
Model Driven Software Engineering mit IBM Rational Rhapsody für Embedded Systems

Masterprojekt

Thomas Sauter
Matrikel-Nr.: 3122629
Studiengang: SYE\2

Hochschule Ulm
Graduate School
Studiengang Systems Engineering und Management

9. September 2017

Betreuer:

Prof. Dr. Marianne von Schwerin, Hochschule Ulm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	2
2	Entwicklungsgrundlage	5
2.1	Hardware	5
2.1.1	Evaluation Board Keil MCB1760	5
2.1.2	WLAN-Modul ESP8266	6
2.2	Software	7
2.2.1	IBM Rational Rhapsody	7
2.2.2	Willert Embedded UML RXF	8
2.2.3	Keil uVision	9
2.2.4	Arduino IDE	10
3	Implementierungen	11
3.1	Ethernet	11
3.1.1	Anforderungen	12
3.1.2	Architektur	13
3.1.3	Design und Coding	14
3.1.4	Konfigurieren des Keil Projekts	19
3.2	SD-Karte	23
3.2.1	Anforderungen	24
3.2.2	Architektur	25
3.2.3	Design und Coding	26
3.2.4	Konfigurieren des Keil Projekts	34
3.3	WLAN	39
3.3.1	Anforderungen	40
3.3.2	Architektur	41
3.3.3	Design und Coding	41
3.3.4	Konfigurieren des Keil Projekts	45
3.3.5	Inbetriebnahme der WLAN-Module ESP8266	48
4	Verifikation	55
4.1	Testobjekt	55
4.2	Modellbasierter Test	55

Inhaltsverzeichnis

5 Zusammenfassung und Ausblick	57
Abkürzungsverzeichnis	59
Literaturverzeichnis	61

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Programmieren von Software kann derzeit in vier Generationen eingestuft werden (Van der Heiden, 2017). Dabei repräsentiert die erste Generation die Maschinensprache. Zwar findet die Maschinensprache noch heute Anwendung in allen Prozessoren, allerdings ist das Schreiben von Maschinensprache als binärer oder hexadezimaler Code äußerst mühselig und fehleranfällig.

Deshalb wurde mit der zweiten Generation die Assemblersprache eingeführt. Dabei übersetzt ein Computerprogramm, der Assembler, die Assemblersprache in Maschinensprache. Einheitliche Befehle in Textform ermöglichen ein schnelleres und besser Verständnis dafür, was ein Programm tatsächlich ausführt. Fehler können dennoch vorkommen, allerdings nicht mehr in einfachen Konstrukten. Schließlich wurden die Programme in Assemblersprache mit zunehmender Dauer größer und unübersichtlicher, wodurch deren Wartung und Test immer schwerer wurde.

Die höheren Programmiersprachen wie C oder C++ läuteten daraufhin die dritte Generation ein, die bis heute Verwendung findet. Die abstrakte Syntax ist eher an menschliche Gewohnheiten angepasst und beschreibt, wie ein Problem gelöst wird. Ein Compiler übersetzt den Quellcode in Maschinensprache. Aber auch hier wächst die Software kontinuierlich, wodurch erneut das Problem der Komplexität auftritt. Das spiegelt sich auch in einer Umfrage von Maxfield (2017, Folie 48) wider. Dort wird die steigende Komplexität, verbunden mit der zunehmenden Anzahl an Codezeilen, als größte Herausforderungen im kommenden Jahr in der Entwicklung von Software für Embedded Systems angegeben.

Abhilfe sollen die Sprachen der vierten Generation schaffen, wobei die Literatur die Inhalte der vierten Generation nicht klar abgrenzt. Nach Van der Heiden (2017) gehört zur vierten Generation auch die Modellierungssprache UML. Die UML hebt die Programmierung nochmals auf eine höhere Abstraktionsebene und versucht so die Komplexität zu bewältigen. Dabei kommen standardisierte Modellelemente zum Einsatz, die eine höhere Informationsdichte haben als übliche Programmiersprachen. Mit den Modellelementen können Grafiken wie Klassen-, Sequenz- und Zustandsdiagramme modelliert werden. Oft ist es noch gängige Praxis, dass UML-Modelle lediglich zur Dokumentation verwendet werden. Dabei wird aber nicht das gesamte Potential der UML ausgenutzt. Zusammen mit einem Codegenerator entwickelt sich die UML zu einer leistungsstarken Modellierungssprache, bei der das Program-

mieren vom Modellieren abgelöst wird. In diesem Zusammenhang ist eine Entwicklungsumgebung, welche das automatisierte Generieren von Quellcode unterstützt, unverzichtbar. Bezogen auf die vier Generationen überführt der Codegenerator das UML-Modell aus der vierten Generation in ausführbaren Quellcode der dritten Generation.

1.2 Aufgabenstellung

Der Fokus im Rahmen dieser Arbeit liegt auf der modellbasierten Softwareentwicklung für Embedded Systems. Die Basis bildet die Laborveranstaltung zur Vorlesung Embedded Systems. Dort wurde bisher mit Hilfe des Tools IBM Rational Rhapsody und des Willert Realtime RXF aus UML-Modellen Quellcode in C generiert. Der generierte Quellcode wird in der Entwicklungsumgebung Keil uVision kompiliert und auf ein Evaluierungsboard geladen.

Die erste Aufgabe besteht darin, die bisher existierenden Laboraufgaben von der Programmiersprache C nach C++ zu überführen. Besonderheiten in diesem Zusammenhang stellt das Einbinden externer C-Quellen dar, was im Weiteren Verlauf der Arbeit nochmals thematisiert wird. Lösungen der Laboraufgaben in der Programmiersprache C++ sind nicht Inhalt der vorliegenden Arbeit.

In den existierenden Laboraufgaben wurden bereits verschiedene Peripheriegeräte des Evaluierungsboards verwendet, unter anderem LED-Bar, Poti, Display, Joystick und Interrupt-Button. Hier sollen weitere Bauteile angesprochen und die Laboraufgaben erweitert werden. Dabei handelt es sich um folgende Funktionalitäten:

- Ethernet-Kommunikation
- WLAN-Kommunikation
- Lesen und Schreiben einer SD-Karte

Das Hauptaugenmerk bei der Implementierung liegt darauf, dass der generierte C++-Quellcode in Keil uVision nicht mehr geändert werden muss, ansonsten geht der Vorteil der automatisierten Codegenerierung durch Rational Rhapsody verloren. Eine Ausnahme bildet die WLAN-Kommunikation. Da das Evaluierungsboard über keine eigene WLAN-Antenne verfügt, muss diese über einen externes WLAN-Modul zur Verfügung gestellt werden. Zwar erfolgt die Implementierung für das Evaluierungsboard über die bestehende Toolkette, jedoch benötigt das externe WLAN-Modul eine spezifische Entwicklungsumgebung in welcher der entsprechende Code von Hand implementiert wird.

Den Abschluss der Arbeit bildet die Verifikation. Dabei soll auch ein modellbasierter Test implementiert werden. Rational Rhapsody bietet dazu die Erweiterung

1.2 Aufgabenstellung

TestConductor an, welche diese Funktionalität unterstützt. Damit aus den modellierten Testfällen ausführbarer Quellcode entstehen kann, wird ebenfalls das Willert Realtime RXF sowie Keil uVision benötigt. Zu Beginn der Arbeit war geplant, dass die Implementierungen zu den neuen Funktionen einem modellbasierten Test unterzogen werden. Allerdings existiert derzeit kein Willert Realtime RXF, das die verwendete Toolchain und den TestConductor unterstützt, sowie C++-Quellcode generiert. Ein Release eines entsprechenden Willert Realtime RXF ist für das vierte Quartal im Jahr 2017 vorgesehen. Aus diesem Grund soll eine der bereits existierenden Laboraufgaben in C verwendet werden und exemplarisch ein Testszenario modelliert werden.

2 Entwicklungsumgebung

2.1 Hardware

2.1.1 Evaluation Board Keil MCB1760

Das Keil MCB1760 Evaluation Board enthält einen NXP LPC1768 Mikrocontroller basierend auf einem 100Mhz ARM 32-bit Cortex-M3 Mikroprozessor. Neben den wesentlichen Komponenten und Schnittstellen, welche in Abbildung 2.1 dargestellt sind, verfügt das Keil MCB1760 Evaluation Board über 512KB Flash und 64KB RAM Speicher.

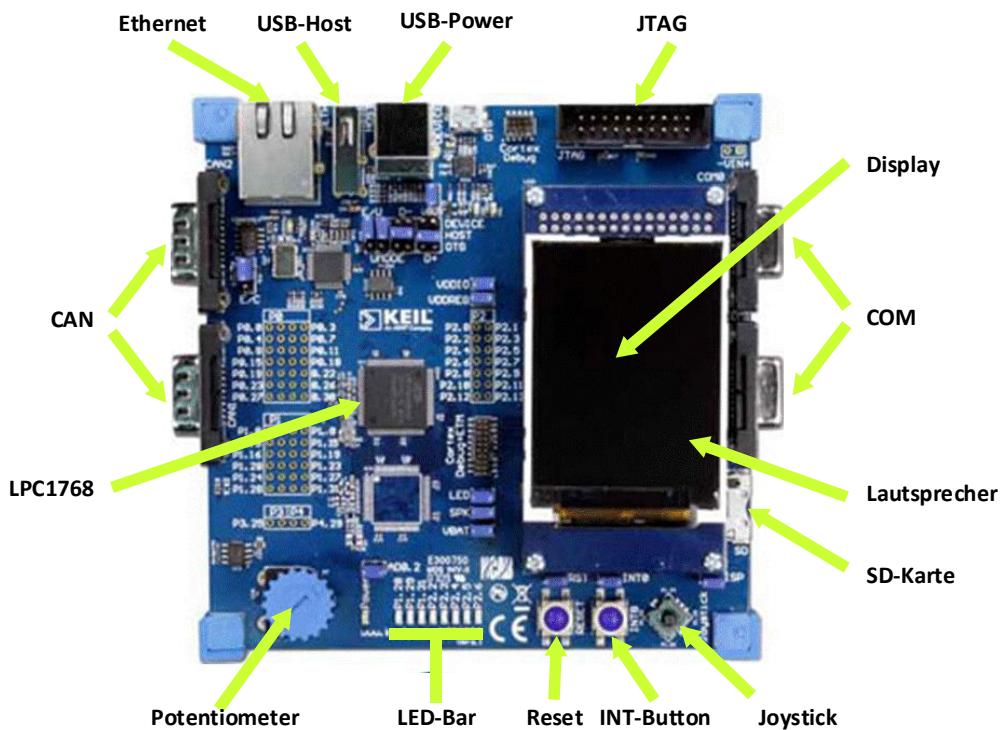


Abbildung 2.1: Komponenten des MCB1760 Evaluation Board.

