

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 verlangen trotz ihrer Komplexität, dass Teile des Programmablauf in bestimmten zeitlichen Grenzen ausgeführt wird und somit vorhersehbar und deterministisch sind. Systeme die eine solche Anforderung unterliegen werden Echtzeitsysteme genannt. Echtzeitsysteme unterliegen einer weiteren Unterteilung in weiche Echtzeitsysteme (soft realtime systems) und harte Echtzeitsysteme (hard realtime systems). Ein weiches Echtzeitsystem soll eine Aufgabe in den vorgegeben zeitlichen Grenzen ausführen, ein überschreiten ist aber erlaubt und führt nicht unmittelbar zu einem Fehler. Ein hartes Echtzeitsystem hingegen muss die gestellte Aufgabe in den vorgegebenen Grenzen ausführen. Eine Überschreitung macht das System unbrauchbar. Einige Beispielsysteme und deren Echtzeitzuordnung wird in Tabelle 1 gezeigt. Um die grundsätzliche Funktionalität eines Echtzeitbetriebssystems zu erläutern, müssen zu erst die Grundmodelle für den Programmablauf eingebetteter Systeme beschrieben werden. 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 Ausführung der unterschiedlichen Programmsegmente ist nur durch einen RTOS-Kernel (Scheduler) zu erreichen. Ein RTOS Kernel abstrahiert Timing Informationen und kümmert sich darum, dass die nächste Task rechtzeitig ausgeführt wird. Der Entwickler ist dafür verantwortlich, dass die Task die gewünschte Aufgabe im zeitlichen Rahmen ausführt. Wie sichergestellt werden kann, dass eine Task harten oder weichen Echtzeitanforderungen entspricht wird

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

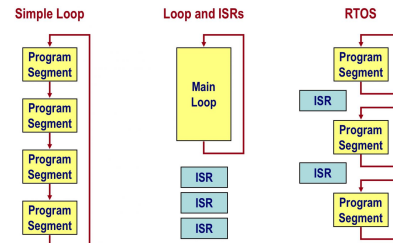


Abbildung 1. Übersicht Programmabläufe in embedded Anwendungen. Quelle [5]

Abschnitt 3.3 beschrieben. Für viele kleine Anwendungen kann die Nutzung einer einzigen Schleife durchaus sinnvoll sein, sollten beispielsweise die Ressourcen so knapp sein, dass ein Overhead an Funktionalität ausgeschlossen werden muss. Ein großer Nachteil der „einschleifen Variante“ ist die permanente Nutzung des Prozessors. Besonders bei akkubetriebenen Geräten wie IoT Devices oder Mobiltelefonen wird sehr genau auf die Energieaufnahme geachtet. Ein RTOS bietet hingegen Funktionen mit denen sehr leicht ermittelt werden kann, ob ein Gerät in einen Schlafmodus wechseln kann, dies wird in Abschnitt 2.9 an Beispielen 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 Anwendung in Task entstehen viele kleine Module, die jeweils eine kleine Teilaufgabe des Gesamtsystems übernehmen. 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. To be continued ... ;)

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 Ker-

Beispiel	Echtzeit Typ	Auswirkung
Tastatur Controller	Soft Realtime	kurzfristig verzögerte Ausgabe
Echtzeit Media Streaming	Soft Realtime	Bild und Ton kurzfristig asynchron
Controller CD Laufwerk	Hard Realtime	Fehler beim Lesen
Airbag System	Hard Realtime	möglicher Personenschaden

Tabelle 1. Beispiele Echtzeitsystem

nel 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. Bevor eine Entwicklung beginnt ist es dennoch ratsam sich einen Überblick über die verfügbaren IDEs² zu machen. Der wichtigste Punkt der hier zu nennen 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 Debugging eingesetzt wird und welche Funktionalitäten sie einem Entwickler bietet wird in Abschnitt 3.2 aufgezeigt. Ein weiterer Punkt der bei der Auswahl der IDE getroffen werden muss sind die Kosten. Bei Proprietäre IDEs können oft mehrere tausend Euro Lizenzkosten anfallen, bieten aber den Vorteil der nahtlosen Einbindungen von μ Prozessoren und Echtzeitbetriebssystem (RTOS awareness). Bei der Entwicklung von ARM uProzessoren 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. maximal Codesize. Auf der nicht proprietären Seiten steht Eclipse CDT zur Verfügung, es ist komplett frei in der Verwendung und hat keine Beschränkungen. Nachteil ist hier, dass die Integration nicht so einfach ist wie bei den proprietären IDEs. RTOS awareness wird bei Eclipse durch die Installation weiterer Plugins erreicht. Ein weiterer Nachteil ist, dass es keine Beispielprojekte für Eclipse CDT und FreeRTOS zur Verfügung stehen, 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)

