

Embedded Realtime OS FreeRTOS auf STM32F4

Michael Ebert
Ad-hoc Networks GmbH
ebert@ad-hoc.network

Christoph Bläßer
Bundesamt für Sicherheit in der
Informationstechnik
christoph.blaesser@gmx.de

Stichwörter

FreeRTOS, RTOS, ARM, STM32, Real Time.

KURZFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Echtzeitbetriebssystem FreeRTOS vorgestellt. Hierzu werden zu Beginn die allgemeinen Eigenschaften für Echtzeitbetriebssysteme beschrieben. Im Verlauf des Textes wird an ausgewählten Beispielen dargestellt, wie FreeRTOS diese Anforderungen berücksichtigt und durch geeignete Programmfunktionen umsetzt.

1. GRUNDLAGEN ECHTZEITSYSTEME

1.1 Echtzeitsysteme und Echtzeitbetriebssysteme

Mit der steigenden Leistungsfähigkeit von modernen μ -Prozessoren, steigen auch die Anforderungen an die Software die auf diese Systeme aufsetzt. Viele dieser Systeme fordern trotz ihrer Komplexität, dass Teile des Programmablauf in bestimmten zeitlichen Grenzen ausgeführt wird und somit vorhersehbar und deterministisch sind. Systeme die solchen Anforderungen unterliegen werden Echtzeitsysteme genannt. Bezogen auf ihre Zuverlässigkeit unterliegen Echtzeitsysteme einer weiteren Unterteilung in Echtzeitsysteme mit weicher Echtzeitanforderungen (soft realtime systems) und Echtzeitsysteme mit harter Echtzeitanforderung (hard realtime systems). Ein weiches Echtzeitsystem soll eine Aufgabe in den vorgegeben zeitlichen Grenzen ausführen, ein überschreiten der zeitlichen Grenzen ist grundsätzlich nicht erlaubt, führt aber nicht unmittelbar zu einem Fehler oder einem Versagen des Gesamtsystems. Ein hartes Echtzeitsystem hingegen muss die gestellte Aufgabe in den vorgegebenen Grenzen ausführen. Durch eine Überschreitung wird das System unbrauchbar und führt dazu, dass das System nicht im vorgesehenen Szenario eingesetzt werden kann. Dabei ist ausdrücklich zu beachten, dass Echtzeit nicht bedeutet, dass ein Programm besonders schnell ausgeführt wird. Die Ausführung eines Programms kann beispielsweise auch gewollt langsam sein und gerade deshalb den gestellten Echtzeitanforderung genügen. Einige Beispielsysteme und deren Echtzeitzuordnung wird in Tabelle 1 gezeigt. Um die grundsätzliche Funktionalität eines Echtzeitbetriebssystems zu erläutern, werden zuerst die Grundmodelle für den Programmablauf eingebetteter Systeme beschrieben. Der Programmablauf eingebetteter Systeme lässt sich auf drei Modelle zurückführen (Abbildung 1). Eingebettete Anwendungen können in einer einzigen Schleife (mit oder ohne Interrupt Unterbrechungen) laufen oder aber in event-gesteuerten nebenläufigen eigenständigen Programmabschnitten (Thread oder Task¹) ausgeführt werden. Die nebenläufige

¹Nachfolgenden wird Task benutzt, da dies der geläufige Begriff bei FreeRTOS ist. In der Literatur zu Echtzeitsystemen ist der

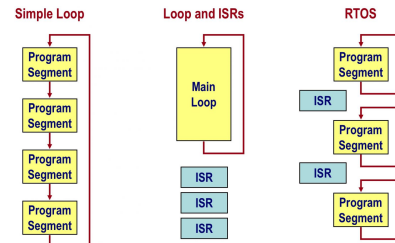


Abbildung 1. Übersicht Programmabläufe in embedded Anwendungen. Unterscheidung von zwei Hauptkategorien: Schleifen-gesteuerte Anwendungen und Event-gesteuerte Anwendungen. Bild-Quelle [5]

Ausführung der unterschiedlichen Programmsegmente ist nur durch einen geeigneten Scheduler, welcher Teil eines RTOS Kernels ist, zu erreichen. Ein RTOS Kernel abstrahiert von der zugrunde liegenden Hardware und ermöglicht weitergehende Steuerung, beispielsweise durch Verwaltung von Timing Informationen. Der Kernel stellt dabei sicher, dass die nächste Task rechtzeitig ausgeführt wird. Der Entwickler ist dafür verantwortlich, dass die Task die gewünschte Aufgabe im zeitlichen Rahmen ausführt. Durch den Einsatz des RTOS Kernels kann der Entwickler jedoch auf Spezifika der Hardware verzichten und die Funktionen des Kernels verwenden. Wie sichergestellt werden kann, dass eine Task harten oder weichen Echtzeitanforderungen entspricht wird Abschnitt 3.2 beschrieben. Für viele kleine Anwendungen kann die Nutzung einer einzigen Schleife durchaus sinnvoll sein, wenn beispielsweise die Ressourcen so knapp sind, dass ein Overhead durch zusätzliche Verwaltungsfunktionen ausgeschlossen werden muss. Ein großer Nachteil der „einschleifen Variante“ ist die permanente Nutzung des Prozessors, auch „processor hogging“ oder „CPU hogging“ genannt. Um den Prozessor in dieser Variante in einen Energiesparmodus zu versetzen sind umfangreiche Kenntnisse über den Prozessor sowie eine sehr strukturierte Programmierung erforderlich, die gerade bei Anpassungen der Software zu Problemen führen kann. Besonders bei akkubetriebenen Geräten wie IoT Devices oder Mobiltelefonen wird sehr genau auf die Energieaufnahme geachtet. Ein RTOS Kernels hingegen arbeiten mit einem Event gesteuerten Programmablauf, ein „CPU hogging“ kann somit vermieden werden. Des Weiteren bieten viele RTOS Kernel sehr einfache Lösungen zur effektiven Nutzung von Energiesparmodis. Dies wird in Abschnitt 2.9 am Beispiel von FreeRTOS und einem ARM μ Prozessor demonstriert. Neben der Echtzeitfähigkeit gibt es aber noch viele weitere Vorzüge für den Einsatz eines Echtzeitbetriebssystems. Durch das Herunterbrechen der Anwendungen in Tasks entstehen viele kleine Module, die jeweils eine kleine Teilaufgabe des Gesamtsystems über-

Begriff nicht exakt definiert.

nehmen. Durch ein sauber definiertes Interface zur Kommunikation der Tasks lässt sich die Entwicklungsarbeit leicht auf mehrere Teams verteilen. Dies ermöglicht auch den Einsatz von agilen Entwicklungsmethoden wie Scrum in der Entwicklung von eingebetteten Systemen. Ein weiterer großer Vorteil ist die Erweiterbarkeit von RTOS Anwendungen. Bei Änderungen von Anwendungen die in einer Schleife laufen, ist oft der gesamte Code von dieser Änderungen betroffen. Ein RTOS hat durch die Interprozesskommunikation eine natürliche Lose-Kopplung zwischen den einzelnen Programmfunktionalitäten. Das Ändern oder Hinzufügen von Task sind somit wesentlich einfacher, da andere Task nicht unmittelbar durch diese Änderung betroffen sind.

