung von Caches:

| Name         | $\bar{\Omega}$ (µs) | Summe      | %              |
|--------------|---------------------|------------|----------------|
| EthIf        | 52,93               | 115.022    | 0,62 %         |
| EthLink      | 128,38              | 26.702     | 0,14 %         |
| IDLE         | 587,79              | 8.961.378  | <b>48,17 %</b> |
| odom         | 8,88                | 8.186      | <b>0,04 %</b>  |
| p_ctrl       | 277,97              | 170.671    | <b>0,92 %</b>  |
| profile      | 623,40              | 4.981.587  | <b>26,78 %</b> |
| tcpip_thread | 71,16               | 176.607    | 0,95 %         |
| tsink        | 8,80                | 120.659    | 0,65 %         |
| uros         | 203,31              | 3.807.442  | <b>20,47 %</b> |
| w_ctrl       | 256,11              | 236.136    | <b>1,27 %</b>  |
| <b>Summe</b> | -                   | 18.604.390 | 100,00 %       |

Tabelle 2: Laufzeit-Statistik ohne Caching

| Name         | $\bar{\Omega}$ (µs) | Summe      | %              |
|--------------|---------------------|------------|----------------|
| EthIf        | 18,43               | 40.671     | 0,21 %         |
| EthLink      | 123,53              | 24.583     | 0,13 %         |
| IDLE         | 661,14              | 15.505.748 | <b>81,81 %</b> |
| odom         | 4,02                | 3.791      | <b>0,02 %</b>  |
| p_ctrl       | 88,25               | 55.511     | <b>0,29 %</b>  |
| profile      | 803,55              | 1.517.905  | <b>8,01 %</b>  |
| tcpip_thread | 28,29               | 63.613     | 0,34 %         |
| tsink        | 3,37                | 41.113     | 0,22 %         |
| uros         | 76,17               | 1.614.854  | <b>8,52 %</b>  |
| w_ctrl       | 90,82               | 85.646     | <b>0,45 %</b>  |
| <b>Summe</b> | -                   | 18.953.435 | 100,00 %       |

Tabelle 3: Laufzeit-Statistik mit Caching

Bei einer 100 Hz|50 Hz-Reglerkonfiguration zeigen die Messergebnisse nach etwa 18 Sekunden Sampling folgende Werte – jeweils ohne und mit Nutzung von Caches:

| Name         | $\bar{\sigma}$ (μs) | Summe      | %              |
|--------------|---------------------|------------|----------------|
| EthIf        | 51,53               | 198.643    | 1,05 %         |
| EthLink      | 110,25              | 26.130     | 0,14 %         |
| IDLE         | 545,36              | 7.330.732  | <b>38,75 %</b> |
| odom         | 9,92                | 18.149     | <b>0,10 %</b>  |
| p_ctrl       | 322,41              | 295.008    | <b>1,56 %</b>  |
| profile      | 566,25              | 5.472.282  | <b>28,92 %</b> |
| tcpip_thread | 71,13               | 296.128    | 1,57 %         |
| tsink        | 8,80                | 113.096    | 0,60 %         |
| uros         | 231,74              | 4.606.256  | <b>24,35 %</b> |
| w_ctrl       | 307,53              | 562.785    | <b>2,97 %</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.919.209 | 100,00 %       |

Tabelle 4: Laufzeit-Statistik ohne Caching

| Name         | $\bar{\sigma}$ (μs) | Summe      | %              |
|--------------|---------------------|------------|----------------|
| EthIf        | 18,81               | 68.712     | 0,37 %         |
| EthLink      | 128,88              | 23.971     | 0,13 %         |
| IDLE         | 607,96              | 14.540.662 | <b>78,00 %</b> |
| odom         | 3,74                | 6.780      | <b>0,04 %</b>  |
| p_ctrl       | 75,16               | 69.301     | <b>0,37 %</b>  |
| profile      | 889,48              | 1.641.972  | <b>8,81 %</b>  |
| tcpip_thread | 28,25               | 104.623    | 0,56 %         |
| tsink        | 3,43                | 36.583     | 0,20 %         |
| uros         | 86,44               | 1.957.616  | <b>10,50 %</b> |
| w_ctrl       | 103,59              | 191.027    | <b>1,02 %</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.641.247 | 100,00 %       |

Tabelle 5: Laufzeit-Statistik mit Caching

Ohne Daten- oder Instruktionscache benötigte die Micro-ROS-Task für unter anderem die gesamte Steuerungslogik bei den Reglern mit 50 Hz sowie 30 Hz **20,47 %** Rechenzeit. Bei 100 Hz sowie 50 Hz waren es **24,35 %**. Gleichzeitig befand sich das System zu **48,17 %** bzw. **38,75 %** im Leerlauf.

Mit aktiviertem Daten- und Instruktionscache benötigte die Micro-ROS-Task bei den Reglern mit 50 Hz sowie 30 Hz nur **8,52 %** Rechenzeit. Bei höheren Frequenzen (100 Hz sowie 50 Hz) ist sie **10,50 %**, während die Leerlaufzeit bei **81,81 %** bzw. **78,00 %** liegt.

Durch die Nutzung der Caches reduzierte sich die Rechenzeit für die Roboterlogik beispielsweise in der 100 Hz/50 Hz-Reglerkonfiguration deutlich: um **62,64 %** für die Odometrie, **76,51 %** für die Posenregelung und **66,06 %** für die Drehzahlregelung. Gleichzeitig stieg die Leerlaufzeit um **98,35 %** an, wobei die gesamte Profiling-Dauer zwischen den beiden Samplings eine Differenz von 349,045 ms aufwies.

## 5.2 Laufzeit-Statistik – FreeRTOS

Bei einer 50 Hz|30 Hz-Reglerkonfiguration zeigen die Messergebnisse nach etwa 18 Sekunden Sampling folgende Werte – jeweils ohne und mit Nutzung von Caches:

| Name         | $\bar{\sigma}$ (µs) | Summe      | %             |
|--------------|---------------------|------------|---------------|
| IDLE         | 983,50              | 14.996.422 | <b>81,85%</b> |
| hal_fetch    | 21,71               | 20.403     | 0,11%         |
| odometry     | 24,05               | 13.634     | <b>0,07%</b>  |
| pose_control | 32,66               | 18.682     | <b>0,10%</b>  |
| profile      | 902,87              | 3.077.879  | <b>16,80%</b> |
| tsink        | 9,63                | 161.451    | 0,88%         |
| wheel_ctrl   | 35,80               | 34.260     | <b>0,19%</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.322.731 | 100,00%       |