32 bit Prozessor - Funktionsübersicht, Hinweis Port Teil von FreeRTOS

²Integrated Development Environment

2.4 Einrichten und Konfiguration

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

- <https://eclipse.org/cdt/>
- <https://launchpad.net/gcc-arm-embedded>
- <http://gnuarmecclipse.github.io/plugins/download/>
- <http://gnuarmecclipse.github.io/windows-build-tools/>
- <http://gnuarmecclipse.github.io/debug/jlink/>
- <http://gnuarmecclipse.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 Allokation 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 Speicherallokation, 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 );
```

³Heap3 stellt hier eine Ausnahme dar

ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass die Implementierung dieser Funktionen an die jeweilige Anwendung angepasst werden kann. Grundsätzlich bietet FreeRTOS fünf unterschiedliche Beispiel Implementierungen der Speicherverwaltung (Heap_1.c bis Heap_5.c), siehe Abbildung 2.

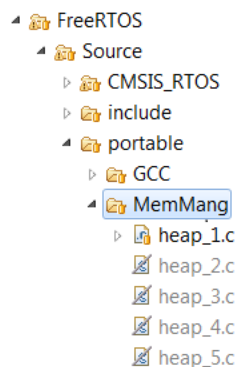


Abbildung 2. Einbindung von Heap1. Heap2 bis Heap5 sind vom Build ausgeschlossen

Diese stellen prinzipiell schon die geläufigsten Implementierungen zur Speicherverwaltung. Es bleibt aber auch weiterhin die Möglichkeit seine 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][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 Erzeugerfunktionen alloziert, in dem intern die Funktion *pvPortMalloc()* aufgerufen wird. Die Erzeugerfunktion *xTaskCreate()* beispielsweise, erzeugt eine FreeRTOS Task. Listing 2 zeigt wie *xTaskCreate()* die Funktion *pvPortMalloc()* verwendet (Zeile 5, 11) 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 3. Eine Speicherzugriffsverletzung ist somit durchaus möglich. In Abschnitt 2.5.2 wird gezeigt welche Möglichkeit der STM32F4 und FreeRTOS bieten um Speicherzugriffe sicherer zu gestalten.

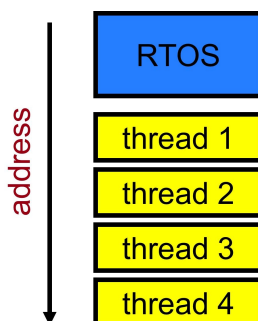


Abbildung 3. Adressraum FreeRTOS und Tasks. Quelle [5]

2.5.1 FreeRTOS Heap Implementierungen

Bevor Objekte erzeugt werden können, muss ein Pool an Speicher für die Objekte definiert werden. Die einfachs-

```
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 ) &&
21 ( ( xNextFreeByte + xWantedSize ) >
   xNextFreeByte ) ) {
22 /* Return the next free byte then increment
   the index past this
   block. */
23 pvReturn = pucAlignedHeap + xNextFreeByte;
24 xNextFreeByte += xWantedSize;
25 }
26 xTaskResumeAll();
27 return pvReturn;
28 }
29 }
30 /****FREE**
31 void vPortFree( void *pv )
32 {
33 /* Memory cannot be freed using this scheme.
   */
34 ( void ) pv;
35 /* Force an assert as it is invalid to call
   this function. */
36 configASSERT( pv == NULL );
37 }
38 }
```

Listing 1. Implementierung von malloc() und free() in Heap1

te 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* konfiguriert. Die Gesamtgröße berechnet sich wie folgt:

$$\text{MaxHeapSize} = \text{configTOTAL_HEAP_SIZE} * \text{Wortbreite}^4$$

Die Speicherverwaltung durch Heap1 ist sehr einfach. Heap1 deklariert lediglich die Funktion *pvPortMalloc()*. Die Funktion *pvPortFree()* wird nicht ausimplementiert. Abbildung 4 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 *pv-*

⁴Beim STM32F4 ist die Wortbreite 32 bit