2. FREERTOS

2.1 Geschichte

FreeRTOS wird seit etwa 10 Jahren von der Firma Real Time Engineers Ltd. in Zusammenarbeit mit verschiedenen Chipherstellern entwickelt. Derzeit unterstützt es 35 Architekturen und wurde mehr als 113000 mal heruntergeladen. Das Entwickler Team unter Führung des Gründers Richard Barry, konzentrieren sich bei der Entwicklung darauf sowohl ein geeignetes Qualitätsmanagement umzusetzen, als auch die Verfügbarkeit der verschiedenen Dateiversionen zu gewährleisten. FreeRTOS wird in zwei verschiedenen Lizenzmodellen angeboten, die eine Anpassung der originären GNU General Public Licence darstellen. Die Open Source Lizenz (FreeRTOS) erhält keine Garantien und keinen direkten Support. Entwickler, die diese freie Lizenz verwenden und Änderungen am RTOS Kernel vornehmen müssen den Quellcode ihrer Änderungen für die Community offenlegen. In der kommerziellen Lizenz (SafeRTOS) kann selbst entwickelter Code als closed source vertrieben werden. Ebenso unterstützt Real Time Engineers Ltd. bei der Entwicklung und bietet entsprechende Garantie für die Echtzeitfähigkeit von FreeRTOS. Real Time Engineers bietet zu FreeRTOS diverse Erweiterungen wie Treiber und Tools. Geführt werden diese Erweiterungen unter dem Namen FreeRTOS Ecosystem, dazu gehören unter anderem ein FAT Dateisystem, TCP/UDP Stacks, sowie TLS/SSL Implementierungen.

2.2 Entwicklungsumgebung

FreeRTOS ist im Prinzip nicht an eine spezielle Entwicklungsumgebung gebunden. Dies liegt vor allem daran, dass FreeRTOS in Form von C-Quellcodedateien zur Verfügung gestellt wird und wie eine Art Bibliothek in die zu entwickelnde Software integriert wird. Die verwendete Entwicklungsumgebung muss lediglich einen geeigneten Compiler für das Zielsystem zur Verfügung stellen. Vor dem Start eines Entwicklungsprojektes ist es dennoch ratsam sich einen Überblick über die verfügbaren IDEs² zu machen. Der wichtigste Punkt der hierbei zu berücksichtigen ist, ist das Debugging. Da ein Echtzeitbetriebssystem eine weitere Abstraktionsebene hinzufügt und wie eine Art Middleware fungiert, lassen sich viele RTOS spezifische Funktionen und Eigenschaften wie Queues, Task Stacks etc. nur mühsam mit einem Debugger wie GDB untersuchen. Viele der marktgängigen Entwicklungsumgebungen bieten daher spezielle RTOS-aware Pakete, so dass ein einfacherer Zugriff auf RTOS Objekte und Eigenschaften möglich ist. Wie die RTOS awareness beim Debug-

²Integrated Development Environment

ging eingesetzt wird und welche Funktionalitäten sie einem Entwickler bietet wird in Abschnitt 3.1 aufgezeigt. Ein weiterer Punkt der bei der Auswahl der IDE betrachtet werden muss sind die Kosten. Bei proprietären IDEs können oft mehrere tausend Euro Lizenzkosten anfallen. Diese bieten aber den Vorteil der nahtlosen Einbindungen von μ Prozessoren und Echtzeitbetriebssystemen (RTOS awarenness). Bei der Entwicklung von ARM μ Prozessoren sind hier Keil (ARM), IAR Workbench und True Studio (Atollic) zu nennen. Diese Entwicklungsumgebungen lassen sich zum Teil auch frei verwenden, allerdings mit starken Einschränkungen wie z.B. der maximalen Codegröße. Auf der nicht proprietären Seite steht Eclipse CDT. Es ist komplett frei in der Verwendung und hat keine Beschränkungen. Der Nachteil ist hier, dass die Integration nicht so einfach ist, wie bei den proprietären IDEs. RTOS awarenness wird bei Eclipse durch die Installation weiterer Plugins erreicht. Ein weiterer Nachteil sind die fehlenden Beispielprojekte für Eclipse CDT in der Kombination mit FreeRTOS. Daher müssen Projekte von Grund auf selbst konfiguriert und installiert werden. Da im Laufe dieser Arbeit Eclipse CDT für alle Beispiele verwendet wird, wird in Abschnitt 2.4 das Aufsetzen einer Basiskonfiguration erklärt.

2.3 Zielsysteme STM32F4 (ARM Cortex M3)

Der STM32F4 ist ein von STMicroelectronics entwickelter 32 Bit uController basierend auf einem ARM Cortex M4 Kern. Der STM32F4 läuft auf maximal 168 Mhz. Neben seinen unzähligen Schnittstellen (4x UART, SPI, I2C, Ethernet) bietet der STM32F4 mehrere Energiespar-Modis, die ihn für den Einsatz in energieeffiziente Anwendung wie IOT Devices interessant machen. Für die Verwendung von FreeRTOS eignet sich der uController besonders gut, da speziell für diesen uController viele Hardware-Funktionalitäten in den FreeRTOS Kernel integriert wurden. Der STM32F4 ist seit 2012 auf dem Markt und erfährt durch eine große Anzahl an online Beispielen eine hohe Beliebtheit in der Entwickler Community. Zum Zugriff auf uController Funktionen stellt STM das Hardware Abstraction Layer kurz HAL zur Verfügung, siehe Abbildung 2. Die HAL ermöglicht eine einfache Verwendung der Hardware ohne großen Konfigurationsaufwand. Wie spezielle

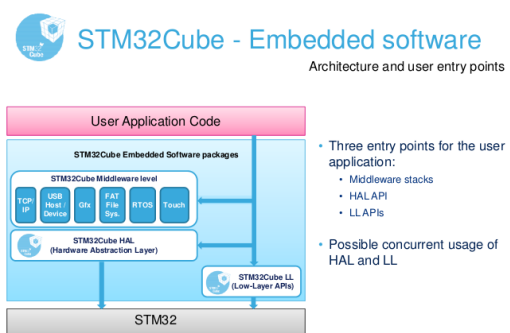


Abbildung 2. Aufbau der zur Verfügung stehenden STM Bibliotheken

Hardware-Funktionen des STM32F4 durch FreeRTOS genutzt werden können, wird in Abschnitt 2.9 und Abschnitt 2.5.2 gezeigt.