In der Regel werden Evaluation Boards in früheren Entwicklungsphasen eingesetzt, um die Leistungsgrenzen der gewählten Architektur zu verifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit steht die Integration des Evaluation Boards zusammen mit der Toolchain im Vordergrund.

2.1.2 WLAN-Modul ESP8266

Das WLAN-Modul ESP8266 ist eines von wenigen Boards auf dem Markt, das über einen Mikrocontroller mit WLAN-Funktionalität verfügt. Das Herzstück des Mikrocontrollers ist der bis zu 160MHz schnelle 32-bit Xtensa LX106 Mikroprozessor von Tensilica. Dabei gibt eine ganze Reihe von Boards, die sich vor allem in ihrer Dimension, den damit zugänglichen Pins und dem Flash Speicher unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Board ESP8266-12E verwendet, wie es in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Das Board verfügt über 4MB Flash und 65KB RAM Speicher. Eine

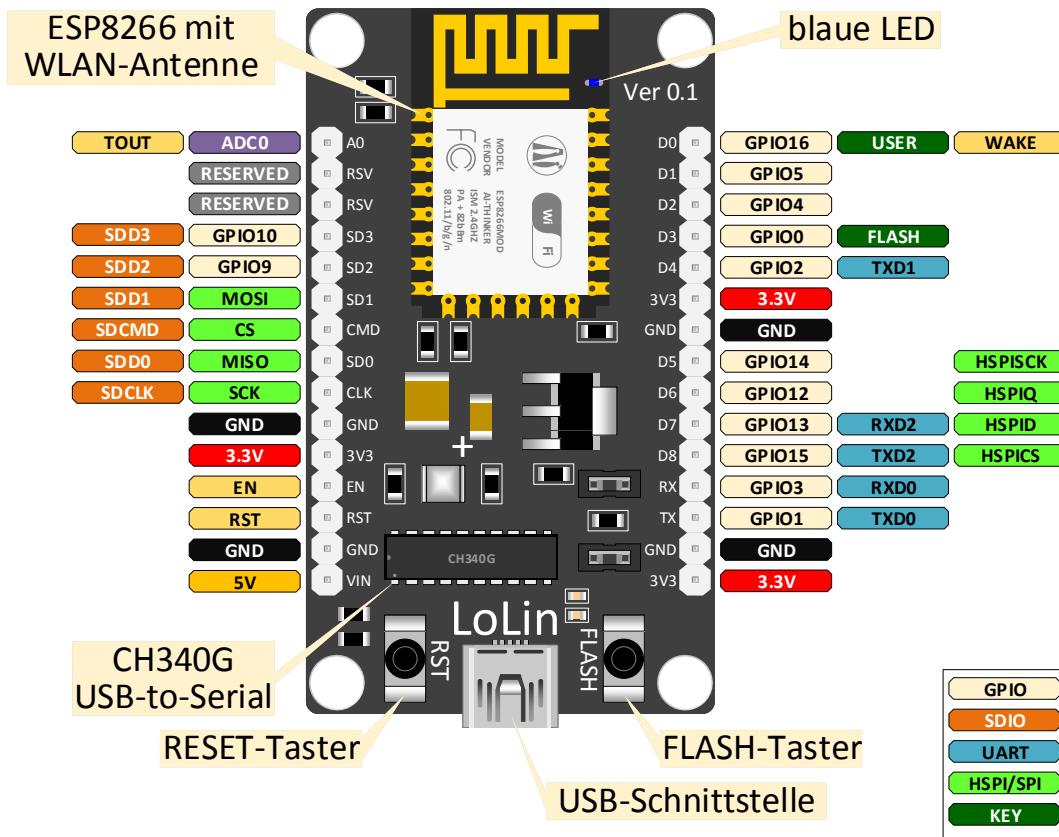


Abbildung 2.2: WLAN-Modul ESP8266.

hohe Popularität im Internet erlangte das Board auch unter dem Begriff *NodeMCU*. Der Name *NodeMCU* stammt dabei von der Firmware, die ab Werk vorinstalliert ist. Die Open-Source Firmware basiert auf der Skriptsprache Lua. In dieser Arbeit wird die Firmware *NodeMCU* nicht verwendet, weshalb das Board im Weiteren auch als WLAN-Modul ESP8266 bezeichnet wird. Die Programmierung über Lua-Skripte ist möglicherweise komfortabler, bietet aber eine wesentlich geringere Flexibilität als eine Programmiersprache wie C.

Der große Vorteil des verwendeten Boards liegt in der USB-Schnittstelle. Diese dient als Programmier-Schnittstelle und Spannungsversorgung zugleich. Dabei wird die USB-Schnittstelle durch den USB/UART-Wandler CH340G und eine Spannungsstabilisierung unterstützt. Das vereinfacht die Programmierung des ESP8266, da nicht beachtet werden muss, dass bestimmte Pins vor der Programmierung definierte Pegel haben. Zudem muss keine explizite Spannungsversorgung entwickelt werden.

2.2 Software

2.2.1 IBM Rational Rhapsody

Derzeit gibt es auf dem Markt eine Vielzahl an Software-Modellierungswerkzeuge, die sich im Wesentlichen durch ihre Funktionen und den daraus resultierenden Preis unterscheiden. Jedoch haben die meisten dieser Tools miteinander gemein, dass sie die Modellierungssprache UML unterstützen. So gibt es unter anderem einige kostenlose Tools wie StarUML oder Netbeans, die geringen Anforderungen durchaus genügen. Weitaus mächtiger sind etwa Enterprise Architect von SparxSystems und das in dieser Arbeit verwendete Rational Rhapsody von IBM. Mit Rational Rhapsody ist es möglich, neben UML-Modellierung weitere Aufgaben zu bearbeiten, die während der Softwareentwicklung anfallen. Beispielsweise können Anforderungen direkt spezifiziert oder auch aus DOORS NG importiert und zu der erstellten Architektur verlinkt werden. Ein Codegenerator übersetzt die Architektur in Quelltext. Dabei bietet der Codegenerator etliche Konfigurationsmöglichkeiten, um Layout und Syntax nach Belieben anzupassen. Das Spezifizieren und Ausführen von Tests in einer integrierten Testumgebung runden den Funktionsumfang zur Unterstützung eines Software Entwicklungsprozesses ab.

Rational Rhapsody wird in verschiedenen Versionen Angeboten, die sich stark in ihrem Funktionsumfang unterscheiden. Grundlegende Funktionen, wie etwa das Erstellen von UML-Diagrammen und das Verlinken von Anforderungen ist mit allen Versionen möglich. Weitere Funktionalitäten wie grafikbasierte Simulation oder automatische Codegenerierung, unter anderem auch für Embedded Echtzeitsysteme, ist nur in den Premium-Versionen verfügbar (IBM, 2017).

Beim Generieren von Quelltext unterstützt Rational Rhapsody die Programmiersprachen C, C++, Java und C#. Dabei ist es wichtig, dass direkt beim Anlegen des Projekts die gewünschte Programmiersprache ausgewählt wird. Denn in der Folge startet Rational Rhapsody beim Öffnen der Rhapsody Projektdatei stets die passende Variante für die definierte Programmiersprache. Da die Implementierungen in dieser Arbeit in C++ erfolgen, ergibt sich somit die Version *IBM Rational Rhapsody Developer for C++*, die zudem den vollen Funktionsumfang beinhaltet.

Rhapsody TestConductor Add On

Der Rhapsody TestConductor ist Teil der Testumgebung von Rational Rhapsody, welche auf drei Hauptkomponenten basiert:

- Automatisiertes Generieren von Test-Architekturen
- Automatisiertes Generieren von Testfällen
- Automatisiertes Ausführen von Testfällen

Dabei unterstützt der TestConductor in der Basisversion das automatisierte Generieren von Test-Architekturen, sowie das Ausführen von Testfällen. Mit der Erweiterung Automatic Test Generation (ATG) wird auch das automatisierte Generieren von Testfällen unterstützt. Ungeachtet dessen steht im Fokus des TestConductors der modellbasierte, dynamische Test. So ermöglicht der TestConductors das Modellieren von Testfällen in Form von Sequenz-, Zustands- und Aktivitätsdiagrammen. Zusätzlich ist es aber auch möglich, Testfälle als Quellcode zu implementieren.

Darüber hinaus bringt der TestConductor das Rhapsody UML Testing Profile mit sich, basierend auf dem offiziellen UML Testing Profile der OMG (2013). Dabei gilt es zu beachten, dass das Rhapsody UML Testing Profile nicht alle Elemente des UML Testing Profiles enthält. Aber es verfügt über zusätzliche Elemente, die nicht Teil des UML Testing Profiles der OMG sind. Ein Beispiel dafür sind Platzhalter für Schnittstellen, die nicht Teil der zu testenden Komponente sind (OSC Embedded Systems AG, 2017).

2.2.2 Willert Embedded UML RXF

Der generierte Code aus Rhapsody eignet sich zunächst nicht zur Ausführung auf einem Target. Die UML-Notation ist viel leistungsstärker und auf einer höheren Abstraktionsebene als jede höhere Programmiersprache. UML-Elemente wie asynchrone Kommunikation, aktive Klassen oder auch komplexe Zustände können nicht direkt in eine höhere Programmiersprache übersetzt werden.

Das Tool Embedded UML Real-time eXecution Framework (RXF) der Firma Willert bildet die Schnittstelle zwischen UML-Modell und einer Zielplattform bestehend

aus Compiler, CPU und einem möglichen RTOS. Durch eine Abstraktionsschicht werden die gängigsten Echtzeit-Betriebssysteme auf dem Markt unterstützt. Das bedeutet, dass in UML definierte Timer oder Events unabhängig vom Betriebssystem verwendet werden können. Somit ist das Software-Design komplett losgelöst vom gewählten Target.