```

1 StackType_t *pxStack;
2/* Allocate space for the stack
3used by the task being created. */
4pxStack =
5( StackType_t * ) pvPortMalloc(( ( ( size_t )
6    usStackDepth )
7* sizeof( StackType_t ) ) );
8
9if( pxStack != NULL )
10{
11/* Allocate space for the TCB. */
12pxNewTCB = ( TCB_t * ) pvPortMalloc( sizeof(
13    TCB_t ) );
14
15if( pxNewTCB != NULL )
16{
17/* Store the stack location in the TCB. */
18pxNewTCB->pxStack = pxStack;
19}
20}

```

Listing 2. xTaskCreate() memory allocation. Aus Task.c

```
static uint8_t ucHeap[ configTOTAL_HEAP_SIZE ];
```

PortMalloc() alloziert werden, dazu gehören sowohl RTOS spezifische Objekte als auch Objekte die durch den Benutzer erzeugt werden. Ein so einfacher Speicheralgorithmus

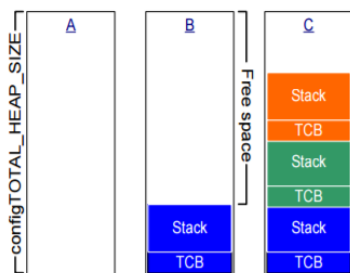


Abbildung 4. Beispiel Speicherbelegung nach drei Instanziierung von Tasks. Quelle [2]

mus 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 über die nicht beschriebenen Beispiel Implementierungen.

- 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.

2.5.2 Memory Protection

STM32F4 spezifisch, MPU vorhanden

2.5.3 Static Memory Allocation

Die statische Speicherverwaltung wird durch das Präprozessor-Define configSUPPORT_STATIC_ALLOCATION 1 in der FreeRTOS.config aktiviert. Für die statische Objekterzeugung können die dynamischen Erzeugerfunktionen nicht mehr verwendet werden, daher stehen spezielle Erzeugerfunktionen für die statische Speicherallozierung zur Verfügung, wie xTaskCreateStatic() statt xTaskCreate() oder xSemaphoreCreateBinaryStatic() statt xSemaphoreCreateBinary(). Der Vorteil der statischen Speicherverwaltung ist, dass der Belegte Speicher im RAM schon zur Übersetzungszeit bekannt ist und die potenzielle Fehlerquelle der dynamischen Speicherverwaltung vermieden wird. Nachteil ist, dass mehr RAM verwendet wird als bei den meisten Heap Implementierungen. Heap1 stellt eine geeignete Alternative in der dynamischen Speicherverwaltung.

2.6 Scheduling

Under Construction :D

Der Scheduler ist die Kernkomponente jedes Echtzeitbetriebssystem Kernels. Der FreeRTOS Scheduler ermöglicht eine quasi parallele Ausführung von Tasks. Auf einem uProzessor mit nur einem Kern kann immer nur eine Task zur Zeit ausgeführt werden. Welche Task als nächstes ausgeführt wird, wird durch den Schedulingalgorithmus bestimmt. Der Schedulingalgorithmus des FreeRTOS Kernels basiert auf Round Robin[4]. Alle Tasks gleicher Priorität werden in einer Liste verwaltet. Jede Task erhält ein gewisses Zeitquantum, nach Ablauf des Zeitquantum wird ein Kontextwechsel durchgeführt und die nächste Task in der Liste erhält Prozessorzeit. Die ausgelaufene Task wird hinten an die Liste angefügt.