2.4 Einrichten und Konfiguration

WIP: Eclipse CDT, RTOS AwareNess, Debugger, File-Structure

Beispiel	Echtzeit Typ	Auswirkung
Tastatur Controller	Soft Realtime	kurzfristig verzögerte Ausgabe
Echtzeit Media Streaming	Soft Realtime	Bild und Ton kurzfristig asynchron
Computer Numerical Control (CNC)	Hard Realtime	Fehler bei der Fertigung des Teils
Airbag System	Hard Realtime	möglicher Personenschaden

Tabelle 1. Beispiele von Echtzeitsystemen und deren Auswirkung beim über- oder unterschreiten der Anforderungsgrenzen

- <https://eclipse.org/cdt/>
- <https://launchpad.net/gcc-arm-embedded>
- <http://gnuarmclipse.github.io/plugins/download/>
- <http://gnuarmclipse.github.io/windows-build-tools/>
- <http://gnuarmclipse.github.io/debug/jlink/>
- <http://gnuarmclipse.github.io/debug/openocd/>
- <http://freescale.com/lgfiles/updates/Eclipse/KDS>
- Thread Aware
- Beispiel Projekt
- STM32 Cube MX
- FreeRTOS.org

2.5 Memory Allocation

Beim Erzeugen von RTOS Objekten wie Tasks, Queues oder Semaphore wird Speicher im RAM benötigt. Für die dynamische Speicherverwaltung wird in C und C++ gewöhnlich die Standard C Funktionen malloc() und free() verwendet. Die Funktion malloc() dient zur Allokierung von freiem Speicher und free() zur Freigabe von allokiertem Speicher. Für Echtzeitsysteme die auf einem RTOS aufsetzen, sind diese Funktionen aufgrund der folgende Eigenschaften[2] ungeeignet³:

- nicht thread safe
- nicht deterministisch
- tendieren zur Fragmentierung des RAM
- schwer zu debuggen
- Bibliotheksfunktionen benötigen viel Speicher

Des Weiteren sind für einige Einsatzgebiete von embedded Anwendungen Zertifikate erforderlich. Speziell in sicherheitskritischen Anwendungen (Medical, Military) ist die dynamische Speicherverwaltung als eine potentielle Fehlerquelle auszuschließen. Für einen solchen Fall bietet FreeRTOS ab Version 9.0 die Möglichkeit der statischen Speicherallokierung, diese werden wir am Ende dieses Abschnitts betrachten. In FreeRTOS werden malloc() und free() durch die Funktionen

```
void *pvPortMalloc( size_t xSize );
```

und

```
void vPortFree( void *pv );
```

ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass die Implementierung dieser Funktionen an die jeweilige Anwendung angepasst werden kann. FreeRTOS stellt dem Entwickler fünf unterschiedliche Implementierungen von Speicheralgorithmen (Heap_1.c bis Heap_5.c) zur Verfügung, siehe Abbildung

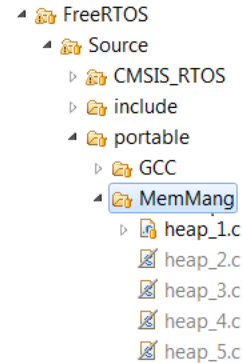


Abbildung 3. Einbindung des Speicheralgorithmus Heap1 in Eclipse CDT. Die Algorithmen Heap2 bis Heap5 sind vom Build ausgeschlossen

3. Diese stellen prinzipiell schon die geläufigsten Implementierungen zur Speicherverwaltung. Es bleibt aber auch weiterhin die Möglichkeit eine eigene Speicherverwaltung zu implementieren. In dieser Arbeit werden wir Heap1 etwas genauer betrachten um ein grundsätzliches Verständnis für die FreeRTOS Speicherverwaltung zu bekommen. Heap2 - Heap 5 werden nur kurz beschrieben und können im Detail in [2] und [1] nachgelesen werden. Wie schon am Anfang dieses Abschnitts beschrieben, werden für alle RTOS Objekte Speicher benötigt. Der Speicher für Objekte wie Semaphore und Tasks wird automatisch in den statischen Erzeugerfunktionen der RTOS API alloziert, in dem intern die Funktion `pvPortMalloc()` aufgerufen wird. Die Erzeugerfunktion `xTaskCreate()` beispielsweise, erzeugt eine FreeRTOS Task. Listing 3 zeigt wie `xTaskCreate()` die Funktion `pvPortMalloc()` verwendet um Speicher für den Stack und den Task Control Block zu allozieren. Alle Objekte die mittels `pvPortMalloc()` alloziert werden, darunter auch der Kernel selbst, teilen sich einen gemeinsamen Adressraum, siehe Abbildung 4. Durch den gemeinsamen Adressraum ist es möglich aus einer Task, auf die Variablen einer anderen Task zuzugreifen. Eine ungewollter Speicherzugriff ist somit durchaus möglich. In Abschnitt 2.5.2 wird gezeigt welche Möglichkeit der STM32F4 und FreeRTOS bieten um Speicherzugriffe sicherer zu gestalten.

2.5.1 FreeRTOS Algorithmen zur Speicherverwaltung

Bevor Objekte erzeugt werden können, muss ein Pool an Speicher für die Objekte definiert werden. Die einfachste Form einen Memory Pool zu erzeugen ist ein Array. In FreeRTOS nennt sich dieses Array `ucHeap`. Die Größe des Heaps wird durch das Präprozessor-Define `configTOTAL_HEAP_SIZE` (FreeRTOS_config.h) konfiguriert. Die Gesamtgröße berechnet sich wie folgt:

³Heap3 stellt hier eine Ausnahme dar

```

1 /**MALLOC**
2 void *pvPortMalloc( size_t xWantedSize )
3 {
4 void *pvReturn = NULL;
5 static uint8_t *pucAlignedHeap = NULL;
6 /* Ensure that blocks are always aligned to
   the required number of bytes. */
7 #if( portBYTE_ALIGNMENT != 1 ) {
8 if( xWantedSize & portBYTE_ALIGNMENT_MASK ) {
9 /* Byte alignment required. */
10 xWantedSize += ( portBYTE_ALIGNMENT - (
    xWantedSize & portBYTE_ALIGNMENT_MASK ) );
11 }
12 }
13 #endif
14 vTaskSuspendAll();
15 if( pucAlignedHeap == NULL ) {
16 /* Ensure the heap starts on a correctly
    aligned boundary. */
17 pucAlignedHeap = ( uint8_t * ) ( ( (
    portPOINTER_SIZE_TYPE ) &ucHeap[
    portBYTE_ALIGNMENT ] ) & ( ~( (
    portPOINTER_SIZE_TYPE )
    portBYTE_ALIGNMENT_MASK ) ) );
18 }
19 /* Check there is enough room left for the
    allocation. */
20 if( ( ( xNextFreeByte + xWantedSize ) <
    configADJUSTED_HEAP_SIZE ) &&
    ( ( xNextFreeByte + xWantedSize ) >
    xNextFreeByte ) ) {
21 /* Return the next free byte then increment
    the index past this
    block. */
22 pvReturn = pucAlignedHeap + xNextFreeByte;
23 xNextFreeByte += xWantedSize;
24 }
25 xTaskResumeAll();
26 return pvReturn;
27 }

```

Listing 1. FreeRTOS Source von pvPortMalloc() aus Heap1.c. Zuerst wird sichergestellt, dass die Startspeicheradresse dem byte-Alignment des uProzessors entspricht. Der STM32F4 ist ein 32Bit uProzessor und hat ein byte-Alignment von 4, so dass die Startadresse immer eine Potenz von 4 sein muss. Danach wird der Scheduler deaktiviert und geprüft, ob genug Speicher zur Verfügung steht. Abschließend wird der Speicher im ucHeap reserviert.

MaxHeapSize = configTOTAL_HEAP_SIZE * Wortbreite⁴

Die Speicherverwaltung durch Heap1 ist sehr einfach. Heap1 deklariert lediglich die Funktion pvPortMalloc(). Die Funktion pvPortFree() wird nicht ausimplementiert. Abbildung 5 zeigt, wie sich der Speicher nach dem Erzeugen von zwei Tasks aussieht. Für jede Task wird ein TCB und ein Stack erzeugt, die Speicherobjekte liegen direkt hintereinander, da pvPortFree() nicht implementiert ist, kommt es auch nicht zu einer Fragmentierung des Speichers. Diese lineare Speicherzuweisung gilt für alle Objekte, die mittels pvPortMalloc() alloziert werden, dazu gehören sowohl RTOS spezifische Objekte, als auch Objekte, die durch den Entwickler erzeugt werden. Ein so einfacher Speicheralgorithmus wie Heap1 hat durchaus seine Berechtigung. Bei vielen embedded Anwendungen wird der Speicher für die benötigten Objekte vor dem Start des Schedulers erzeugt. Eine spätere Freigabe von belegten Ressourcen ist nicht nötig, da die Objekte über die gesamte Laufzeit des Programms bestehen sollen. Genau für solche Anwendungen steht Heap1 zur Verfügung. Nachfolgend ein Kurzüberblick

⁴Beim STM32F4 ist die Wortbreite 32 bit

```

1 /**FREE**
2 void vPortFree( void *pv )
3 {
4 /* Memory cannot be freed using this scheme.
   */
5 ( void ) pv;
6 /* Force an assert as it is invalid to call
   this function. */
7 configASSERT( pv == NULL );
8 }

```

Listing 2. FreeRTOS Source von vPortFree() aus Heap1.c. Da eine Speicherfreigabe in Heap1 nicht vorgesehen ist, ist diese Funktion leer.

```

1 StackType_t *pxStack;
2 /* Allocate space for the stack
   used by the task being created. */
3 pxStack =
4 ( StackType_t * ) pvPortMalloc( ( ( size_t )
    usStackDepth )
5 * sizeof( StackType_t ) );
6 if( pxStack != NULL )
7 {
8 /* Allocate space for the TCB. */
9 pxNewTCB = ( TCB_t * ) pvPortMalloc( sizeof(
    TCB_t ) );
10 if( pxNewTCB != NULL )
11 {
12 /* Store the stack location in the TCB. */
13 pxNewTCB->pxStack = pxStack;
14 }
15 // ...
16 }

```

Listing 3. FreeRTOS Source von xTaskCreate() aus Task.c. Jede Task besitzt einen Stack und einen Task Control Block, beide werden beim Aufruf von xTaskCreate (Zeile 5 und Zeile 11) erstellt.

über die nicht beschriebenen Speicheralgorithmen.

- Heap2 - Ähnlich Heap1. Erlaubt allerdings Speicherfreigabe durch vPortFree(). Best Fit Algorithmus zur Speicherallozierung.
- Heap3 - Verwendet C Library Malloc() und free() und deaktiviert den Scheduler zur Speicherallozierung.
- Heap4 - Ähnlich Heap1 und Heap2. Verwendet First Fit Algorithmus zur Speicherallozierung. Verbindet mehrere kleinere Speicherblöcke zu einem Großen. Minimiert Speicherfragmentierung.
- Heap5 - Gleicher Algorithmus wie Heap4 allerdings können mehrere Memory Pools erzeugt werden.

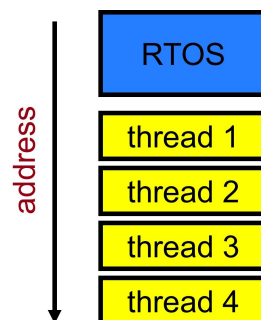


Abbildung 4. Task und Kernel teilen sich in FreeRTOS einen gemeinsamen Adressraum. Dies stellt eine potentielle Fehlerquelle dar. Bild-Quelle [5]

The diagram illustrates the memory layout for three processes, A, B, and C, and a shared Free space area. The vertical axis is labeled `configTOTAL_HEAP_SIZE`. Process A has a large empty block. Process B has a blue `TCB` block at the bottom and a blue `Stack` block above it. Process C has a blue `TCB` block at the bottom, followed by a blue `Stack` block, a green `TCB` block, a green `Stack` block, an orange `TCB` block, and an orange `Stack` block at the top. The Free space area is indicated by a bracket on the right side of the diagram, spanning the height of the TCB and Stack blocks of processes B and C.