Bei der Codegenerierung unterstützt das RXF die beiden bekanntesten UML-Tools, Rhapsody und Sparx Enterprise Architect, sowie eine Vielzahl an IDEs. Um eine bestmögliche Integration zu gewährleisten, ist jede Variante des RXF auf die verwendete Toolchain zugeschnitten. Ein Vorteil davon ist, dass die Target IDE über das RXF mit Rhapsody verbunden ist und somit der Code aus dem UML-Modell direkt in die Target IDE generiert wird (Van der Heiden, 2016). Zur Unterscheidung der vielen verschiedenen Varianten hat die Firma Willert mit der Version 6 einen Produktcode eingeführt, welcher zur Identifikation der enthaltenen Komponenten dient. Das Schema ist in Tabelle 2.1 abgebildet.

In dieser Arbeit wurden die Varianten *RXF-Eval_Rpy-Cpp-ARM* in der Version 6.02 und *Rpy_CPP_CMSIS_Keil5_ARM_MCB1700_TD* in der Version 6.01 verwendet.

2.2.3 Keil uVision

Die IDE Keil uVision ist Teil des Keil Microcontroller Development Kit (MDK). Es vereint einen Projektmanager und eine Run-Time Environment (RTE), mit deren Hilfe vorgefertigte Software Pakete integriert werden können. Die Software Pakete können Bibliotheken, Module, Konfigurationsdateien, Templates und Dokumentation enthalten, welche bei der Inbetriebnahme des Targets unterstützen. Die Basisfunktionalitäten einer gewöhnlichen IDE, wie Quellcode-Editor und Debugger, sind ebenfalls enthalten (ARM Keil Group, 2017b).

In dieser Arbeit wird das Keil MDK in der Version 5 verwendet. Im Vergleich zum vorherigen Keil MDK in der Version 4, ist eine wesentliche Neuerung das Echtzeitbetriebssystem Cortex Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS). Es löst das bisherige RTX Real-Time Library (RL-ARM) Echtzeitbetriebssystems ab und bringt die folgenden Vorteile mit sich (ARM Keil Group, 2014):

UML-Tool		Programmiersprache		RTOS		Compiler		EvalBoard*		Erweiterungen**
----------	--	--------------------	--	------	--	----------	--	------------	--	-----------------

* Die EvalBoard Komponente ist kein Teil des Produkts. Sie sagt lediglich aus, mit welcher CPU Familie das Produkt verwendet werden kann.

** Erweiterungen sind optional und können auch miteinander kombiniert werden. Mögliche Zusätze sind „TD“ für Embedded UML Target Debugger, „TC“ für Test Conductor oder „Eval“ für eine RXF Evaluierungsversion.

Tabelle 2.1: Produktcode zur Identifikation der enthaltenen Komponenten (Römer, 2012).

- Standardisierte API
- Basisfunktionen zur Unterstützung von UML oder Java
- Einfaches wiederverwenden von Software Komponenten durch einheitliche Funktionen
- CMSIS konforme Middleware kann einfach angepasst werden

2.2.4 Arduino IDE

Um das WLAN-Modul ESP8266 in der Programmiersprache C zu implementieren, wird die Arduino IDE verwendet. Zwar bringt die Arduino IDE nur einen sehr geringen Funktionsumfang mit sich, so ist beispielsweise kein Debugger enthalten. Der fehlende Debugger kann durch Ausgaben auf die serielle Schnittstelle teilweise kompensiert werden, dazu bietet die Arduino IDE auch ein integriertes Terminal an. Dennoch ist die Arduino IDE weit verbreitet und kostenlos, zudem ist sie überschaubar und daher sehr schnell zu beherrschen. Nach der Installation unterstützt die Arduino IDE eine Vielzahl an Arduino-Boards, jedoch nicht das WLAN-Modul ESP8266. Dazu muss die Arduino IDE um das ESP8266-Paket erweitert werden. Eine detaillierte Installationsanleitung beschreibt Sauter (2017). Der Quellcode ist einem sogenannten Sketch enthalten, welcher die beiden klassischen Funktionen *setup* und *loop* implementiert.

3 Implementierungen

3.1 Ethernet

Dieses Kapitel beschreibt die Einbindung der Ethernet Schnittstelle des Keil MCB1760 Evaluation Boards. Ziel ist es, dass zwei Eval Boards über ihre Ethernet Schnittstelle Daten austauschen können. In der Implementierung nach Steinmeyer und Pollithy (2015) wurde die gewünschte Funktionalität bereits umgesetzt, jedoch auf der Basis des RTX RL-ARM Echtzeitbetriebssystems und einer damit überholten Version der Keil MDK.

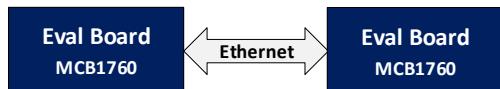


Abbildung 3.1: Blockschaltbild zur Kommunikation zwischen zwei MCB1760 Evaluation Boards über Ethernet

Zur Implementierung und Demonstration der Kommunikation über Ethernet wurde eine Entwicklungsumgebung entsprechend Abbildung 3.2 aufgebaut. Die beiden Eval Boards sind über ein Patchkabel mit einem Hub verbunden. Der Hub hat gegenüber einem Switch oder Router den Nachteil, dass er eine geringere nutzbare Bandbreite mit sich bringt. Grund dafür ist, dass der Hub ein Datenpaket immer an jedes angeschlossene Gerät sendet, unabhängig davon, ob das Datenpaket an das Gerät adressiert wurde oder nicht. Jedoch unterstützt dieses Defizit bei der Implementierung, indem mit Hilfe eines PCs und des Tools Wireshark der Datenverkehr zwischen den beiden Eval Boards abgehört wird. Da die versendeten Datenpakete eine Größe von zwei Bytes haben, spielt die nutzbare Bandbreite im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle. Die in Abbildung 3.2 in weiß eingezzeichneten USB-Leitungen dienen zur Spannungsversorgung der Eval Boards.

3 Implementierungen

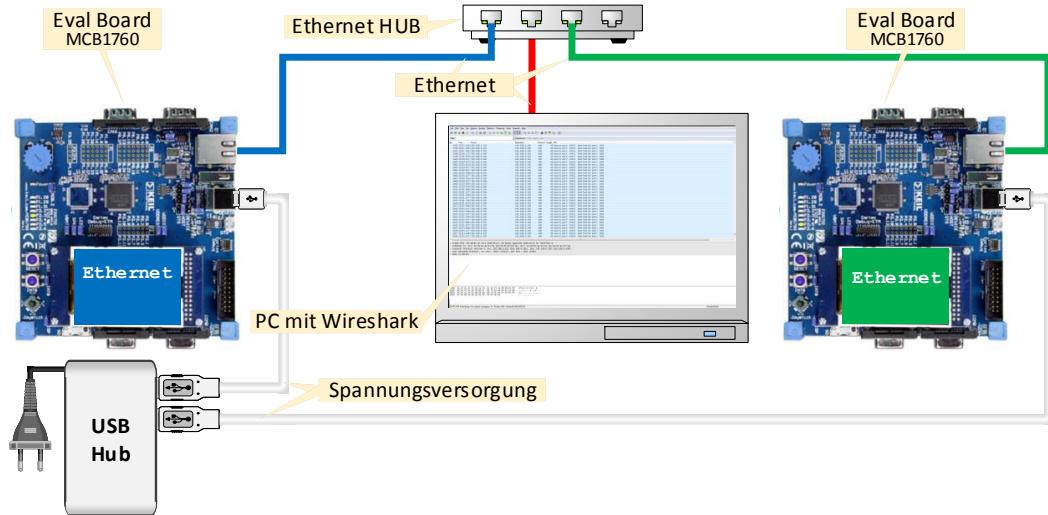


Abbildung 3.2: Demonstrator für die Kommunikation zwischen zwei MCB1760 Evaluation Boards über Ethernet

3.1.1 Anforderungen

Zur Demonstration einer funktionsfähigen Ethernet-Kommunikation soll ein exemplarisches Szenario implementiert werden. So sollen LEDs durch den Joystick auf dem jeweils anderen Board eingeschaltet werden. Dabei soll die Position des Joysticks angeben, welche LED die LED-Bar ein- oder ausschaltet. Des Weiteren

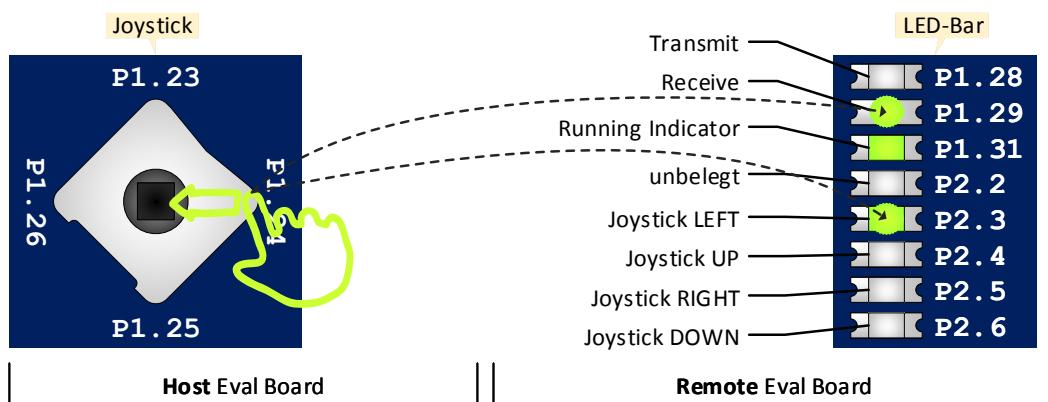


Abbildung 3.3: Beispiel mit Zuordnung der LEDs.

soll das Display die zuletzt empfangene Position anzeigen. Damit die Eval Boards einfach zu identifizieren sind, soll das Display zudem die Host IP Adresse sowie die Remote IP Adresse darstellen. Beim Senden sowie beim Empfangen eines Datenpakets soll der Transmitter bzw. der Receiver kurzzeitig eine LED blinken lassen. Die Zuordnung von Funktionen zu den LEDs der LED-Bar ist Abbildung 3.3 rechts dargestellt.