Tabelle 6: Laufzeit-Statistik ohne Caching

| Name         | $\bar{\sigma}$ (µs) | Summe      | %             |
|--------------|---------------------|------------|---------------|
| IDLE         | 1.041,06            | 17.658.382 | <b>94,83%</b> |
| hal_fetch    | 6,43                | 6.003      | 0,03%         |
| odometry     | 7,19                | 4.068      | <b>0,02%</b>  |
| pose_control | 9,64                | 5.456      | <b>0,03%</b>  |
| profile      | 476,43              | 889.027    | <b>4,77%</b>  |
| tsink        | 2,95                | 46.947     | 0,25%         |
| wheel_ctrl   | 10,96               | 10.379     | <b>0,06%</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.620.262 | 100,00%       |

Tabelle 7: Laufzeit-Statistik mit Caching

Bei einer 100 Hz|50 Hz-Reglerkonfiguration zeigen die Messergebnisse nach etwa 18 Sekunden Sampling folgende Werte – jeweils ohne und mit Nutzung von Caches:

| Name         | $\bar{\sigma}$ (µs) | Summe      | %             |
|--------------|---------------------|------------|---------------|
| IDLE         | 997,02              | 14.706.086 | <b>80,67%</b> |
| hal_fetch    | 21,91               | 40.471     | 0,22%         |
| odometry     | 24,01               | 22.373     | <b>0,12%</b>  |
| pose_control | 32,46               | 30.579     | <b>0,17%</b>  |
| profile      | 941,93              | 3.209.167  | <b>17,60%</b> |
| tsink        | 9,36                | 151.046    | 0,83%         |
| wheel_ctrl   | 37,77               | 70.285     | <b>0,39%</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.230.007 | 100,00%       |

Tabelle 8: Laufzeit-Statistik ohne Caching

| Name         | $\bar{\sigma}$ (µs) | Summe      | %             |
|--------------|---------------------|------------|---------------|
| IDLE         | 1.139,87            | 17.276.974 | <b>94,61%</b> |
| hal_fetch    | 6,61                | 12.104     | 0,07%         |
| odometry     | 6,84                | 6.256      | <b>0,03%</b>  |
| pose_control | 9,88                | 9.043      | <b>0,05%</b>  |
| profile      | 487,57              | 892.246    | <b>4,89%</b>  |
| tsink        | 3,01                | 45.597     | 0,25%         |
| wheel_ctrl   | 10,69               | 19.559     | <b>0,11%</b>  |
| <b>Summe</b> | –                   | 18.443.591 | 100,00%       |

Tabelle 9: Laufzeit-Statistik mit Caching

Ohne Micro-ROS-Abhängigkeit erreicht das System bereits ohne Caches eine Leerlaufzeit von etwa **80 %**. Mit aktivierten Caches steigt diese auf ungefähr **95 %** an.

Die Leistungssteigerung durch die Nutzung von Caches ist bei der Implementierung unter FreeRTOS ebenfalls signifikant, wobei sich die gesamte Profiling-Dauer beider Samplings bei der 100 Hz|50 Hz-Reglerkonfiguration um 213,584 ms unterscheidet: Die Rechenzeiten verringerten sich für die Odometrie um **72,04%**, für die Posenregelung um **70,43%** sowie für die Drehzahlregelung um **72,17%**. Die Leerlaufzeit stieg dabei um **14,88%**,

## 5.3 Vergleich zwischen Micro-ROS und FreeRTOS

### 5.3.1 Experimentelle Bestimmung der maximalen Regelungsfrequenz

Bei FreeRTOS gibt es keine theoretische Obergrenze für die Taktfrequenz zum Kontextwechsel. Die praktische maximale Frequenz liegt standardmäßig bei 1000 Hz, da der

Tick-Interrupt (für den Kontextwechsel) standardmäßig auf 1 ms (entsprechend 1000 Interrupts pro Sekunde) festgelegt ist.

Um eine Taktfrequenz für das FreeRTOS-System über 1000 Hz zu erreichen, muss lediglich der Wert des Makros `configTICK_RATE_HZ` auf die gewünschte Frequenz angepasst werden. Von Frequenzen über 1000 Hz wird jedoch abgeraten, da die kumulativen Kontextwechselkosten einen spürbaren Overhead verursachen [Bar10]. Bei hochfrequenten Systemen, die deutlich über die Standardfrequenz für Kontextwechsel arbeiten, empfiehlt sich daher der Verzicht auf ein RTOS zugunsten eines minimalen Schedulers [Dam19].

Wie in den Grafiken 11 und 12 veranschaulicht, kann das Regelungssystem, dessen zugrundeliegende Datenaustausch mittels FreeRTOS-APIs auf minimalen Overhead optimiert wurde, problemlos mit 1000 Hz betrieben werden. Die Tasks werden rhythmisch und auch deterministisch jeweils mit den vorgegebenen Frequenzen ausgeführt – stets zum gleichen relativen Zeitpunkt zueinander.