2.5.2 Memory Protection

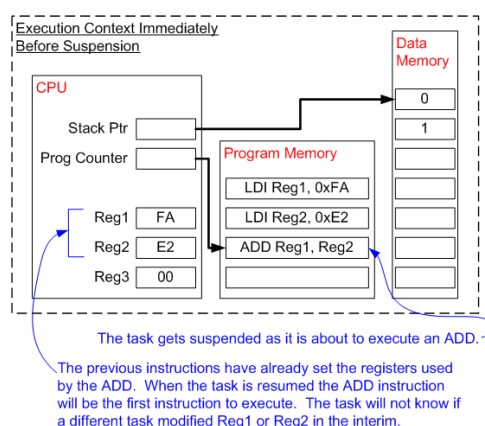
- User Mode
- Privileged Mode

2.5.3 Static Memory Allocation

The diagram illustrates the memory layout and MMU mapping. A vertical stack of memory blocks is shown, labeled from top to bottom: RTOS (blue), thread 1 (yellow), thread 2 (yellow), thread 3 (yellow), and thread 4 (yellow). A vertical arrow on the left points downwards and is labeled "address". Red boxes highlight the RTOS block and the thread 2 block. Red lines connect these two blocks to a yellow box labeled "MMU" on the right, indicating that the MMU manages the mapping for these memory regions.

Nachteil ist, dass mehr RAM verwendet wird als bei den meisten Heap Implementierungen. Heap1 stellt eine geeignete Alternative in der dynamischen Speicherverwaltung, da es die Risiken der dynamischen Speicherverwaltung auf ein Minimum reduziert.

Der Scheduler ist die Kernkomponente jedes Echtzeitbetriebssystem Kernels, da er eine quasi parallele Ausführung von Tasks ermöglicht. Eine Task stellt dabei ein eigenständige lauffähige Programmeinheit dar und wird gewöhnlich in einer Schleife ausgeführt. Abhängig vom aktuellen Zustand der Tasks und dem gewählten Schedulingalgorithmus, wählt der Scheduler die nächste Task, die ausgeführt werden soll. Auf einem uProzessor mit einem Kern kann dabei immer nur eine Task zur Zeit ausgeführt werden. Der Vorgang des Task-Wechsels durch den Scheduler wird Kontextwechsel oder Contextswitch genannt. Der Kontextwechsel ist für eine Task die verdrängt wird nicht erkennbar. Die Task wird bei ihrer aktuell ausgeführten Instruktion unterbrochen und alle nötigen Register und Stack werden durch den Scheduler gesichert. Abbildung 7 zeigt wie eine Task während ihrer Ausführung unterbrochen wird. Nachdem der Scheduler die verdrängte Task wieder zur Ausführung ausgewählt hat, werden alle Register und der Stack wieder hergestellt. Die Task wird danach ab der letzten Instruktion fortgeführt. Folgende Zustände kann eine



FreeRTOS Task annehmen:

- Running
- Blocked
- Ready
- Suspended

Alle Tasks im Ready Zustand sind bereit und warten auf ihre Ausführung durch den Scheduler. Tasks die sich im Blocked Zustand befinden sind nicht bereit und warten auf ein Synchronisations- oder ein Timer Event. Eine Task die `vTaskSuspend()` aufruft, wird vom Scheduling Vorgang ausgeschlossen und nimmt den Zustand Suspended an. Abbildung 8 zeigt das Zustandsdiagramm einer FreeRTOS Task. Welche Task als nächstes vom Zustand Ready in

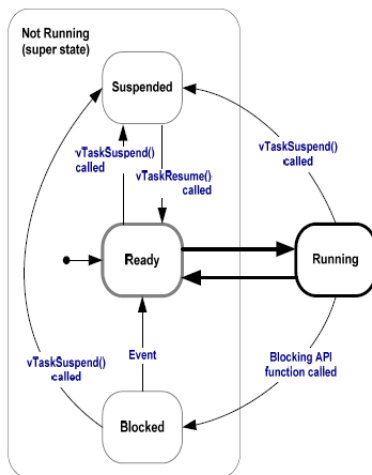


Abbildung 8. Übersicht aller Task Zustandstransitionen in FreeRTOS. Der Zustandswechsel findet entweder durch den Aufruf einer FreeRTOS API Funktion statt oder aber durch Event z.B. Interrupts, Timer-Events. Der Wechsel in den Zustand Running wird durch den Scheduler bestimmt und ist durch den Schedulingalgorithmus definiert. Bild-Quelle [2]

den Zustand Running wechselt, wird durch den Scheduler bestimmt. Der Schedulingalgorithmus des Schedulers gibt dabei vor wie diese nächste Task bestimmt wird. Der Scheduling Algorithmus des FreeRTOS Schedulers bietet unterschiedliche Konfigurationsmöglichkeiten auf die wir im Laufe dieses Abschnittes genauer eingehen werden. Das Scheduling des FreeRTOS Kernels basiert grundsätzlich auf dem Round Robin Algorithmus[4]. Dabei werden alle lauffähigen Tasks (Ready) gleicher Priorität in einer Liste verwaltet. Jede Task in der Liste erhält ein gewisses Zeitquantum⁵, welches bestimmt wie lange einer Task der Prozessor zugeteilt wird. Nach Ablauf des Zeitquantums wird ein Kontextwechsel durchgeführt und die nächste Task in der Liste erhält Prozessorzeit. Die ausgelaufene Task wird durch den Scheduler automatisch hinten an die Liste angefügt. Jede Task in FreeRTOS wird eine gewisse Priorität zugewiesen, daher wird auch für jede Priorität eine eigene Round Robin-Liste geführt. Dieses Verfahren wird auch Priority Scheduling [4] genannt. Abbildung 9 veranschaulicht das Ganze. In Listing 4 wird gezeigt wie das Priority Scheduling im FreeRTOS Source Code umgesetzt wurde. Eine Besonderheit ist die Idle Task, diese wird automatisch beim Starten des Schedulers erzeugt. Die Idle

⁵Round Robin definiert nicht die Länge des Zeitquantums

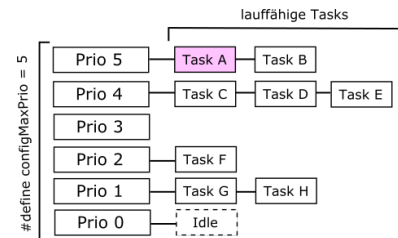


Abbildung 9. Aufbau der Prioritätenliste nach Round Robin in FreeRTOS. Alle aufgeführten Task sind bereit zur Ausführung. Task A wird aktuell durch den Scheduler ausgeführt. Nach dem Ablauf des Zeitquantums, wird A hinter B einsortiert. Die Maximale Priorität wird durch `configMaxPrio` bestimmt. Die Idle Task wird automatisch durch den Kernel erzeugt und hat immer die niedrigste Priorität.

```
1 #define taskSELECT_HIGHEST_PRIORITY_TASK() {
2   UBaseType_t uxTopPriority = uxTopReadyPriority
3   ;
4   /* Find the highest priority queue that
5    * contains ready tasks. */
6   while( listLIST_IS_EMPTY( &(pxReadyTasksLists[
7     uxTopPriority] ) ) ) {
8     configASSERT( uxTopPriority );
9     --uxTopPriority;
10  }
11  /* listGET_OWNER_OF_NEXT_ENTRY indexes
12   * through the list, so the tasks of
13   * the same priority get an equal share of the
14   * processor time. */
15  listGET_OWNER_OF_NEXT_ENTRY( pxCurrentTCB, &(
16    pxReadyTasksLists[ uxTopPriority ] ) );
17  uxTopReadyPriority = uxTopPriority;
18 } /* taskSELECT_HIGHEST_PRIORITY_TASK */
```