Zudem veranschaulicht Abbildung 3.3 das Funktionsprinzip. Auf dem Host Eval Board bewegt der Benutzer den Joystick in die linke Richtung. Das führt dazu, dass beim Remote Eval Board die Receiver LED P1.29 kurzzeitig aufleuchtet, sowie die LED P2.3 dauerhaft angeschaltet wird. Bewegt der Benutzer den Joystick erneut in die linke Richtung, erlischt die LED P2.3 wieder.

3.1.2 Architektur

Bei der Formulierung der Anforderungen in Kapitel 3.1.1 wurde darauf geachtet, dass diese in möglichst aktiver Form spezifiziert sind. Dadurch können die benötigten Klassen abgeleitet werden, welches sich im Folgenden durch die Ähnlichkeit von Subjekten oder Objekten zu den Klassennamen widerspiegelt.

Die Architektur der Ethernet-Kommunikation ist als Klassendiagramm in Abbildung 3.4 dargestellt. Zentrales Element ist die Basisklasse `EthernetController`, von ihr werden die beiden Klassen `EthernetTransmitter` und `EthernetReceiver` abgeleitet. Diese beiden Klassen arbeiten in separaten Tasks und sind für das Senden und Empfangen von Datenpaketen verantwortlich. Auf der linken Seite in Abbildung 3.4 sind die Klassen `RunningIndicatorLed` und `Joystick` abgebildet, welche ebenfalls in eigenen Tasks ausgeführt werden. Die Klasse `Running-`

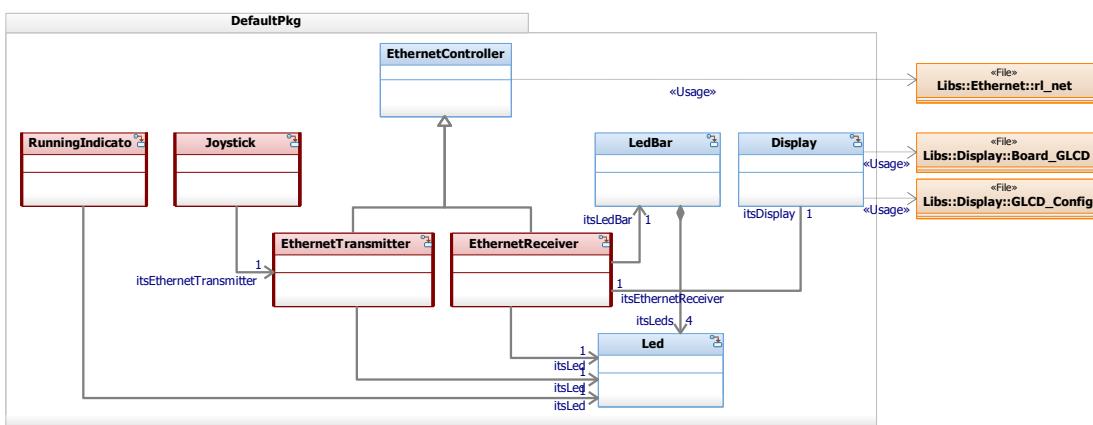


Abbildung 3.4: Klassendiagramm zur Ethernet-Kommunikation. Klassen, die in eigenen Tasks laufen sind rot eingezeichnet.

3 Implementierungen

IndicatorLed lässt die LED P1.31 zyklisch blinken, mit einer Periodendauer von einer Sekunde. Sie dient zu Debugging zwecken und um unmittelbar zu erkennen, ob das Target läuft. Die Klasse Joystick pollt regelmäßig die Position des Joysticks. Auf der rechten Seite sind die Klassen LedBar, Display und Led zu finden. Dabei liegt zwischen den Klassen LedBar und Led eine Komposition mit der Multiplizität vier vor, wodurch der LED-Bar die LEDs zugeordnet sind, welche eine Joystick Position repräsentieren. Außerhalb des Pakets DefaultPkg sind Abhängigkeiten zu externen Bibliotheken in orange eingezeichnet. Die verwendeten Bibliotheken, Network und Graphics Component, stammen aus der MDK Middleware und vereinfachen das Verwenden dieser Peripheriegeräte. Mögliche Vorgehensweisen beim Einbinden externer Quellen beschreiben Matuschek und Van der Heiden (2015).

3.1.3 Design und Coding

In diesem Kapitel werden Attribute, Funktionen und Statecharts wichtiger Klassen im Detail vorgestellt.

Ethernet-Controller, Transmitter und Receiver

Der Ethernet-Controller basiert auf der MDK Middleware Network Component in der Version 7.4.1. Die Network Component beinhaltet eine Vielzahl an Services, Sockets (TCP, UDP und BSD), sowie eine Ethernet Schnittstelle inklusive eines IPv4/IPv6 Protocol Stacks. In dieser Arbeit wird der BSD Socket als Datagram Socket (UDP) zusammen mit dem IPv4 Protocol Stack verwendet. Der BSD Socket stellt eine API zur Verfügung, die das Aufbauen und Abhandeln einer Netzwerk-kommunikation unterstützt. Ursprünglich wurden die BSD Sockets für unixnahe Betriebssysteme entwickelt. Mittlerweile sind sie in den POSIX Standard aufgenommen und wurden auch von Microsoft Windows übernommen. Ein Vorteil der BSD Sockets ist, dass mit geringem Konfigurationsaufwand zwischen Stream Sockets (TCP) und Datagram Sockets (UDP) gewechselt werden kann.

Die Klasse EthernetController mit ihren Attributen und Operationen ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zum Spezifizieren der IP-Adressen dienen die Attribute hostIpAddr und remoteIpAddr vom Typ String. Die IP-Adresse werden in Rhapsody über den Features Dialog der beiden Attribute initial festgelegt. Zum Flashen des zweiten Targets können die IP-Adressen einfach getauscht werden.

Initialisierung: Quelltext 3.1 zeigt den Konstruktor des EthernetControllers. Der Konstruktor verwendet ausschließlich Funktionen der Network Component, was am Prefix net zu erkennen ist. In Zeile 6 wird die Funktion netInitialize aufgerufen. Diese Funktion muss bei Systemstart einmalig ausgeführt werden. Sie initialisiert Systemressourcen, Protokolle und zwei Tasks für den Network Core. Bei erfolgreicher Initialisierung wird dem Attribut status der Wert netOK zugewiesen.

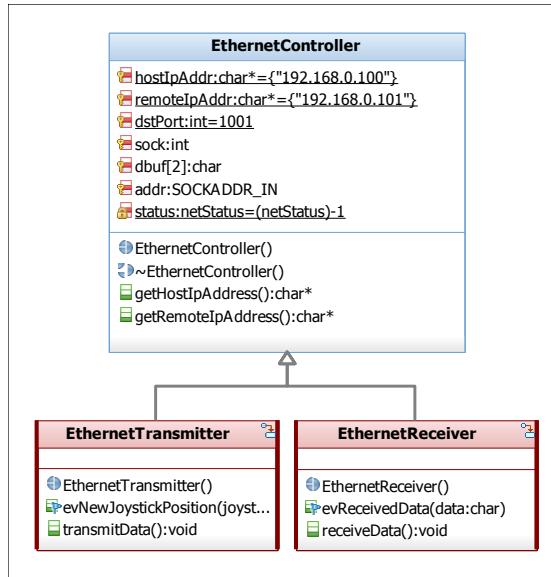


Abbildung 3.5: Basisklasse des Ethernet-Controllers mit abgeleiteten Klassen.