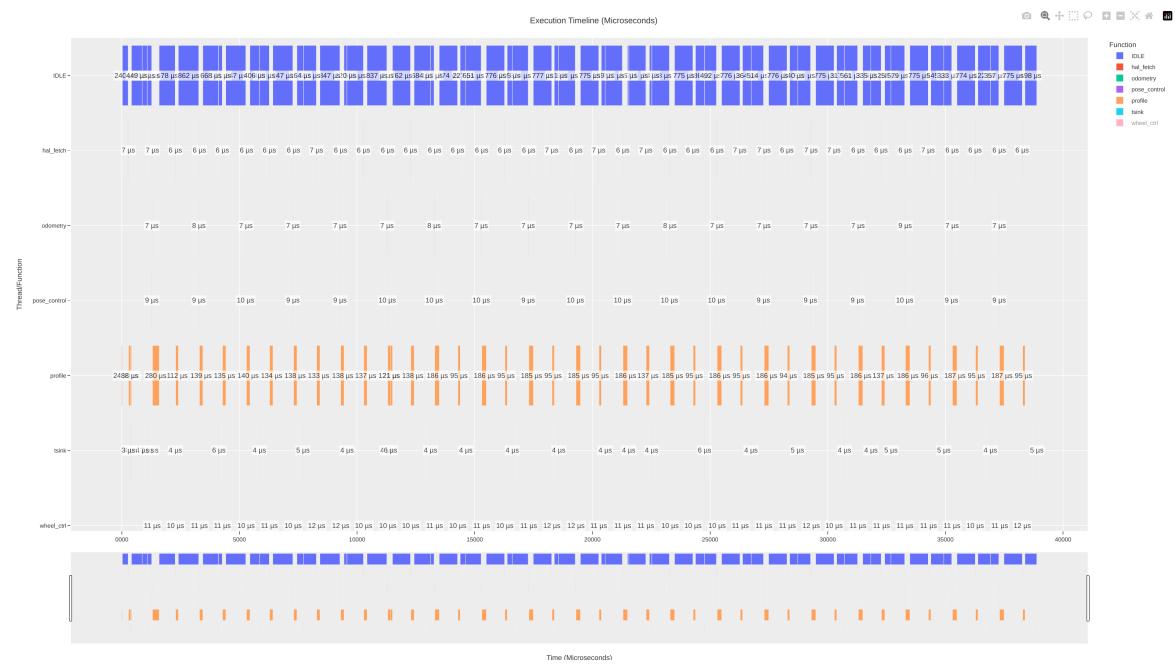


Abbildung 11: Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter FreeRTOS

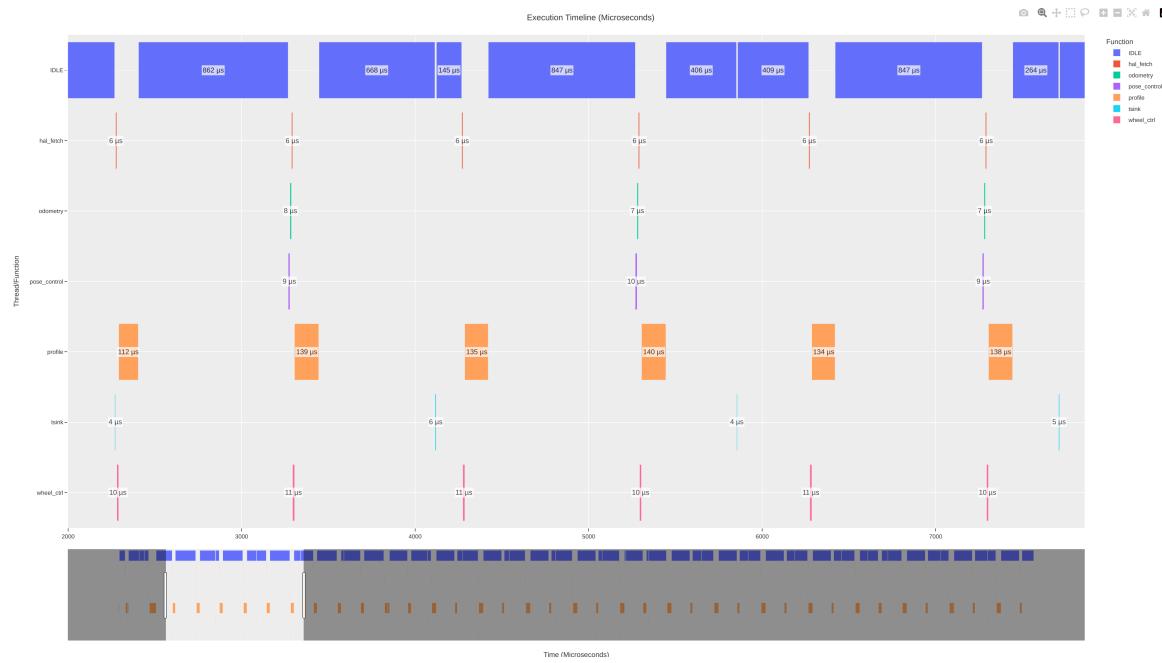


Abbildung 12: Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt

Bei einer **5000 Hz|2000 Hz**-Reglerkonfiguration führt der Scheduler die Kontextwechsel weiterhin zuverlässig aus (13, 14). Die Regelungsfunktionen werden in regelmäßigen Abständen von  $200\mu s$  bzw.  $500\mu s$  aufgerufen (38). Das System verbleibt bei diesen Frequenzen größtenteils ebenfalls im Leerlauf.