Listing 4. FreeRTOS Source zur Priority Task Selection aus Task.c. Alle lauffähigen Task werden in einem Array verwaltet `pxReadyTaskLists`. Die Listen verwalten sich durch Referenz-Pointer in den TCBs der einzelnen Tasks

Task hat die niedrigste Priorität und wird immer dann ausgeführt, wenn sich keine User-Task im Ready oder Running Zustand befindet. Die Idle Task ist ein Indikator für überschüssige Prozessorzeit. Mittels der Idle-Hook Funktion kann der Idle Task Funktionalität durch den Entwickler hinzugefügt werden. Wie die Idle Task zum Energiesparen genutzt werden kann, wird in Abschnitt 2.9 gezeigt. Wie bereits weiter oben beschrieben, lässt sich der Scheduling Algorithmus in verschiedenen Modis ausführen. Der Scheduler kann entweder im Cooperative Modus oder im Preemption Modus ausgeführt werden. Welcher Modus vom Scheduler verwendet wird, wird durch das `define configUSE_PREEMPTION` in der FreeRTOS config bestimmt. Im Preemptive Modus wird eine aktive Task mit niedriger Priorität sofort von einer Task mit höherer Priorität verdrängt und ein Kontextwechsel wird durchgeführt. Im kooperativen Modus hingegen wird ein Kontextwechsel erst durchgeführt, wenn eine Task den Prozessor explizit durch die Funktion `xTaskYield()` abgibt. Abbildung 10 zeigt den Vergleich beider Modis durch einen beispielhaften Ablauf. Eine weitere Option die sich über das `define configUSE_TIME_SLICING` aktivieren lässt ist das sogenannte Zeitschlitzverfahren. Durch das Zeitschlitzverfahren wird die zugeteilte Prozessorzeit für Task gleicher Priorität gleichmäßig aufgeteilt. Dies geschieht durch Einführung eines festen Tick-Interrupt Intervalls. Bei jedem Tick-Interrupt wird der FreeRTOS `SysTickHandler` aufgerufen. Listing 5 zeigt die Implementierung des FreeRTOS `SysTicks`. Der `SysTickHandler` ist Bestandteil des Schedu-

lers und überprüft bei jeder Ausführung, ob sich eine Task gleicher Priorität im Ready Zustand befindet. Sollte es eine solche Task geben wird ein Kontextwechsel durchgeführt und die Task erhält den Prozessor zugeteilt. Des Weiteren kümmert sich der SysTickHandler um die Verwaltung des TickCount, welcher als Referenz für alle RTOS Timingfunktionen dient. Abbildung 11 zeigt diesen Vorgang nochmal im zeitlichen Verlauf. Die häufigst verwendete Scheduling Algorithmus nennt sich Prioritized Pre-emptive Scheduling with Time Slicing.

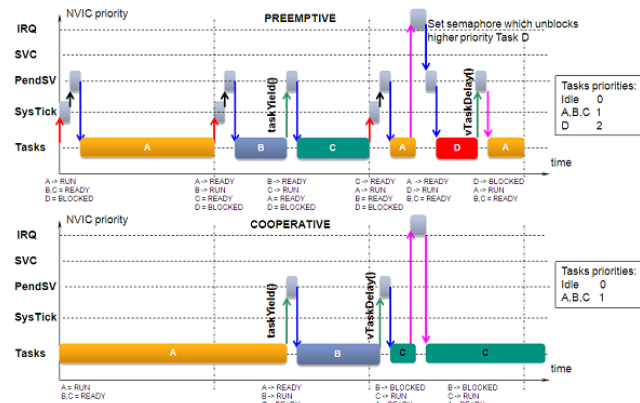


Abbildung 10. Im Co-operative Modus wird der Prozessor von einer Task erst abgegeben, wenn diese explizit taskYield() aufruft. Selbst wenn eine Task mit höherer Priorität in den Ready Zustand wechselt, läuft die Task mit niedrigerer Priorität weiter. Im Gegensatz dazu steht das Pre-Emptive Scheduling (hier mit Time-Slicing), es unterbricht die laufende Task mit niedriger Priorität sofort, sobald eine Task mit höherer Priorität Ready ist. Bild-Quelle [2]

```
1 void xPortSysTickHandler( void ){
2  /* The SysTick runs at the lowest interrupt
3   priority, so when this interrupt
4   executes all interrupts must be unmasked.
5   There is therefore no need to
6   save and then restore the interrupt mask value
7   as its value is already
8   known. */
9   portDISABLE_INTERRUPTS();
10  {
11   /* Increment the RTOS tick. */
12   if( xTaskIncrementTick() != pdFALSE )
13   {
14    /* A context switch is required. Context
15     switching is performed in
16     the PendSV interrupt. Pend the PendSV
17     interrupt. */
18    portNVIC_INT_CTRL_REG =
19     portNVIC_PENDSVSET_BIT;
20  }
21  }
22  portENABLE_INTERRUPTS();
23 }
```

Listing 5. FreeRTOS Source des SysTickHandlers aus Task.c. Der SysTickHandler verwaltet den TickCount. Der TickCount dient allen Timingfunktionen des RTOS Kernels als Zeitreferenz. Des Weiteren wird bei aktivem Time Slicing überprüft ob ein Kontextwechsel nötig ist. Der Kontext wechsel wird dann ggf. durch den PendSVHandler durchgeführt.

Listing 6 zeigt ein minimal Beispiel einer Task und den Start des Schedulers durch vTaskStartScheduler() in der main function.