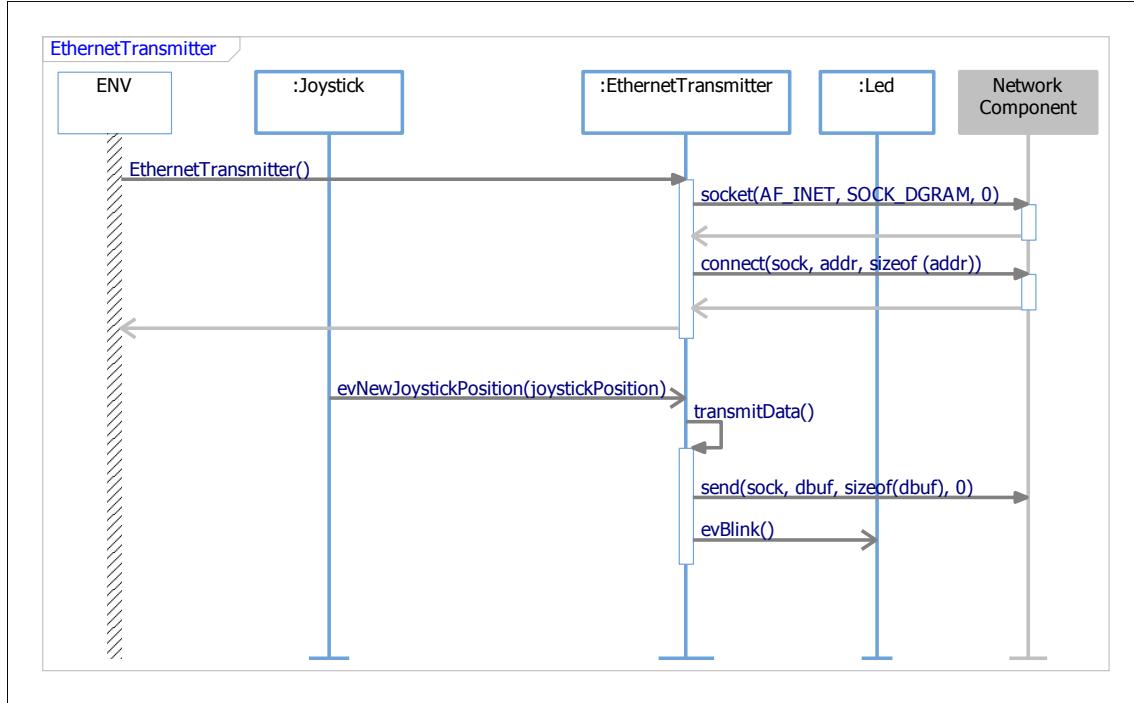
Mit der übergeordneten Abfrage wird sichergestellt, dass die Initialisierung auch nur einmalig durchgeführt wird, auch wenn der Konstruktor des `EthernetController`s durch die beiden Instanzen der abgeleiteten Klassen zweimal durchlaufen wird. Die Funktion `netIP_aton` konvertiert eine IP-Adresse vom Typ `String` in eine binäre Form. Dadurch ist es anschließend möglich, die Host IP-Adresse dynamisch mit Hilfe der Funktion `netIF_SetOption` zu setzen. Somit ist die Konfiguration der Host IP-Adresse ebenfalls in Rhapsody möglich und benötigt keine manuelle Anpassung innerhalb der Keil Umgebung.

```

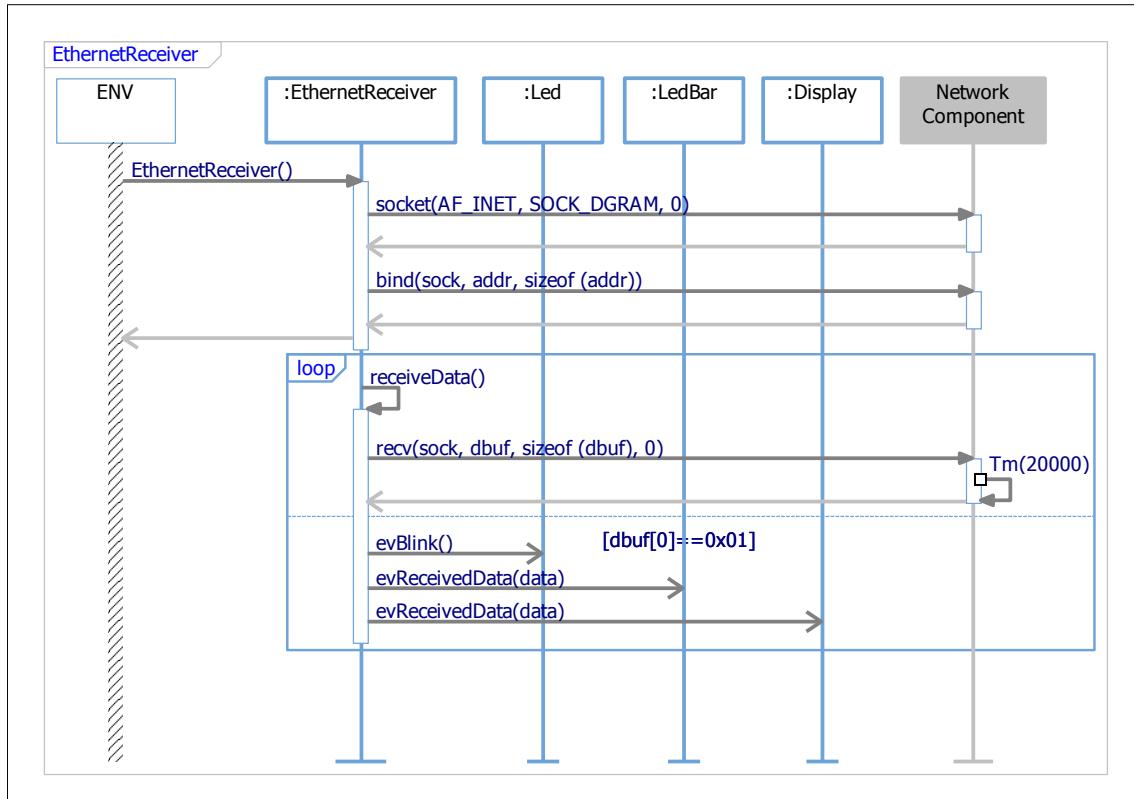
1 unsigned char buf[8];
2
3 if (status != netOK)
4 {
5     // Initialize the network component only once
6     status = netInitialize ();
7
8     // Set the host ip address once
9     netIP_aton (hostIpAddr, NET_ADDR_IP4, buf);
10    netIF_SetOption (
11        NET_IF_CLASS_ETH | 0,
12        netIF_OptionIP4_Address,
13        buf,
14        NET_ADDR_IP4_LEN);
15 }
  
```

Quelltext 3.1: Konstruktor des Ethernet-Controllers

3 Implementierungen



(a) Initialisierung und Sendeablauf des Ethernet-Transmitters.



(b) Initialisierung des Ethernet-Receivers und Ablauf beim Empfangen von Daten.

Abbildung 3.6: Sequenzdiagramme des Ethernet-Transmitters und -Receivers.

Daten senden: Das Sequenzdiagramm in Abbildung 3.6(a) stellt das Verhalten des Ethernet-Transmitters dar. Der `EthernetTransmitter` erstellt in seinem Konstruktor einen Socket vom Typ Datagram Sockets (UDP), zu erkennen am Übergabeparameter `SOCK_DGRAM`. Dem Socket weiß er durch Aufruf von `connect` die Remote IP-Adresse, also die IP-Adresse des anderen Endpunkts, zu. Aufgrund des gewählten Typ Datagram Sockets (UDP), richtet der `EthernetTransmitter` zudem ein Adressfilter zwischen den Endpunkten ein. Im weiteren Ablauf befindet sich der Ethernet-Transmitter im Grunde im Leerlauf und wartet auf das Event `evNewJoystickPosition` welches vom Joystick abgefeuert wird. Trifft das Event `evNewJoystickPosition` ein, handelt der `EthernetTransmitter` durch die Operation `transmitData` seine Sendeaktivitäten ab. Die Funktion `send` sorgt dafür, dass die Daten im Buffer `dbuf` übertragen werden. Zum Abschluss sendet die Klasse `EthernetTransmitter` das Event `evBlink` an die zugehörige LED, was dazu führt, dass die Sende-LED P1.28 einmalig blinkt.

Daten empfangen: Der `EthernetReceiver` erstellt in seinem Konstruktor ebenfalls einen Socket vom Typ Datagram Sockets (UDP) und bindet diesen mit der Funktion `bind` an die Remote IP-Adresse sowie an den Ziel-Port. Der Ziel-Port `dstPort` kann für beide Targets gleich bleiben, er definiert an welchem Port auf eingehende Datenpakete gehorcht wird. Anschließend durchläuft der Ethernet-Transmitter eine Endlosschleife. In dieser ruft er seine Operation `receiveData` auf, welche das Empfangen von Daten behandelt. Die Funktion `recv` empfängt eingehende Daten auf dem zuvor spezifizierten Port. Wenn der Network Core erkennt, dass ein Betriebssystem im Einsatz ist, betreibt der Network Core die Funktion (`recv`) automatisch im Blocking Mode. Dadurch ist es zwingend erforderlich, dass die Klasse `EthernetReceiver` in einem separaten Task ausgeführt wird. Der Blocking Mode ist zudem mit einem Timeout verbunden, der bei Ablauf in den Errorcode `BSD_ERROR_TIMEOUT` resultiert. Nach Ablauf der vorkonfigurierten Zeit von 20 Sekunden, oder falls zuvor Daten Empfangen wurden, ruft der Ethernet-Receiver die Funktion `recv` erneut auf. Hat der `EthernetReceiver` Daten Empfangen, werden diese auf ihre Gültigkeit überprüft. Dazu dient ein minimales Protokoll, dessen erstes Byte zur Synchronisation dient. Sind keine gültigen Daten vorhanden, endet die Operation `receiveData` an dieser Stelle. Entspricht das erste Byte dem Synchronisations-Byte `0x01`, feuert der `EthernetReceiver` das Event `evBlink` an seine LED, damit die Empfangs-LED P1.29 blinkt. Zudem sendet er das Event `evReceivedData` mit dem Inhalt des zweiten Bytes an die LED-Bar, sowie an das Display. Auf der LED-Bar wird das Datenbyte ausgewertet und die entsprechende LED ein- oder ausgeschaltet. Das Verhalten des `EthernetReceiver` ist in Abbildung 3.6(b) dargestellt.

Somit gibt es je Target einen `EthernetTransmitter` und einen `EthernetReceiver`, die in eigenen Tasks ihre Routinen durchlaufen.

Joystick

Der Joystick verfügt in Summe über sechs verschiedene Richtungen, von denen die vier Richtungen links, rechts, oben und unten von Interesse sind. Das Abtasten und Auslesen der Position des Joysticks erfolgte in Anlehnung an von Schwerin und Normann (2017). Dabei wurde die Auswertung der Joystick Position um ein Filter ergänzt, damit nur relevante und neue Positionen via Ethernet übertragen werden. Ursache dafür ist, dass der Joystick nach der Betätigung, in eine der zuvor aufgezählten Richtung, wieder in die zentrale Position zurückkehrt. Dadurch nimmt der Joystick eine für ihn neue Position ein und würde ohne Filter das Senden eines Datenpakets triggern. Quelltext 3.2 zeigt die Implementierung des Filters. Bewegt sich der Joystick in die mittige Position, wird nie ein Event abgefeuert. Hat der Joystick eine andere Richtung eingenommen, feuert die Klasse Joystick das Event evNewJoystickPosition an den EthernetTransmitter.

Die Klasse Joystick hält die Position für eine Dauer von 100 Millisekunden, liest im Anschluss daran den aktuellen Wert aus dem entsprechenden Register aus und filtert diesen. Dieses Sample-and-Hold-Verhalten wurde im zugehörigen Statechart modelliert. Die Halte-Dauer kann im Konstruktor der Klasse Joystick angepasst werden.

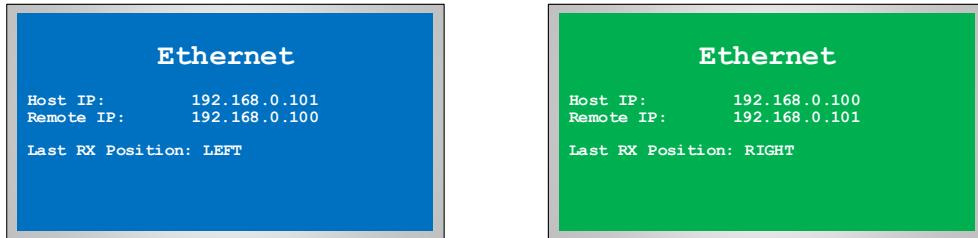
```
1 int position = (LPC_GPIO1->FIOPIN >> 20) & Joystick_Mask;
2
3 // Bit 4-7 contain the position information
4 position = position >> 3;
5
6 if (position == Joystick_CENTER)
7 {
8     // If the Joystick got back to center only update
9     lastPosition = position;
10 }
11 else if (position != lastPosition)
12 {
13     lastPosition = position;
14     FIRE( this->itsEthernetTransmitter, evNewJoystickPosition(
15         position));
```

Quelltext 3.2: Filter zur Auswertung der Joystick Position

LED-Bar und Display

Die LED-Bar und das Display sind die Empfänger des Events evReceivedData, welches der Ethernet-Receiver mit dem Inhalt des Datenbytes als Parameter abfeuert. Die Klasse LedBar ordnet den empfangenen Parameter der entsprechenden LED zu und ruft die Operation toggleLed der Klasse Led auf. Die Klasse

Display nutzt ebenfalls den empfangenen Parameter und zeigt damit die zuletzt empfangene Richtung an. Wie in Abbildung 3.7 dargestellt, zeigt das Display zudem die Host und die Remote IP-Adresse an.