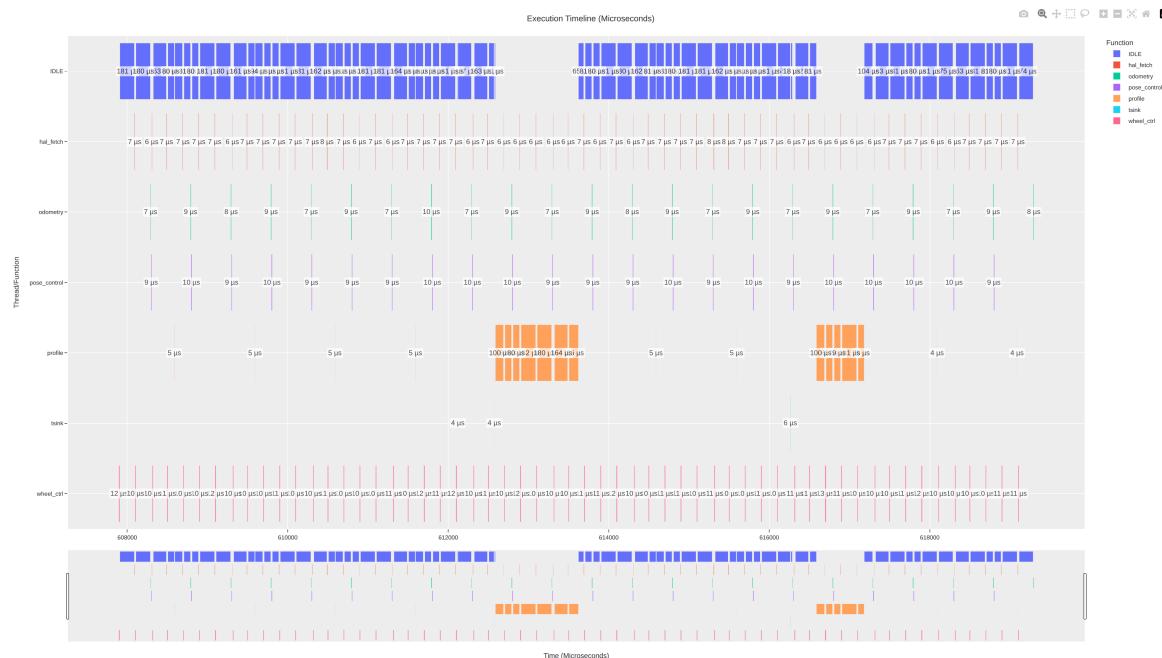


Abbildung 13: Laufzeit-Statistik mit 5000 Hz unter FreeRTOS

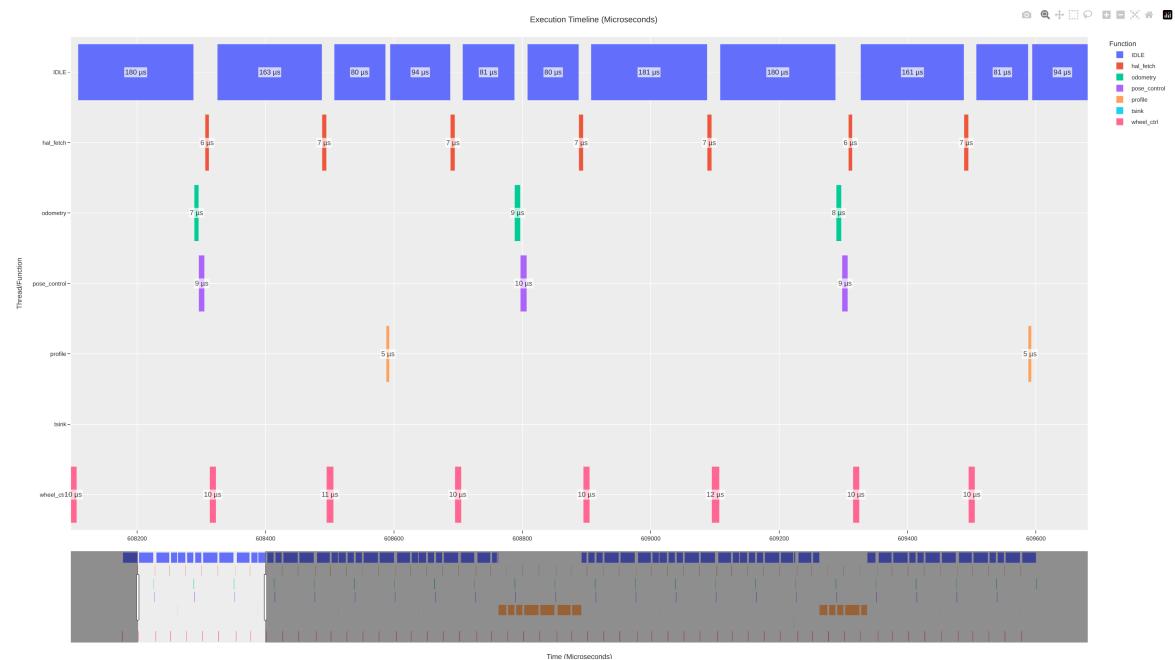


Abbildung 14: Laufzeit-Statistik mit 5000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt

```

1 IDLE 1 0
2 profile 2 1
3 profile 25 0
4 IDLE 27 1
5 IDLE 88 0
6 hal_fetch 89 1
7 hal_fetch 95 0
8 wheel_ctrl 96 1      << Start einer Iteration (Drehzahl)
9 wheel_ctrl 106 0
10 IDLE 107 1
11 IDLE 288 0
12 odometry 289 1      << Start einer Iteration (Odometrie)
13 odometry 296 0
14 pose_control 297 1
15 pose_control 306 0
16 hal_fetch 307 1
17 hal_fetch 313 0
18 wheel_ctrl 313 1      << nach etwa 200 us zur vorherigen Iteration (Drehzahl)
19 ...
20 odometry 788 1      << nach etwa 500 us zur vorherigen Iteration (Odom)

```

Quellcode 38: Profiling-Daten bei 5000|2000Hz

Selbst bei einer **10000 Hz|5000 Hz**-Konfiguration zeigt das System ein relativ zuverlässiges Laufzeitverhalten ohne vollständige Prozessorauslastung (15, 16, 39) – abgesehen von der Profiling-Task. Hier wird vermutlich die zugrundeliegende Übertragung zum Bottleneck: Die hohen Takt- und Regelungsfrequenzen erzeugen Datenmengen,

die nicht mehr rechtzeitig vom DMA-Controller verarbeitet werden können, was zu periodischen Pufferüberläufen führt.