Da in FreeRTOS jeder Task eine gewisse Priorität zugewiesen wird, gibt es auch für jede Priorität genau eine Liste, welche alle Task dieser Priorität verwaltet. Der FreeRTOS Scheduling Algorithmus kann durch Konfigurations Präprozessor-defines angepasst werden. Der Scheduler kann entweder im Cooperative Modus oder im Preemption modus ausgeführt werden. Die Konfiguration wird durch das define configUSE_PREEMPTION geändert. 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 Taskwechsel erst durchgeführt, wenn eine Task den Prozessor explizit abgibt z.B. durch TaskYield(). Abbildung ?? zeigt den Vergleich beider Mo-

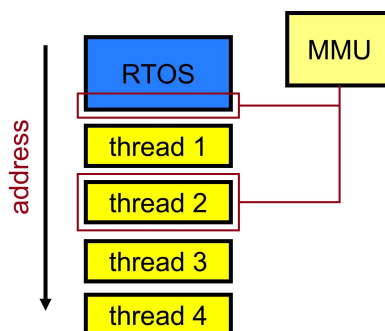


Abbildung 5. Adressraum FreeRTOS und Tasks mit Memory Protection. Quelle [5]

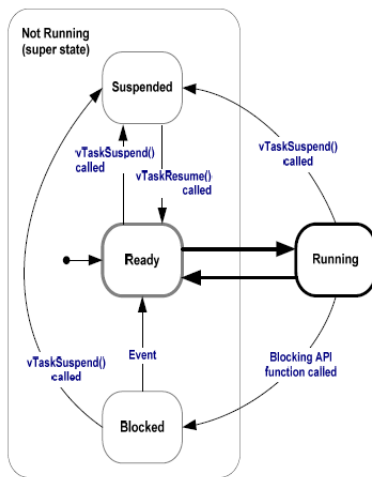


Abbildung 6. Task States. Quelle [2] - Not referenced yet

dis durch einen beispielhaften Ablauf. Eine weitere Option die sich über das define configUSE_TIME_SLICING aktivieren lässt ist das Time Slicing. Durch Time Slicing wird die zugeteilte Prozessorzeit für Task gleicher Priorität gleichmäßig aufgeteilt. Dies geschieht durch Einführung fester TickInterrupt Intervalle. Bei jedem TickInterrupt überprüft der Scheduler 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. Die häufigst verwendete Scheduling Algorithmus nennt sich Prioritized Pre-emptive Scheduling with Time Slicing.

- Tickcount
- FSM
- IDLE Task
- Priorität nicht durch Scheduler

Idle Task darf nicht blockiert werden. Idle Task automatisch erstellt nach vTaskStartScheduler. Idle Task räumt auf. Blocked - Running :D FSM fertig Scheduler ändert die Priorität nicht, Änderungen sind aber erlaubt. Pre-emption : hohe Prio haut low Prio raus Round Robin : Task dürfen sich abwechseln in dem der Kontext gesichert wird und der Kontext einer anderen Task geladen wird. Task mit gleicher Prio wechseln sich ab Time Slicing: verteilt die processing Zeit auf Task mit gleicher Prio, indem nach jedem Zeitschlitz ein Taskwechsel durchgeführt wird.

Cooperative Scheduling in dem Preemption deaktiviert. task wechsel durch task yield. Leichter externe ressourcen zu managen in Cooporative, da der task wechsel selbst bestimmt werden kann.

2.7 Intertask Kommunikation

Queues, Semaphore, Notify, Event Groups

2.8 Interrupt Handling

Deamon Task,

2.9 Low Power Modes auf Stm32F4

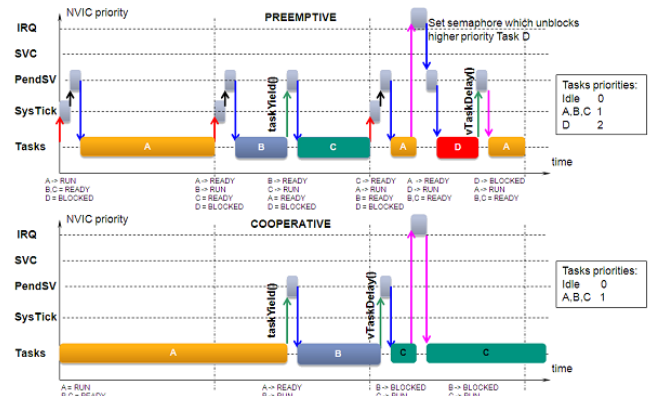


Abbildung 7. Pre-emptive vs. Co-operative. Quelle [2] - Not referenced yet

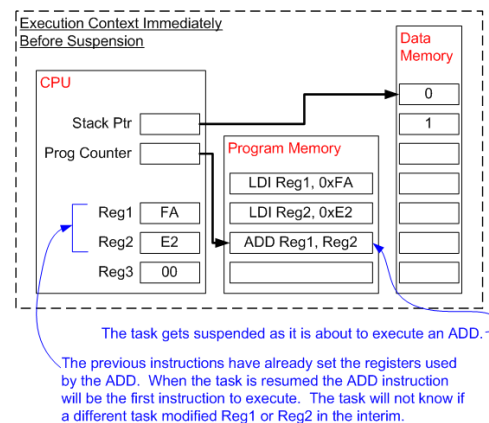


Abbildung 8. FreeRTOS Pseudoimplementierung des Context - Switch. Quelle [2] - Not referenced yet

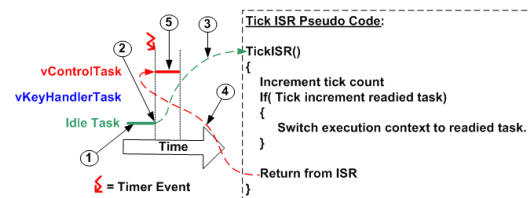


Abbildung 9. FreeRTOS Pseudoimplementierung des Tick Interrupts. Quelle [2] - Not referenced yet

Echtzeitbetriebssysteme kommen immer häufiger in akubetriebenen 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 10 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