(a) Blauer Hintergrund bei Host IP 192.168.0.101. (b) Grüner Hintergrund bei Host IP 192.168.0.100.

Abbildung 3.7: Beispielhafte Ausgaben auf dem Display für die Ethernet Applikation.

3.1.4 Konfigurieren des Keil Projekts

Als Basis für die Implementierung wurde das Blinky-Beispielprojekt verwendet, welches im RXF *Rpy_CPP_CMSIS_Keil5_ARM_MCB1700_TD* von Willert enthalten ist. Zwar ist das Keil Projekt lediglich rudimentär konfiguriert, stellt aber die funktionsfähige Einbindung von Rhapsody sicher. Im Folgenden werden die wichtigsten Anpassungen in der Konfiguration gegenübergestellt.

Manage Run-Time Environment

Mittels des Konfigurationsassistenten *Manage Run-Time Environment* ist es möglich, Software Komponenten einem Keil Projekt hinzuzufügen. Mit dem Ziel eine Ethernet Kommunikation aufzubauen, wird zunächst der Software Pack *Keil::MDK-Middleware* in der Version 7.4.1 (2017-04-21) dem Projekt hinzugefügt. Diese Paket beinhaltet unter anderem die Network Component in der Version 7.5.0 (2017-04-21). Zum Betreiben der Network Component wird der *ARM::CMSIS:CORE* in der Version 5.0.1 vorausgesetzt. Die dazu notwendige Änderung im Ethernet Projekt gegenüber dem Blinky Projekt ist in Tabelle 3.1 rot gekennzeichnet.

Die Network Component beinhaltet eine Vielzahl an Komponenten, die dem Keil Projekt hinzugefügt werden können. Für den vorliegenden Fall der Ethernet-Kommunikation sind die Komponenten und die benötigten CMSIS Treiber gemäß Tabelle 3.1 zu wählen. Notwendige Anpassungen zur Verwendung des Displays sind orange markiert.

3 Implementierungen

Software Component	Blinky		Ethernet	
	Sel. Variant	Version	Sel. Variant	Version
Board Support	MCB1700		MCB1700	
Graphic LCD (API)		1.0.0		1.0.0
Graphic LCD	<input type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
CMSIS				
CORE	<input checked="" type="checkbox"/>	4.3.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
CMSIS Driver				
Ethernet MAC (API)		2.01		2.1.0
Ethernet MAC	<input type="checkbox"/>	2.9	<input checked="" type="checkbox"/>	2.9.0
Ethernet PHY (API)		2.00		2.1.0
DP83848C	<input type="checkbox"/>	6.1	<input checked="" type="checkbox"/>	6.1.0
SPI (API)		2.01		2.2.0
SPI	<input type="checkbox"/>	2.1	<input type="checkbox"/>	2.1.0
SSP	<input type="checkbox"/>	2.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.7.0
Device				
GPDMA	<input type="checkbox"/>	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.2.0
GPIO	<input type="checkbox"/>	1.1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.1.0
PIN	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0
Startup	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0
Network	MDK-Pro	7.4.0	MDK-Pro	7.5.0
CORE	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	7.5.0
Legacy API	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input type="checkbox"/>	7.5.0
Interface				
ETH	0	7.4.0	1	7.5.0
PPP	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input type="checkbox"/>	7.5.0
SLIP	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input type="checkbox"/>	7.5.0
Service				
Socket				
BSD	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	7.5.0
TCP	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	7.5.0
UDP	<input type="checkbox"/>	7.4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	7.5.0

Tabelle 3.1: Heraufsetzen des CMSIS:CORE (rot), benötigte Komponenten der Network Component und deren Abhängigkeiten (gelb), sowie die Komponenten zum Betreiben des Displays (orange).

Target Options

Mit der Aufnahme der Network Component in das Keil Projekt, steigt der erforderliche RAM-Speicherbedarf der Applikation auf über 41KB (RW-data=352 Bytes + ZI-data=41176 Bytes). Damit wird die vorkonfigurierte RAM-Speichergröße von 32KB überschritten. Jedoch verfügt das Keil MCB1760 Evaluation Board über insgesamt 64KB RAM On-Chip Memory, so dass die weiteren 32KB RAM mit Hilfe des Scatter Files adressiert werden müssen. Das Scatter File (.sct) befindet sich im Flash-Ordner des Keil-Projekts. Allerdings bietet Keil die Möglichkeit, dass Scatter

File über die Bedienoberfläche zu generieren, so dass das Scatter File nicht direkt editiert werden muss. Über die *Target Options* im Reiter *Target* können im Panel *Read/Write Memory Areas* die zweiten 32KB RAM-Speicher aktiviert werden. Die Startadresse der zweiten Speicherbank ist mit 0x2007C000 anzugeben, die Größe des Speichers von 32KB ebenfalls als hexadezimaler Wert mit 0x8000.

CMSIS Configuration

Bei der CMSIS Configuration geht es primär um das Konfigurieren des CMSIS RTX Kernel. Dabei wird die Datei *RTX_Conf_CM.c*, die Teil der CMSIS Component ist, editiert. Keil bietet den Komfort, die Datei über den integrierten *Configuration Wizard* zu bearbeiten. Der erste Parameter *Number of concurrent running user threads* im Abschnitt *Thread Configuration* gibt die Anzahl der Tasks an, die zur gleichen Zeit laufen. Die Tasks mit der Ursache CMSIS-RTOS in Tabelle Tabelle 3.2 sind bei jeder Applikation standardmäßig aktiv, die das CMSIS-RTOS verwenden.

Das Willert RXF bringt durch sein kleines Onboard-Betriebssystem mit *WST_Monitor_receiveTask* einen weiteren Task mit sich. Zudem beansprucht die Network Component bei der Initialisierung die beiden Tasks *netCore_Thread* und *netETH_Thread*. Zusätzlich kommen noch die Tasks hinzu, die durch die Applikation an sich gefordert sind. Gemäß der in rot gekennzeichneten Klassen in Abbildung 3.4 sind das die Tasks *RunningIndicator*, *EthernetReceiver*, *EthernetTransmitter* und *Joystick*. In Summe ergeben sich somit zehn Tasks. Da nach ARM Keil Group (2017d) der Task *os_idle_demon* nicht in die Anzahl der gleichzeitig laufenden Tasks mit eingeht, wird der Parameter *Number of concurrent running user threads* auf den Wert neun gesetzt.

Unter den weiteren Parametern im Abschnitt *Thread Configuration* ist vor allem der Parameter *Total stack size [bytes] for threads with user-provided stack size* von Interesse. Dieser muss im Vergleich zum Blinky Projekt um 1024 Bytes für den Task *netCore_Thread* erhöht werden, sowie um weitere 512 Bytes für den Task

Task Name	Priorität	Ursache
osTimerThread	1	CMSIS-RTOS
main	2	CMSIS-RTOS
os_idle_demon	255	CMSIS-RTOS
WST_Monitor_receiveTask	3	Willert RXF
netCore_Thread	4	Network Component
netETH_Thread	5	Network Component
RunningIndicator	6	Ethernet Applikation
EthernetReceiver	7	Ethernet Applikation
EthernetTransmitter	8	Ethernet Applikation
Joystick	9	Ethernet Applikation

Tabelle 3.2: Verwendete Task für die Ethernet-Kommunikation und deren Ursache.

3 Implementierungen

netEth_Thread (ARM Keil Group, 2017c). Die Anpassungen für die Ethernet-Kommunikation in der Datei *RTX_Conf_CM.c* gegenüber dem Blinky Projekt sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Option	Blinky	Ethernet
	Value	Value
⊖-Thread Configuration		
└-Number of concurrent running user threads	6	9 (+3)
└-Default Thread stack size [bytes]	200	200
└-Main Thread stack size [bytes]	1024	1024
└-Number of threads with user-provided stack size	5	5
└-Total stack size [bytes] for threads with user-provided stack size	4096	5632 (+1536)
└-Check for stack overflow	✗	✗
└-Processor mode for thread execution	Privileged mode	Privileged mode
⊖-RTX Kernel Timer Tick Configuration		
⊖-System Configuration		

Tabelle 3.3: Anpassungen in der RTX Configuration *RTX_Conf_CM.c*.

Device Configuration

Die Datei *startup_LPC17xx.s (Startup)* bildet zusammen mit der Datei *startup_LPC17xx.c (Startup)* den Start-up Code, welcher direkt nach einem RESET des Targets ausgeführt wird. Die beiden Dateien sind Teil der Device Component und können ebenfalls über den *Configuration Wizard* bearbeitet werden. Von größerem Interesse ist die Datei *startup_LPC17xx.s (Startup)* bei der Zuordnung von Speicher erfolgt. In der Datei *startup_LPC17xx.c (Startup)* geht es im Wesentlichen um die Clock Konfiguration, welche aber bei ihrer Standardeinstellung belassen wird.