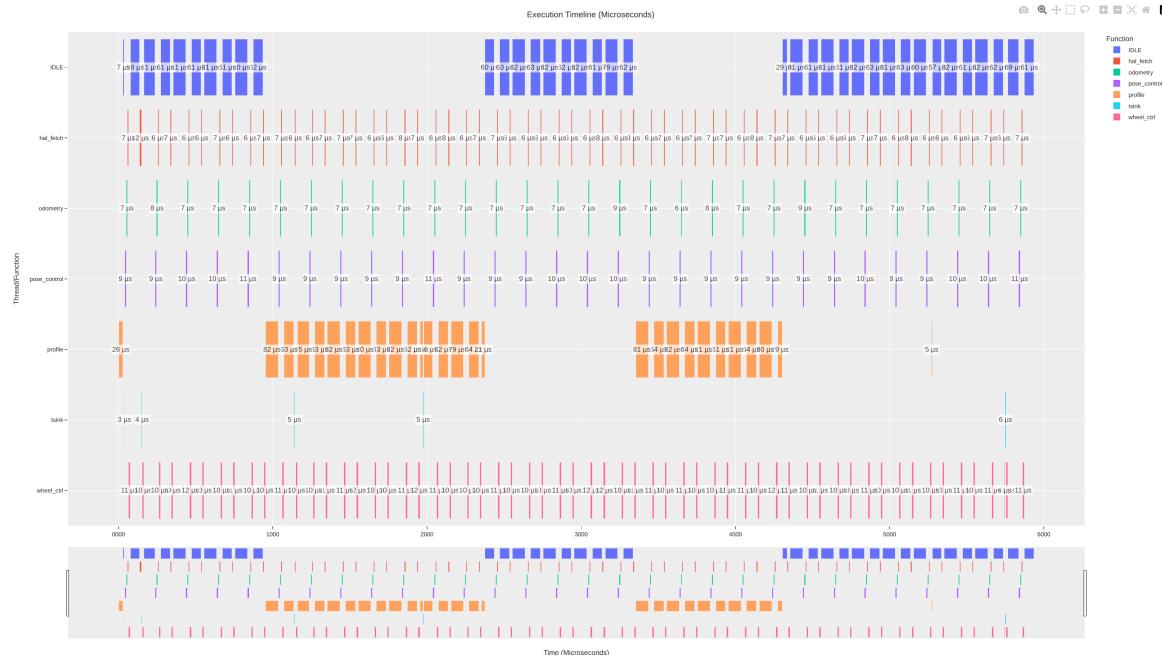


Abbildung 15: Laufzeit-Statistik mit 10000 Hz unter FreeRTOS

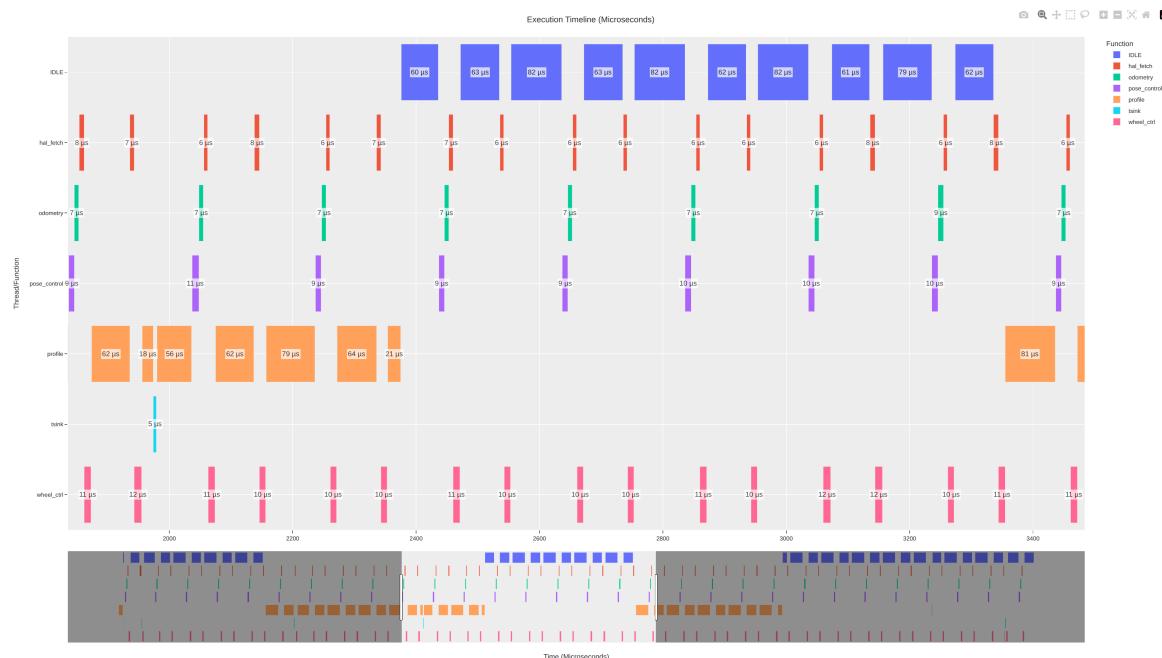


Abbildung 16: Laufzeit-Statistik mit 10000 Hz unter FreeRTOS – Ausschnitt

```

1 profile 2 1
2 profile 28 0
3 IDLE 29 1
4 IDLE 36 0
5 tsink 37 1

```

```

6  tsink 40 0
7  pose_control 41 1    << Start einer Iteration (Pose)
8  pose_control 50 0
9  odometry 51 1
10 odometry 58 0
11 hal_fetch 58 1
12 hal_fetch 65 0
13 wheel_ctrl 65 1      << Start einer Iteration (Drehzahl)
14 wheel_ctrl 76 0
15 IDLE 78 1
16 IDLE 136 0
17 hal_fetch 137 1
18 hal_fetch 149 0
19 tsink 149 1
20 tsink 153 0
21 wheel_ctrl 154 1      << nach etwa 100 us zur vorherigen Iteration (Drehzahl)
22 wheel_ctrl 164 0
23 IDLE 165 1
24 IDLE 236 0
25 pose_control 237 1  << nach etwa 200 us zur vorherigen Iteration (Pose)
26 pose_control 246 0
27 ...

```

Quellcode 39: Profiling-Daten bei 10000|5000Hz

Micro-ROS erreichte eine Sollfrequenz von 1000 Hz nicht und wies stattdessen Schwankungen zwischen 910 Hz und 980 Hz auf (17, 18). Dies lässt sich vermutlich auf zwei Hauptfaktoren zurückführen: Erstens wird die maximal erreichbare Frequenz durch die Integration der zusätzlichen Middleware beeinflusst [ROS19] – konkret eXtremely Resource Constrained Environment (XRCE)-DDS seitens Micro-ROS und standardmäßig Fast DDS bei ROS2.

Zweitens könnte der inhärente Overhead des ROS/Micro-ROS-Stacks ebenfalls signifikante Latenzen verursachende alle Daten zwingend als gepackte Pakete über eine UDP-basierte Verbindung zum Linux-Host und zurück übertragen werden müssen. Dieser transportbedingte, plattformübergreifende Mechanismus führt zu zusätzlichen nicht-deterministischen Verzögerungen im Gegensatz zur FreeRTOS-Implementierung, bei der der Datenaustausch vollständig intern durch direkte Speicherkopien zwischen Adressräumen realisiert wird.