2.7 Intertask Kommunikation

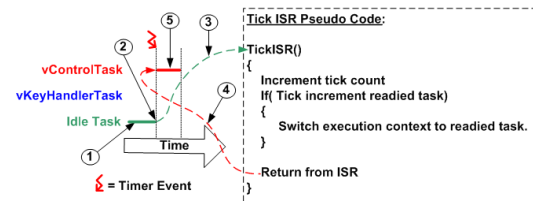


Abbildung 11. Beispielhafter Ablauf eines SysTickInterrupts. (1) keine User Task ist ready, die Idle Task ist aktiv. (2) SysTickInterrupt. (3) SysTickHandler wird aufgerufen. (4) vControlTask ist ready und ein Kontextwechsel wird durchgeführt. vControlTask hat hier die gleiche Priorität wie die IdleTask. (5) vControlTask wird ausgeführt. Bild-Quelle [2]

```
1 void main( void )
2 {
3  //Task werden oft vor dem Start des Schedulers
4  erzeugt.
5  xTaskCreate( vTaskCode,
6              "NAME",
7              STACK_SIZE,
8              NULL,
9              tskIDLE_PRIORITY,
10             NULL );
11  // Scheduler wird gestartet
12  vTaskStartScheduler();
13  // Hier sollten wir nicht hinkommen, da der
14  Scheduler laeuft.
15 }
16 void vTaskCode( void * pvParameters )
17 {
18   for( ;; ){
19    /* Task code wird hier Implementiert
20     z.B. warten auf eine Nachricht*/
21   }
22   /* Hier sollten wir nicht hinkommen*/
23   vTaskDelete( NULL );
24 }
```

Listing 6. Minimal Beispiel für die Definition eine Task.

Queues, Semaphore, Notify, Event Groups

2.8 Interrupt Handling

Daemon Task,

2.9 Low Power Modes auf Stm32F4

Echtzeitbetriebssysteme kommen immer häufiger in akkubetriebenen embedded Systemen zum Einsatz. Solche Systeme verlangen eine effiziente Nutzung der Energieresourcen um einen möglichst langen Betrieb zu gewährleisten. Bezogen auf den uProzessor gibt es im Prinzip zwei Wege Energie einzusparen:

- Heruntertakten des uProzessors.
- Das System schlafenlegen, wenn keine weiteren Aufgaben anstehen.

Das Heruntertakten des uProzessors ist unabhängig vom Einsatz eines RTOS, daher werden wir hier nur den zweiten Punkt genauer betrachten, das Schlafenlegen des uProzessors. Abbildung 12 zeigt wie sich die Stromaufnahme beim STM32F4 von 40mA im Normalbetrieb(@168 MHz) auf 2,2µA im Tiefschlafmodus reduzieren lässt. In einfachen Anwendung ist der Zustand in dem ein Gerät schlafen gehen kann, relativ leicht zu ermitteln. In komplexen Systemen die auf einem Echtzeitbetriebssystem wie FreeRTOS aufsetzen und mehrere Task möglicherweise

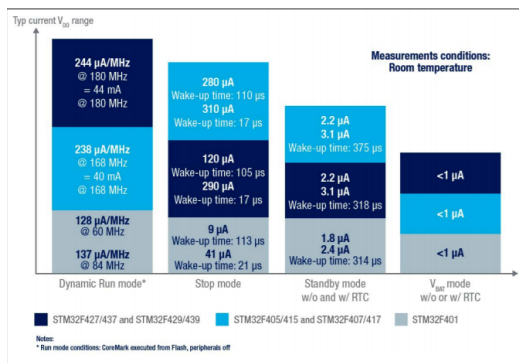


Abbildung 12. Energieaufnahme für STM32F4 in SleepModes
Quelle: STM32F4 - Power Modes

auf unterschiedliche Ressourcen warten, wird es schon schwierig. In diesem Abschnitt wird gezeigt welche Funktionen FreeRTOS zur Verfügung stellt, um einen energieeffizienten Betrieb zu gewährleisten. Eine Möglichkeit ist die Idle - Hook Funktion. Wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben, wird die IDLE Task von FreeRTOS aktiviert, sobald sich alle User-Tasks im Blocked Zustand befinden. Durch konfigurieren des Präprozessor-Defines

```
#define configUSE_IDLE_HOOK 1;
```

```
1 static portTASK_FUNCTION( prvIdleTask,
2   pvParameters )
3 {
4   /* Stop warnings. */
5   ( void ) pvParameters;
6   /** THIS IS THE RTOS IDLE TASK – WHICH IS
7     CREATED AUTOMATICALLY WHEN THE
8     SCHEDULER IS STARTED. **/
9   for( ;; ) {
10    //skipped some code
11    if ( configUSE_IDLE_HOOK == 1 )
12    {
13     extern void vApplicationIdleHook( void );
14     /* Call the user defined function from within
15        the idle task. This
16        allows the application designer to add
17        background functionality
18        without the overhead of a separate task.
19        NOTE: vApplicationIdleHook() MUST NOT, UNDER
20        ANY CIRCUMSTANCES,
21        CALL A FUNCTION THAT MIGHT BLOCK. */
22    vApplicationIdleHook();
23    }
24    //guess what.. skipped more code
25  }
```

Listing 7. Aufruf der IdleTask Hook Funktion durch die FreeRTOS Idle Task. Aus Task.c

kann die Idle-Hook Funktion aktiviert werden. Diese wird immer aufgerufen, sobald die Idle Task in den Zustand Running wechselt. Die Funktionalität der Idle-Hook Funktion kann frei vom Entwickler implementiert werden. Listing 8 zeigt Pseudocode zu einer beispielhaften Implementierung der Idle Hook Funktion. Bevor das System schlafen gelegt werden kann müssen alle GPIOs und IRQs konfiguriert werden, so dass das System nicht unnötiger Weise aufwacht. Des Weiteren werden alle nicht benötigten GPIOs auf Analog gestellt um Energie zu sparen. Als einzige Interrupt-Quelle wird hier eine externe RTC konfiguriert. Mit dem Aufruf von HAL_PWR_EnterSTOPMode() wird der uProzessor in den Schlafmodus versetzt. Die Funkti-

```
1 extern "C" void vApplicationIdleHook( void ){
2   /* SysTick Interrupt deaktivieren */
3   SysTick->CTRL &= ~SysTick_CTRL_TICKINT_Msk;
4   //RTC konfigurieren
5   setRTCWakeupTime();
6   //externen Interrupt durch RTC aktivieren
7   enableRTCInterrupt();
8   //deaktiviere alle anderen Interrupt Quellen
9   deactivateExternalDevices();
10  setAllGPIOsToAnalog();
11  disableGPIOClocks();
12  //MCU stoppen und schlafen ZzzZzz
13  HAL_PWR_EnterSTOPMode(PWR_LOWPOWERREGULATOR_ON,
14    PWR_STOPENTRY_WFI);
15  //Aufgewacht... the show must go on
16  //aktiviere SysTick
17  SysTick->CTRL |= SysTick_CTRL_TICKINT_Msk;
18  //reaktiviere GPIO Clocks
19  enableGPIOClocks();
20  //reaktiviere Externe Interrupt Quellen
21  enableExternalInterrupts();
22 }
```