Nach ARM Keil Group (2017c) ist bei Verwendung des Ethernet Cores eine Vergößerung der Stack Size um 512 Bytes erforderlich. Eine Anpassung des Heaps ist nicht

Option	Blinky	Ethernet
	Value	Value
⊖-Stack Configuration		
└-Stack Size (in Bytes)	0x0000 0200	0x0000 0400 (+512)
⊖-Heap Configuration		
└-Heap Size (in Bytes)	0x0000 1000	0x0000 1000

Tabelle 3.4: Anpassungen in der Startup Configuration *startup_LPC17xx.s (Startup)* für die Ethernet-Kommunikation.

erforderlich, da in dieser Implementierung die Security Komponente nicht verwendet wird. Die Änderung im Startup File ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Ethernet Network Configuration

Die Ethernet-Konfiguration erfolgt über die Konfigurationsdateien, die zur Network Component gehören. Dabei ist in Konfigurationsdatei *Net_Config_ETH_0.h* (*Interface:ETH*) eine Anpassung vorzunehmen, welche die Option *Dynamic Host Configuration* betrifft. Wenn diese Option aktiviert ist, werden IP-Adresse, Netzmaske und Standardgateway automatisch von einem DHCP Server bezogen. Da der Demonstrationsaufbau über keinen DHCP Server verfügt und die IP-Adressen statisch vergeben werden, muss diese Option deaktiviert werden. Tabelle 3.5 zeigt, dass die IP-Adresse in dieser Datei auch manuell konfiguriert werden kann. Jedoch wird diese Option zur Laufzeit überschrieben, da die Implementierungen beschrieben in Kapitel 3.1.3 die IP-Adresse festlegen.

Option	Blinky	Ethernet
	Value	Value
└─Ethernet Network Interface 0		
└─Connected to hardware via Driver_ETH#	0	0
└─MAC Address	1E-30-6C-A2-45-5E	1E-30-6C-A2-45-5E
└─IPv4	✗	✗
└─IP Address	192.168.0.100	192.168.0.100
└─Subnet Mask	255.255.255.0	255.255.255.0
└─Default Gateway	192.168.0.254	192.168.0.254
└─Primary DNS Server	8.8.8.8	8.8.8.8
└─Secondary DNS Server	8.8.4.4	8.8.4.4
└─IP Fragmentation	✗	✗
└─ARP Adress Resolution	□	□
└─IGMP Group Management	□	□
└─NetBIOS Name Service	✗	✗
└─Dynamic Host Configuration	✗	□
└─IPv6	✗	✗
└─OS Resource Settings		

Tabelle 3.5: Anpassungen in der Ethernet Network Configuration *Net_Config_ETH_0.h*.

3.2 SD-Karte

Im Fokus dieses Kapitels steht die Inbetriebnahme des SD-Karten Slots des Keil MCB1760 Evaluation Boards. Der Schacht für die microSD-Karte befindet sich unterhalb des Displays, wie Abbildung 2.1 zu entnehmen ist. Das Ziel der Inbetrieb-

3 Implementierungen

nahme ist es, beispielhaft Daten auf die SD-Karte zu schreiben, Daten zu lesen und diese wieder zu löschen. Wie auch schon bei der Ethernet-Applikation in Kapitel 3.1 soll die Implementierung in Rational Rhapsody erfolgen und die IDE Keil uVision lediglich zum Übersetzen und Flashen dienen.

3.2.1 Anforderungen

Ein beispielhaftes Szenario soll die funktionsfähige Inbetriebnahme der SD-Karte demonstrieren. Dabei soll der Joystick bei Betätigung in eine Richtung seine neue Position auf der SD-Karte aufzeichnen. Unter einer Positionsänderung des Joysticks sind die vier Richtungen links, rechts, oben und unten zu verstehen. Wenn der Joystick nach einer Richtungsänderung zurück in die zentrale Position geht, wird das nicht als Positionsänderung gewertet. Die SD-Karte soll sämtliche Aktivitäten und ihren Status über das Display ausgeben. Abbildung 3.8 veranschaulicht das Funktionsprinzip.

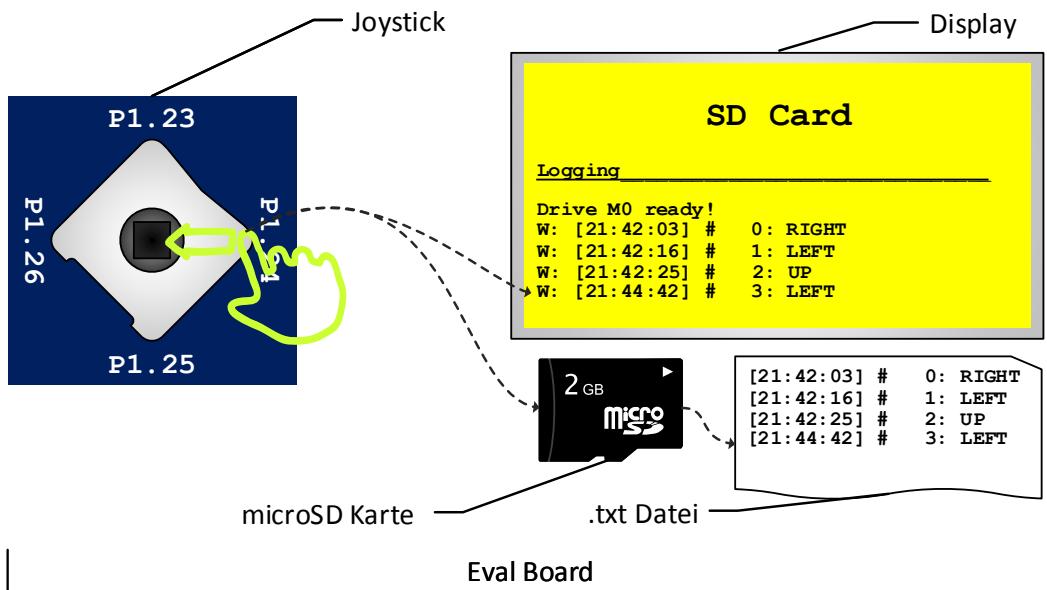


Abbildung 3.8: Beispielhaftes Logging der Joystick Position auf dem Display und auf der SD-Karte.

Zusätzlich ist es möglich, auf den Joystick zu drücken, was im Folgenden als Richtung *SELECT* bezeichnet wird. Die Richtung *SELECT* soll eine besondere Funktion im Beispielszenario einnehmen. Drückt der Benutzer den Joystick zweimal hintereinander, dann soll die SD-Karte die angelegte Log-Datei löschen. Bei erstmaligem Drücken soll die SD-Karte dem Benutzer über das Display mitteilen, dass

die SD-Karte durch erneutes Drücken des Joysticks die angelegte Log-Datei löscht. Wählt der Benutzer jedoch eine andere Richtung, soll die SD-Karte wieder in den Log-Status zurückkehren. Ebenso soll die SD-Karte eine minimale Fehlerbehandlung enthalten und dem Benutzer über das Display entsprechende Fehlermeldungen anzeigen.

Zur Verifizierung der Lesefunktion soll die SD-Karte überprüfen, ob bereits eine Log-Datei durch vorherige Verwendung angelegt wurde. Wenn das der Fall ist, soll die SD-Karte die letzte Zeile der Log-Datei auslesen, die fortlaufende Nummer extrahieren und den Zähler auf diesen Wert setzen.

3.2.2 Architektur

Das Klassendiagramm in Abbildung 3.9 stellt die Architektur des SD-Karten Loggings dar. Im Fokus des Diagramms steht die Klasse SDCard. Sie besitzt eine gerichtete Assoziation zur Klasse Clock und zur Klasse Display. Dadurch kann die Klasse SDCard einen Zeitstempel abfragen und den aktuellen Status auf dem Display ausgeben.

In Abbildung 3.9 links dargestellt sind beiden Klassen Joystick und RunningIndicatorLed, welche in eigenen Threads laufen. Dabei verfügt die Klasse Joystick über eine gerichtete Assoziation zur Klasse SDCard. Somit kann die Klasse Joystick, welche in einem festgelegten Intervall die Joystick Position pollt, die Klasse SDCard über Positionsänderungen informieren. Die Klasse Joystick verfügt über eine weitere Assoziation zur Klasse LedBar, wodurch die Joystick Position mit Hilfe von vier LEDs visualisiert wird. Wie in den vorherigen Implementierungen lässt die Klasse RunningIndicatorLed die LED P1.31 zyklisch blinken und dient lediglich zu

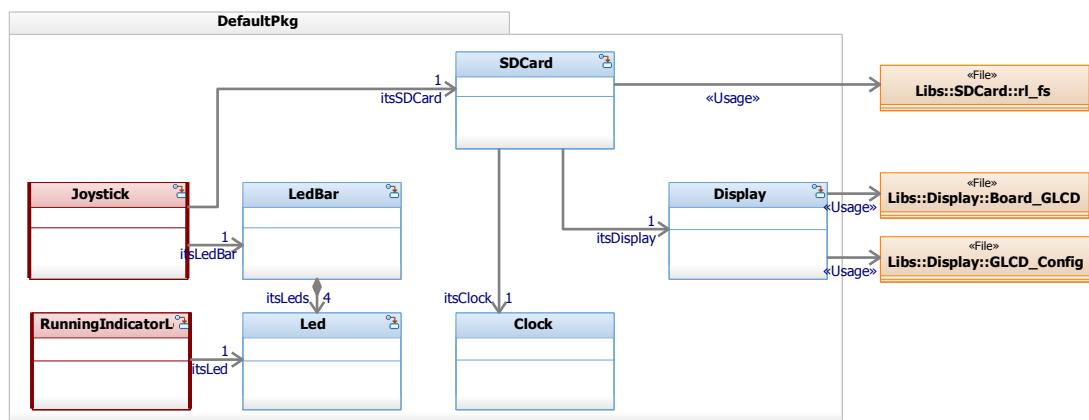


Abbildung 3.9: Klassendiagramm zum Logging der Joystick Positionen auf der SD-Karte. Klassen, die in eigenen Threads laufen sind rot eingezeichnet.

3 Implementierungen

Debugging zwecken. Die in Abbildung 3.9 rechts in orange dargestellten Dateien außerhalb des Pakets DefaultPkg stellen Abhängigkeiten zu externen Bibliotheken dar. Die verwendeten Bibliotheken stammen aus der MDK Middleware und vereinfachen das Betreiben der File System und Graphics Component.

3.2.3 Design und Coding

Dieses Kapitel behandelt Attribute, Funktionen und Statecharts wichtiger Klassen.

SD-Karte

Die Implementierung der SD-Karte erfolgt durch die MDK Middleware File System Component in der Version 6.9.8. Die File System Component unterstützt eine Vielzahl an Speichern und Speichergeräten, welchen jeweils ein Laufwerksbuchstabe zugewiesen ist. Der Laufwerksbuchstabe wird an Systemroutinen übergeben, wo er zur Initialisierung eines Dateisystems verwendet wird. Das Dateisystem, wie beispielsweise File Allocation Table (FAT) File System oder Embedded File System (EFS) wird in Abhängigkeit vom Laufwerk festgelegt. Die Klasse SDCard mit ihren Attributen und Operationen ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Dabei legt das Attribut `drive` den Laufwerksbuchstaben „M0:“ und das damit verbundene Dateisystem FAT fest.