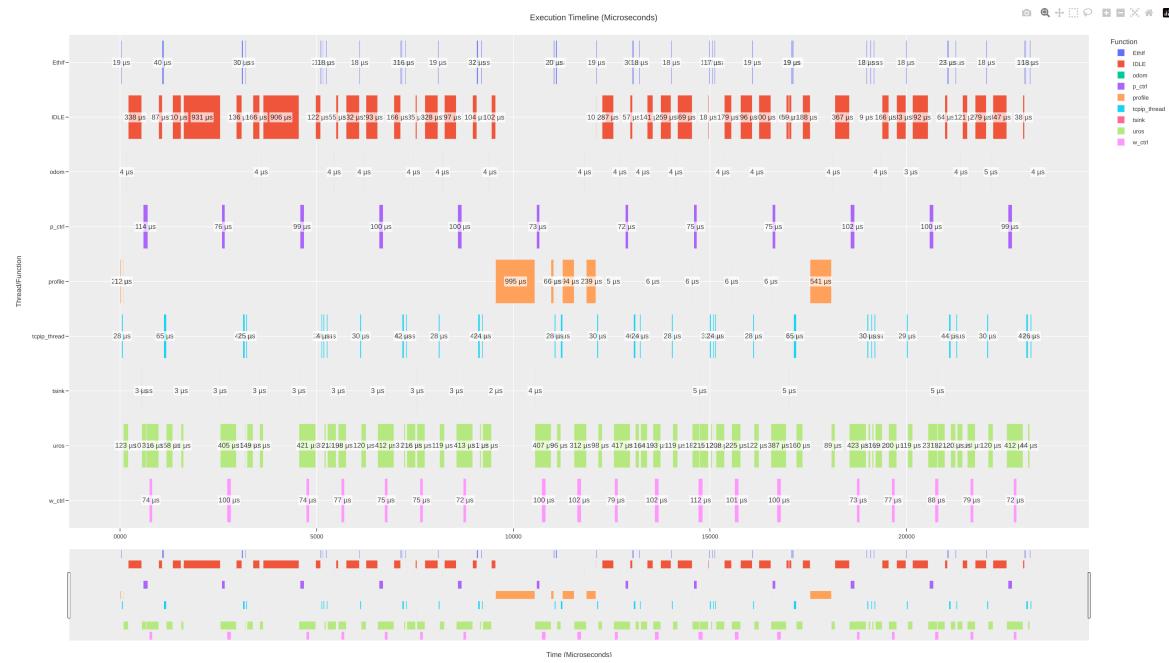


Abbildung 17: Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter Micro-ROS

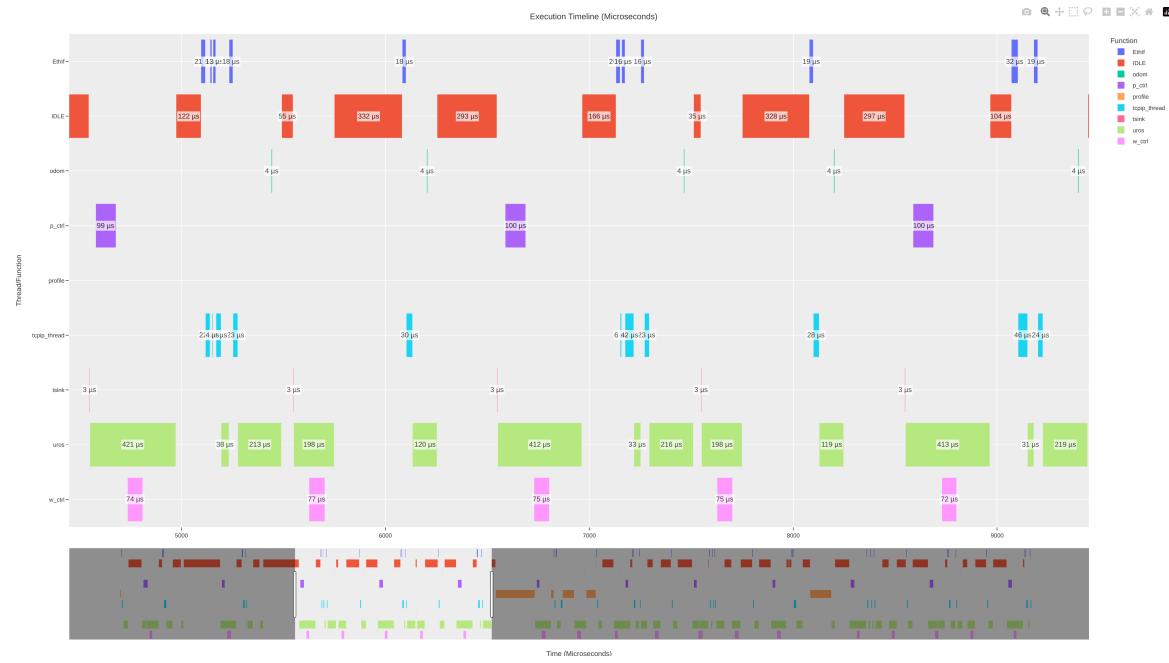


Abbildung 18: Laufzeit-Statistik mit 1000 Hz unter Micro-ROS – Ausschnitt

### 5.3.2 Dauer von Regelungsfunktionen

Aus den Profiling-Daten lässt sich ebenfalls folgender Vergleich (10) zwischen den beiden Implementierungen ableiten:

Die Implementierung ist auf beiden Plattformen größtenteils identisch, abgesehen vom erwähnten Datenaustausch. Bei Micro-ROS müssen alle zu übertragenden Daten in eine

| Name             | Micro-ROS ( $\mu$ s)               | FreeRTOS ( $\mu$ s)              | Differenz ( $\mu$ s)              |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Odometrie        | 6.780 ( $\bar{\sigma}$ : 3,74)     | 6.256 ( $\bar{\sigma}$ : 6,84)   | -524 ( $\bar{\sigma}$ : -3,10)    |
| Posenregelung    | 69.301 ( $\bar{\sigma}$ : 75,16)   | 9.043 ( $\bar{\sigma}$ : 9,88)   | 60.258 ( $\bar{\sigma}$ : 65,28)  |
| Drehzahlregelung | 191.027 ( $\bar{\sigma}$ : 103,59) | 19.559 ( $\bar{\sigma}$ : 10,69) | 171.468 ( $\bar{\sigma}$ : 92,90) |

Tabelle 10: Vergleich der Rechenzeiten zwischen Micro-ROS und FreeRTOS

dedizierte Struktur mit Metadaten – unter anderem einem Header mit Zeitstempel in Sekunden und Nanosekunden – serialisiert werden. Bei FreeRTOS werden die Daten als rohe Bytes direkt in die Queue kopiert und beim Empfänger extrahiert.

Zusätzlich unterscheidet sich die FreeRTOS-Implementierung von Micro-ROS auch dadurch, dass die Encoderdaten nicht vom Drehzahlregler abgefragt und dann erst an die Odometrie übergeben werden. Stattdessen übernimmt eine dedizierte FreeRTOS-Task `hal_fetch` die Übertragung dieser Daten sowohl an den Drehzahlregler als auch an die Odometrie (9). Dadurch wird ein Teil des Overheads vom Drehzahlregler entkoppelt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Steuerungslogik sowohl unter Micro-ROS als auch unter FreeRTOS relativ wenig Rechenzeit beansprucht – vorausgesetzt, dass die Daten ordentlich gecacht sind und nicht bei jedem Zugriff neu aus dem RAM oder Flash geladen werden müssen. Unter FreeRTOS kann selbst bei deutlich höheren Taktfrequenzen ein stabiler Kontextwechsel gewährleistet werden. Dank des leistungsstarken Mikrocontrollers in Kombination mit Cache-Nutzung und hardware- sowie softwareseitig optimiertem Code befindet sich das System auf beiden Plattformen ebenfalls überwiegend im Leerlauf.

## 6 Zusammenfassung

Am Anfang wurde die Robotersteuerungssoftware von Micro-ROS auf FreeRTOS umgestellt. Anschließend wurden eine Multi-Producer-Senke sowie ein Verfahren entwickelt, das Laufzeitinformationen über die Steuerungssoftware ausgeben kann. Abschließend wurde die Echtzeitfähigkeit basierend auf die erzeugten Laufzeitdaten analysiert.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die Steuerungssoftware zwar durch Integration von Micro-ROS funktionsreicher und folglich mit einer Vielzahl von ROS-Komponenten kompatibel wird, dies allerdings mit erheblichem Overhead erkauft wird. Bei begrenztem Speicher oder Rechenleistung bleibt FreeRTOS mit seinem schlanken Kernel und den standardmäßig threadsicheren Queue-Abstraktionen weiterhin eine geeignete Wahl gegenüber komplexeren RTOS-Lösungen – insbesondere wenn hochfrequente Aufgabenausführungen mit Echtzeitanforderungen prioritär sind.

Zudem wurde demonstriert, dass L1-Caches die Performance signifikant steigern – eine für leistungskritische Software wesentliche Optimierung, die nicht vernachlässigt werden darf.

Für zukünftige Arbeiten könnte die Multi-Producer-Senke so weiterentwickelt werden, dass sie Schreiboperationen atomar auf 4-Byte-/32-Bit-Ebene unterstützt. Dadurch könnten die Laufzeitdaten nicht mehr im menschenlesbaren Format mit überflüssigem Daten-Overhead, sondern komprimiert jeweils als 32-Bit-Datenwort ausgegeben werden.