```

1 void xPortSysTickHandler( void ){
2  /* The SysTick runs at the lowest interrupt
   priority, so when this interrupt
3  executes all interrupts must be unmasked.
   There is therefore no need to
4  save and then restore the interrupt mask value
   as its value is already
5  known. */
6  portDISABLE_INTERRUPTS();
7  {
8  /* Increment the RTOS tick. */
9  if( xTaskIncrementTick() != pdFALSE )
10 {
11 /* A context switch is required. Context
   switching is performed in
12 the PendSV interrupt. Pend the PendSV
   interrupt. */
13 portNVIC_INT_CTRL_REG =
   portNVIC_PENDSVSET_BIT;
14 }
15 }
16 portENABLE_INTERRUPTS();
17 }
18 \begin{lstlisting}
19
20 \begin{lstlisting}[caption={Pre-emptive List
   selection aus Task.c}, linewidth=8cm,
   captionpos=b, label=lst:nextTask, float=hbt
   ]
21 #define taskSELECT_HIGHEST_PRIORITY_TASK() {
22 UBaseType_t uxTopPriority = uxTopReadyPriority
   ;
23
24 /* Find the highest priority queue that
   contains ready tasks. */
25 while( listLIST_IS_EMPTY( &(
   pxReadyTasksLists[ uxTopPriority ] ) ) )
26 {
27 configASSERT( uxTopPriority );
28 --uxTopPriority;
29 }
30 /* listGET_OWNER_OF_NEXT_ENTRY indexes
   through the list, so the tasks of
31 the same priority get an equal share of the
   processor time. */
32 listGET_OWNER_OF_NEXT_ENTRY( pxCurrentTCB, &(
   pxReadyTasksLists[ uxTopPriority ] ) );
33 uxTopReadyPriority = uxTopPriority;
34 } /* taskSELECT_HIGHEST_PRIORITY_TASK */

```

Listing 3. Implementierung von SysTick aus Task.c

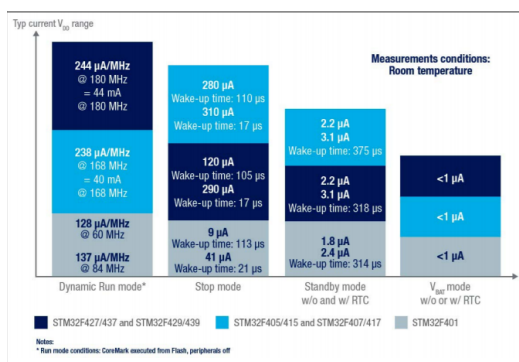


Abbildung 10. Energieaufnahme für STM32F4 in SleepModes
Quelle: STM32F4 - Power Modes

schlafen gehen kann, relativ leicht zu ermitteln. In komplexen Systemen die auf einem Echtzeitbetriebssystem wie FreeRTOS aufsetzen und mehrere Task möglicherweise auf unterschiedliche Ressourcen warten, wird es schon schwierig. In diesem Abschnitt wird gezeigt welche Funktionen