Listing 8. Pseudocode für eine Idle Hook Funktion

on wird erst wieder verlassen sobald der externe Interrupt der RTC ausgelöst wurde. Danach werden alle GPIOs rekonfiguriert. Ein weiterer Schritt der noch unternommen werden muss, ist das informieren einer User-Task z.B. mittels Notify oder Message, so dass das System nicht beim nächsten Tick Interrupt wieder die Idle Task aktiviert. Nachteil dieser Variante ist, dass die Nutzung von Software Timer nicht mehr möglich ist. Der FreeRTOS Kernel würde die Idle Hook Funktion auch aufrufen und sich schlafen legen, wenn noch Software Timer aktiv sind. Die Nutzung von absoluten Zeiten ist ebenfalls nicht mehr möglich, da nach der Deaktivierung des Tick Interrupts der Tickcount nicht mehr korrekt ist. Abhilfe schafft hier eine weitere Funktionalität die FreeRTOS zur Verfügung stellt, den sogenannten Tickless Idle Mode. Tickless idle kann durch das folgende Define in der FreeRTOSconfig.h aktiviert werden.

```
#define configUSE_TICKLESS_IDLE 1;
```

Im Gegensatz zur gewöhnlichen Idle Hook Funktion berücksichtigt der Tickless Idle Mode alle ausstehenden Timerfunktionen, dazu gehören alle Software Timer aber auch Tasks die nur für eine gewisse Zeit blockiert sind z.B. durch die Funktion xTaskWaitUntil(). Des Weiteren muss der Tickinterrupt nicht wie in Listing 8 explizit abgeschaltet werden, dies wird hier automatisch durch den Kernel gehandelt. Der Tickless Idle Mode bietet durch die Funktion vTaskStepTick() auch die Möglichkeit den TickCount nach dem Aufwachen anzupassen. Die verpassten TickCounts können beispielsweise durch einen externen Timer oder RTC bestimmt werden. So ist es auch möglich Software Timer für absolute Zeiten zu nutzen. Details und Beispiel Implementierungen hierzu findet man unter [1].

3. FREERTOS IN DER PRAXIS

3.1 Komplexität durch Nebenläufigkeit - Debugging von Echtzeitsystemen

Under Construction :D

Durch die Einsatz eines Echtzeitbetriebssystems erhält der Entwickler einige Vorteile die bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben wurden. Im Gegenzug entstehen aber durch die Nebenläufigkeit neue mögliche Fehlerquellen. Viele dieser Fehler, lassen sich nicht einfach analysieren und enden

beispielsweise im HardFault Handler. Welche Hilfsmittel einem Entwickler speziell bei FreeRTOS (auf STM32F4) zur Verfügung stehen und welche Fehler häufig auftreten ist der Inhalt dieses Abschnitts. Die Arten von Fehler die in einem Echtzeitsystem häufig auftreten lassen sich grob in zwei Kategorien aufteilen:

- Stackoverflow
- Synchronisationsfehler

Bekannte Probleme detailliert erklärt in [4]

- dining philosopherproblem
- reader and writers problem
- producer consumer problem (starvation)

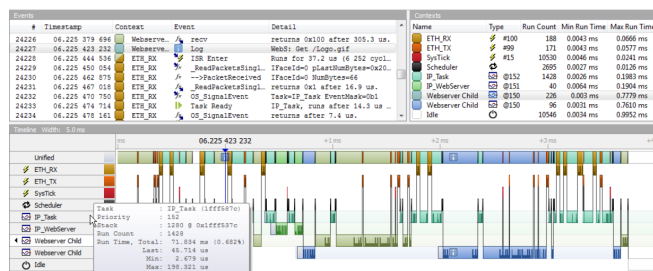


Abbildung 13. Segger Systemview - Not referenced yet

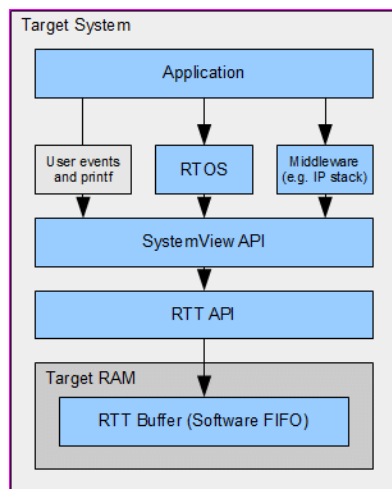


Abbildung 14. Segger Systemview Target - Not referenced yet

3.2 Echtzeitanalyse

$$\sum_{i=1}^m \frac{C_i}{P_i} \leq 1 \quad (1)$$

aus [4]

$$0 < i \leq D_i \left(\sum_{j=1}^{\min(i, n_{intr})} \frac{C_j + 2\Delta_{intr}}{t} \left\lceil \frac{t}{T_j} \right\rceil + \sum_{j=n_{intr}+1}^i \frac{C_j + 2\Delta_{thr}}{t} \left\lceil \frac{t}{T_j} \right\rceil \right) \leq 1 \quad (2)$$

aus [3]

4. ZUSAMMENFASSUNG

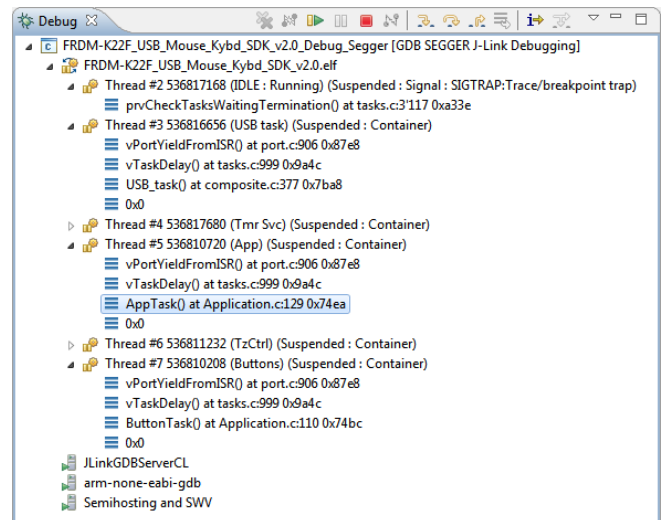


Abbildung 15. Segger Thread Awareness- Not referenced yet

Literatur

1. R. Barry. Freertos.org implementation - advanced.
2. R. Barry. *Mastering the FreeRtos Real time Kernel*. Real time Engineers Ltd., pre-release 161204 edition, 2016.
3. D. B. Stewart. Measuring execution time and real-time performance. In *Embedded System Conference*, 2006.
4. A. S. Tanenbaum. *Moderne Betriebssysteme*. Pearson Studium, 2002.
5. C. Walls. Rtos revealed. *Embedded.com*, 2016-2017.