Dies würde erstens den Zwischenpuffer und den erforderlichen Mutex zum Serialisieren sowie Speichern von erzeugten Laufzeitdaten überflüssig machen, da sie als 32-bit-Datenworte atomar direkt in die Senke geschrieben werden könnten. Zweitens könnte dann ein dedizierter Parser auf dem Linux-Host entwickelt werden, der die Visualisierung übernimmt und idealerweise eine Echtzeitanalyse parallel zur Laufzeit durchführt.

## Literaturverzeichnis

- [Alm] ALMGREN, Sven: *STM32H7 LwIP Cache Bug Fix*. <https://community.st.com/t5/stm32-mcus-embedded-software/stm32h7-lwip-cache-bug-fix/m-p/383712>. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [ARMa] ARM LIMITED: *ARMv7-M Architecture Reference Manual*. <https://developer.arm.com/documentation/ddi0403/d/Debug-Architecture/ARMv7-M-Debug/The-Data-Watchpoint-and-Trace-unit/Profiling-counter-support?lang=en>. – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [ARMb] ARM LIMITED: *ARMv7-M Architecture Reference Manual*. <https://developer.arm.com/documentation/ddi0403/d/Debug-Architecture/ARMv7-M-Debug/The-Data-Watchpoint-and-Trace-unit/CYCCNT-cycle-counter-and-related-timers?lang=en>. – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [ARMc] ARM LIMITED: *Cortex-M7 Documentation - Arm Developer*. <https://developer.arm.com/documentation/ka001150/latest/>. – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [Armd] ARM LIMITED: *Data Watchpoint and Trace Unit (DWT) Programmer's Model*. <https://developer.arm.com/documentation/ddi0439/b/Data-Watchpoint-and-Trace-Unit/DWT-Programmers-Model>. – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [ARMe] ARM LIMITED: *Memory barriers*, <https://developer.arm.com/documentation/den0042/a/Memory-Ordering/Memory-barriers>. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [ARMf] ARM LIMITED: *Tightly Coupled Memory*. <https://developer.arm.com/documentation/den0042/a/Tightly-Coupled-Memory>. – Letzter Zugriff: 20. März 2025
- [ARM21] ARM LIMITED: *ARM Architecture Reference Manual: ARMv7-A and ARMv7-R edition*, 2021
- [ARM24] ARM LIMITED: *Instruction Set Summary*, 2024. <https://developer.arm.com/documentation/ddi0432/c/programmers-model/instruction-set-summary?lang=en>. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [Bah22] BAHR, Daniel: *CRCpp*. <https://github.com/d-bahr/CRCpp>. Version: 2022. – Letzter Zugriff: 16. März 2025
- [Bar10] BARRY, Richard: *Increasing configTICK\_RATE\_HZ beyond 1000*. [https://www.freertos.org/FreeRTOS\\_Support\\_Forum\\_Archive/April\\_2010/freertos\\_Increasing\\_configTICK\\_RATE\\_HZ\\_beyond\\_1000\\_3667628.html](https://www.freertos.org/FreeRTOS_Support_Forum_Archive/April_2010/freertos_Increasing_configTICK_RATE_HZ_beyond_1000_3667628.html). Version: 2010. – Letzter Zugriff: 01. Mai 2025
- [Bar19] BARRY, Richard: *Implementation of printf that works in threads*.

- <https://forums.freertos.org/t/implementation-of-printf-that-works-in-threads/8117/2>. Version: 2019. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [CMS23] CMSIS: *CMSIS Core Cache Functions*. [https://docs.contiki-ng.org/en/release-v4.5/\\_api/group\\_\\_CMSIS\\_\\_Core\\_\\_CacheFunctions.html#ga696fadbf7b9cc71dad42fab61873a40d](https://docs.contiki-ng.org/en/release-v4.5/_api/group__CMSIS__Core__CacheFunctions.html#ga696fadbf7b9cc71dad42fab61873a40d). Version: 2023. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [cpp] CPPREFERENCE.COM: *Order of evaluation*. [https://en.cppreference.com/w/c/language/eval\\_order](https://en.cppreference.com/w/c/language/eval_order). – Letzter Zugriff: 29. März 2025
- [Dam19] DAMON, Richard: *RTOS Design for High Frequency Application*. <https://forums.freertos.org/t/rtos-design-for-high-frequency-application/8137/3>. Version: 2019. – Letzter Zugriff: 01. Mai 2025
- [Emb] EMBEDDEDEXPERT.IO: *Understanding Cache Memory in Embedded Systems*. Blog post. <https://blog.embeddedexpert.io/?p=2707>. – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [Fou25] FOUNDATION, ISO C.: *FAQ: Destructor Order for Locals*. <https://isocpp.org/wiki/faq/dtors#order-dtors-for-locals>. Version: 2025. – Letzter Zugriff: 29. März 2025
- [Frea] FREERTOS: *Mutex*. <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/02-Queues-mutexes-and-semaphores/02-Binary-semaphores#freertos-binary-semaphores>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Freb] FREERTOS: *queue.h*. <https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS-Kernel/blob/0030d609a4b99118d9a400340d88c3c3c4816f2b/include/queue.h#L647>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Frec] FREERTOS: *The RTOS Tick*. <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/05-RTOS-implementation-tutorial/02-Building-blocks/03-The-RTOS-tick>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Fred] FREERTOS: *RTOS Trace Feature*. <https://freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/09-RTOS-trace-feature#defineining>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Free] FREERTOS: *semphr.h*. <https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS-Kernel/blob/0030d609a4b99118d9a400340d88c3c3c4816f2b/include/semphr.h#L99>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Fref] FREERTOS: *Static vs Dynamic Memory Allocation*. <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/09-Memory-management/03-Static-vs-Dynamic-memory-allocation#creating-an-rtos-object-using-statically-allocated-ram>. – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [Freg] FREERTOS: *Task Notifications - Performance Benefits and Usage Restriction*.