```

1 void vTaskSwitchContext( void )
2 {
3  if( uxSchedulerSuspended != ( UBaseType_t )
   pdFALSE )
4  {
5  /* The scheduler is currently suspended – do
   not allow a context
6  switch. */
7  xYieldPending = pdTRUE;
8  }
9  else
10 {
11 xYieldPending = pdFALSE;
12 /* Check for stack overflow, if configured.
   */
13 taskCHECK_FOR_STACK_OVERFLOW();
14 /* Select a new task to run using either the
   generic C or port
15 optimised asm code. */
16 taskSELECT_HIGHEST_PRIORITY_TASK();
17 traceTASK_SWITCHED_IN();
18 }
19 }

```

Listing 4. Implementierung von Kontextwechsel aus Task.c

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 ,
   pvParameters )
2 {
3  /* Stop warnings. */
4  ( void ) pvParameters;
5
6  /** THIS IS THE RTOS IDLE TASK – WHICH IS
   CREATED AUTOMATICALLY WHEN THE
7  SCHEDULER IS STARTED. */
8
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
   the idle task. This
15 allows the application designer to add
   background functionality
16 without the overhead of a separate task.
17 NOTE: vApplicationIdleHook() MUST NOT, UNDER
   ANY CIRCUMSTANCES,
18 CALL A FUNCTION THAT MIGHT BLOCK. */
19
20 vApplicationIdleHook();
21 }
22 //guess what.. skipped more code
23 }

```

Listing 5. 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 6 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 GPI-

```

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,
    PWR_STOPENTRY_WFI);
14 //Aufgewacht...the show must go on
15 //aktiviere SysTick
16 SysTick->CTRL |= SysTick_CTRL_TICKINT_Msk;
17 //reaktiviere GPIO Clocks
18 enableGPIOClocks();
19 //reaktiviere Externe Interrupt Quellen
20 enableExternalInterrupts();
21}

```

Listing 6. Pseudocode für eine Idle Hook Funktion

OS 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 Funktion 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 6 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 Ein real System

Ad-hoc System?

3.2 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)

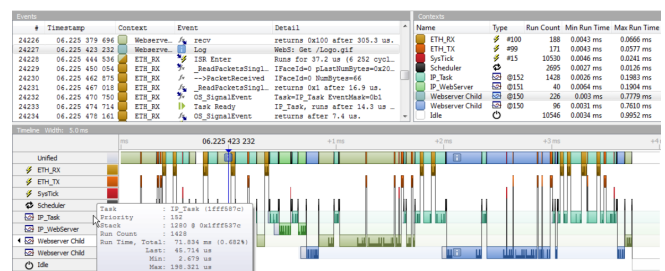


Abbildung 11. Segger Systemview - Not referenced yet

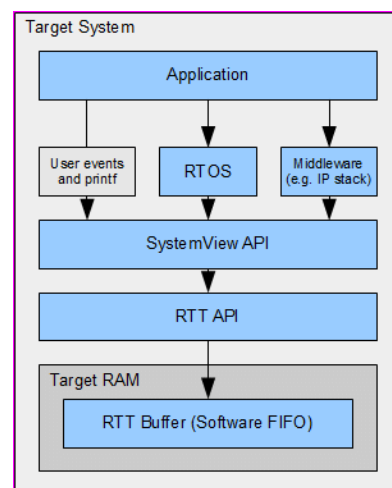


Abbildung 12. Segger Systemview Target - Not referenced yet

3.3 Echtzeitanalyse

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

aus [4]

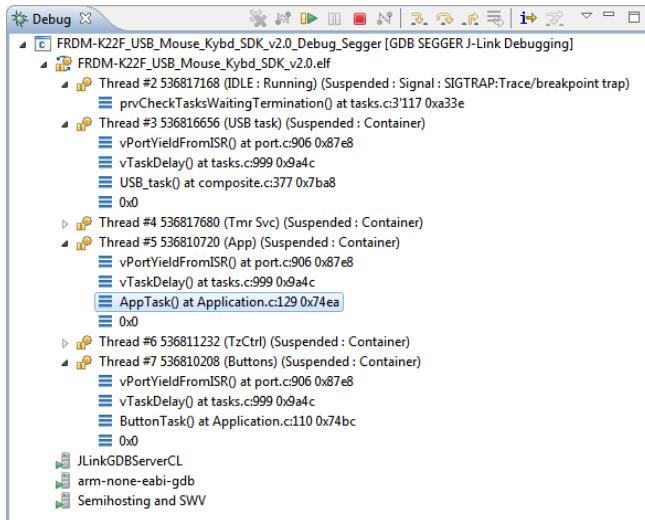


Abbildung 13. Segger Thread Awareness- Not referenced yet

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 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.
5. C. Walls. Rtos revealed. *Embedded.com*, 2016-2017.

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

aus [3]

4. ZUSAMMENFASSUNG