- tions. <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/03-Direct-to-task-notifications/01-Task-notifications#performance-benefits-and-usage-restrictions>. – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Freh] FREERTOS: *tasks.c*. [https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third\\_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L308](https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L308). – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Frei] FREERTOS: *tasks.c*. [https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third\\_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L4990](https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L4990). – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Frej] FREERTOS: *tasks.c*. [https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third\\_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L4614](https://github.com/znxuz/mecarover/blob/5ba898b9051b682c8f6cfce867b99b681a5dda7f/Middlewares/Third_Party/FreeRTOS/Source/tasks.c#L4614). – Letzter Zugriff: 15. März 2025
- [Fre21] FREERTOS: *FreeRTOS Kernel: stream\_buffer.h*. [https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS-Kernel/blob/0030d609a4b99118d9a400340d88c3c3c4816f2b/include/stream\\_buffer.h#L41](https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS-Kernel/blob/0030d609a4b99118d9a400340d88c3c3c4816f2b/include/stream_buffer.h#L41). Version: 2021. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [Fre23] FREERTOS: *Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel - A Hands-On Tutorial Guide*. 2023 <https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS-Kernel-Book/blob/a4c1c83289196317db549f1899330c5b9e7ecb73/ch01.md?plain=1#L35>. – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [Fre25] FREERTOS: *Run-time Statistics*. <https://www.freertos.org/Documentation/02-Kernel/02-Kernel-features/08-Run-time-statistics#description>. Version: 2025. – Letzter Zugriff: 28. März 2025
- [HAL] ; SourceVu (Veranst.): *HAL\_UART\_Transmit\_DMA Documentation*. [https://sourcevu.sysprogs.com/stm32/HAL/files/Src/stm32f4xx\\_hal\\_uart.c#tok5956](https://sourcevu.sysprogs.com/stm32/HAL/files/Src/stm32f4xx_hal_uart.c#tok5956). – Letzter Zugriff: 28. März 2025
- [hot23] HOTSPOT stm32: *STM32H7-LwIP-Examples*. <https://github.com/stm32-hotspot/STM32H7-LwIP-Examples?tab=readme-ov-file#cortex-m7-configuration>. Version: 2023. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [iso20] ; International Organization for Standardization (Veranst.): *ISO/IEC 14882:2020(E): Programming Languages — C++*. Geneva, Switzerland, 2020
- [KL22] KER LIU, Zaiping B.: *Synchronization Overview and Case Study on Arm Architecture*. <https://developer.arm.com/documentation/107630/1-0/?lang=en>. Version: 2022. – Letzter Zugriff: 21. April 2025
- [Kou23] KOUBAA, Anis: *Robot Operating System (ROS) The Complete Reference*. Volume 7. Springer Verlag, 2023. – ISBN 978-3-031-09061-5

- [lwIP] *lwIP: Common Pitfalls.* [https://www.nongnu.org/lwip/2\\_1\\_x/pitfalls.html](https://www.nongnu.org/lwip/2_1_x/pitfalls.html). – Letzter Zugriff: 20. März 2025
- [Mau24] MAUBEUGE, Nicolas de: *Issue #139: Cache Coherency Problems in STM32CubeMX Integration.* [https://github.com/micro-ROS/micro\\_ros\\_stm32cubemx\\_utils/issues/139](https://github.com/micro-ROS/micro_ros_stm32cubemx_utils/issues/139). Version: 2024. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [Mau25] MAUBEUGE, Nicolas de: *Comment to issue #139: Cache Coherency Problems in STM32CubeMX Integration.* [https://github.com/micro-ROS/micro\\_ros\\_stm32cubemx\\_utils/issues/139#issuecomment-2710543256](https://github.com/micro-ROS/micro_ros_stm32cubemx_utils/issues/139#issuecomment-2710543256). Version: 2025. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [Pfl11] PFLUGHOEFT, Danny: *Mod of power 2 on bitwise operators?* Stack Overflow. <https://stackoverflow.com/a/6670853>. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [Plo16] PLOUCH, Howard: *Activation of DWT on Cortex-M7.* <https://stackoverflow.com/a/37345912>. Version: 2016. – Letzter Zugriff: 21. März 2025
- [ROS19] ROS ANSWERS COMMUNITY: *Performance comparison between ros2 and micro ros.* <https://answers.ros.org/question/318580/>. Version: 2019. – Letzter Zugriff: 01. Mai 2025
- [Sch19] SCHLAIKJER, Ross: *Memories and Latency.* Blog post. <https://rhye.org/post/stm32-with-opencm3-4-memory-sections/>. Version: 2019. – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [SEGa] SEGGER: *SEGGER SystemView User Manual.* [https://www.segger.com/downloads/jlink/UM08027\\_SystemView.pdf](https://www.segger.com/downloads/jlink/UM08027_SystemView.pdf). – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [SEGb] SEGGER MICROCONTROLLER: *What is SystemView?* <https://www.segger.com/products/development-tools/systemview/technology/what-is-systemview#how-does-it-work>. – Letzter Zugriff: 14. März 2025
- [ST 23] ST COMMUNITY: *Is the HAL\_UART\_Transmit\_IT function thread safe?* <https://community.st.com/t5/stm32cubeide-mcus/is-the-hal-uart-transmit-it-function-thread-safe/m-p/126830/highlight/true#M4692>. Version: 2023. – Letzter Zugriff: 01. Mai 2025
- [STMa] STMICROELECTRONICS: *Level 1 Cache on STM32F7 Series and STM32H7 Series.* Application Note. [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4839-level-1-cache-on-stm32f7-series-and-stm32h7-series-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4839-level-1-cache-on-stm32f7-series-and-stm32h7-series-stmicroelectronics.pdf). – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [STMb] STMICROELECTRONICS: *STM32F7 Series System Architecture and*

- Performance.* Application Note. [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4667-stm32f7-series-system-architecture-and-performance-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4667-stm32f7-series-system-architecture-and-performance-stmicroelectronics.pdf). – Letzter Zugriff: 19. März 2025
- [STMc] STMICROELECTRONICS: *STM32F767ZI Datasheet*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f767zi.pdf>. – Letzter Zugriff: 20. März 2025
- [STMd] STMICROELECTRONICS: *stm32f7xx\_hal\_uart\_ex.c* - *HAL\_UARTEx\_ReceiveToIdle\_IT*. [https://github.com/STMicroelectronics/stm32f7xx-hal-driver/blob/903af163202d9150c57b89ddacfa818e7722451f/Src/stm32f7xx\\_hal\\_uart\\_ex.c#L606](https://github.com/STMicroelectronics/stm32f7xx-hal-driver/blob/903af163202d9150c57b89ddacfa818e7722451f/Src/stm32f7xx_hal_uart_ex.c#L606). – Letzter Zugriff: 16. März 2025
- [STMe] STMICROELECTRONICS: *Using the CRC Peripheral on STM32 Microcontrollers*, [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4187-using-the-crc-peripheral-on-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4187-using-the-crc-peripheral-on-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf). – Letzter Zugriff: 16. März 2025
- [Str24] STRAUSS, Erez: *User API & C++ Implementation of a Multi Producer, Multi Consumer, Lock Free, Atomic Queue*. CppCon. [https://youtu.be/bjz\\_bMNNWRk?t=2130](https://youtu.be/bjz_bMNNWRk?t=2130). Version: 2024. – Letzter Zugriff: 27. März 2025
- [Wik] WIKIPEDIA: *Eintrittsinvarianz*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Eintrittsinvarianz>. – Letzter Zugriff: 01. Mai 2025
- [Xu25] Xu, Zijian: *Mecarover - FreeRTOS Profiling Branch*. <https://github.com/zijian-x/mecarover/tree/freertos-profiling>. Version: 2025. – Letzter Zugriff: 19. März 2025