Initialisierung: Das Sequenzdiagramm in Abbildung 3.11 stellt den Ablauf der Operation `initAndMount` dar. Dabei erfolgt das Initialisieren und Mounten des Dateisystems über die Systemroutinen `finit` und `fmount`. Außerdem sind die entsprechenden Statusmeldungen an das Display im Erfolgsfall (grün) und Fehlerfall (rot) eingezeichnet.

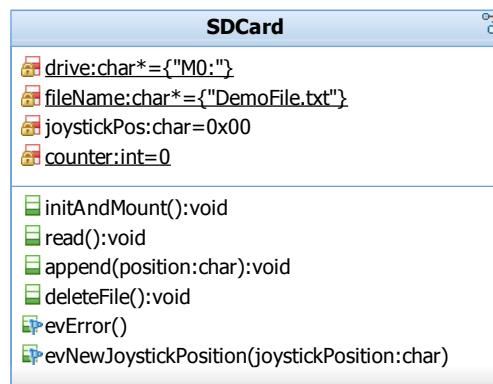


Abbildung 3.10: Klassendiagramm der SD-Karte.

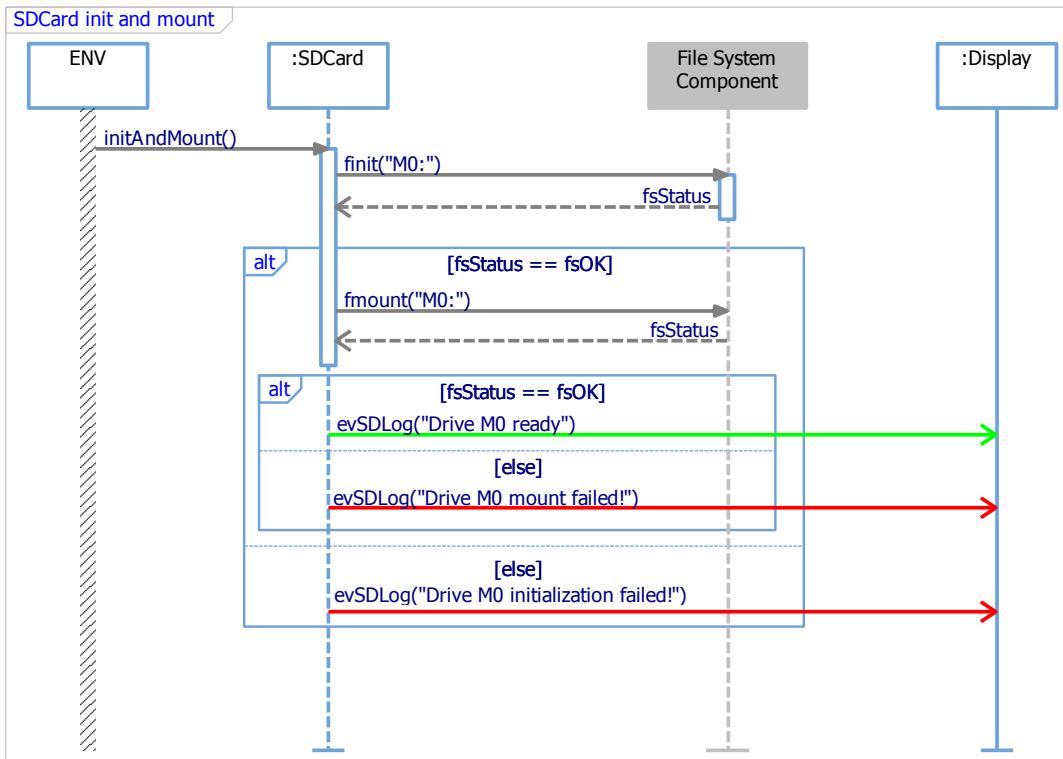


Abbildung 3.11: Initialisieren und Mounten der SD-Karte.

Lesen: Leseoperationen erfolgen mit Hilfe der Standard Input und Output Library `stdio.h`. Die Library `stdio.h` benutzt Datenströme (Stream) zur Kommunikation mit physikalischen Peripheriegeräten wie Tastatur und Drucker, oder auch zur Kommunikation mit jeder anderen Art von Dateien, welche das System unterstützt. Dabei werden die Streams immer identisch angewendet, unabhängig davon, ob mit einem Gerät oder einer Datei kommuniziert wird. Durch die Funktion `fopen` wird ein Stream geöffnet und mit einem Gerät oder einer Datei verbunden. Bei erfolgreichem Öffnen des Streams gibt die Funktion `fopen` einen Zeiger auf ein FILE-Objekt zurück. Dieser Zeiger beinhaltet alle Informationen des Datenstroms und muss bei jeder weiteren Dateioperation als Parameter übergeben werden.

Der für dieses Szenario implementierte Lese-Mechanismus ist als Sequenzdiagramm in Abbildung 3.12 abgebildet. Nach dem Öffnen des Streams wird mit der Funktion `fgets` Zeile für Zeile aus der Log-Datei ausgelesen, bis das Ende der Datei erreicht ist.

Da alle Zeilen der Log-Datei das gleiche Format haben, kann aus der letzten Zeile die fortlaufende Nummer extrahiert und zum Setzen des Zählers benutzt werden (siehe Abbildung 3.14(a)). Den entsprechenden Ausschnitt aus der Operation `read`

3 Implementierungen

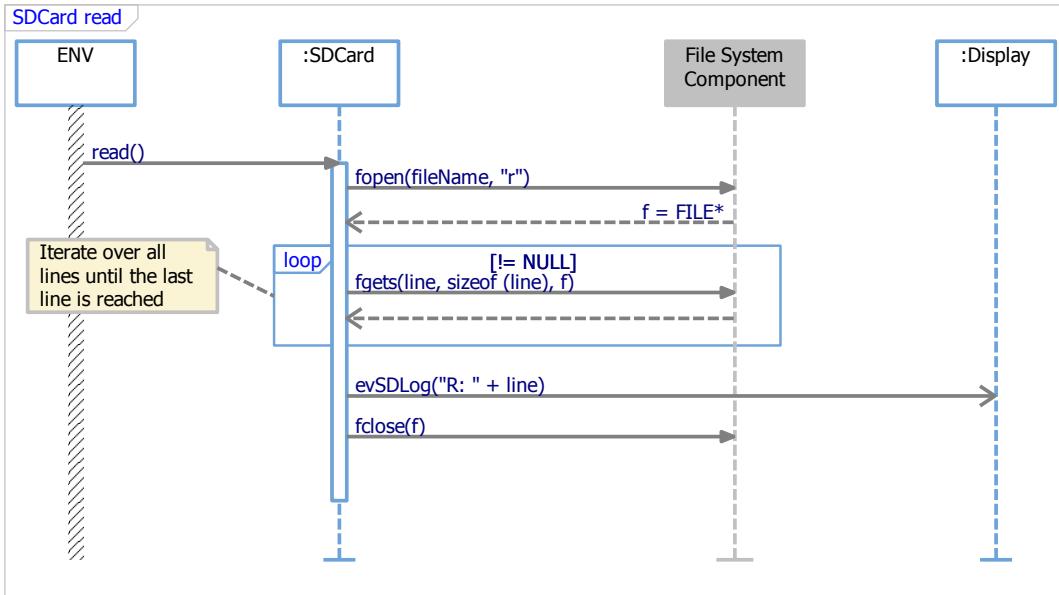


Abbildung 3.12: Lesen der SD-Karte.

zeigt Quelltext 3.3. Dabei wird zunächst der Teil der Zeichenkette ab dem #-Symbol extrahiert. Danach wird mit der Funktion `scanf` der Dezimalwert ausgelesen und in `counter` geschrieben. Im Anschluss wird das Event `evSDLog` mit der Bezeichnung „R:“ für *Read* und der letzten gelesenen Zeile als Parameter an das Display gefeuert, wie Abbildung 3.14(b) zeigt. Nach erfolgter Dateioperation muss der Datenstrom wieder mittels `fclose` geschlossen werden.

```

1 // Set counter to last value
2 substring = strstr(line, "# ");
3 if (substring != NULL)
4 {
5     /* Found "# " in row. Extract decimal */
6     sscanf(substring + 3, "%d", &counter);
7 }
  
```

Quelltext 3.3: Extrahieren des aktuellen Zählstandes aus dem Logfile.

Schreiben: Wie die Leseoperationen bedienen sich auch die Schreiboperationen bei der Standard Input und Output Library `stdio.h`. Gleichermassen gilt es zuerst einen Stream zu öffnen um einen Zeiger auf ein `FILE`-Objekt zu erhalten. Im Gegensatz zur Leseoperation, welche die Funktion `fopen` mit dem Parameter „r“ für den *Read mode* aufruft, wird bei der Schreiboperation der Parameter „a“ für

den *Append mode* verwendet. Der *Append mode* öffnet eine bestehende Datei und fügt dieser Inhalte hinzu. Falls die Datei noch nicht besteht, wird eine leere Datei angelegt. Wenn eine Datei im *Append mode* geöffnet wird, werden die neuen Inhalte stets am Ende der Datei hinzugefügt.

Der implementierte Schreib-Mechanismus ist in Abbildung 3.13 als Sequenzdiagramm dargestellt. Nach dem Öffnen des Datenstroms wird die Zeichenkette `str` durch die Funktion `fprintf` in den Stream geschrieben. Die Funktion `fflush` sorgt letztendlich dafür, dass die Schreiboperation ausgeführt wird. Das bedeutet, dass die zugehörigen Buffer geleert und deren Inhalt in die entsprechende Datei geschrieben wird. Sollte der Rückgabewert der Funktion `fflush` ungleich Null sein, so ist ein Fehler aufgetreten. Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn keine SD-Karte im Slot eingelegt ist. Die Klasse `SDCard` feuert in diesem Fall das Event `evSDLLog` mit einer entsprechenden Fehlermeldung an das Display, sowie das Event `evError` an sich selbst (siehe rote Markierungen in Abbildung 3.13). Ausgelöst durch das

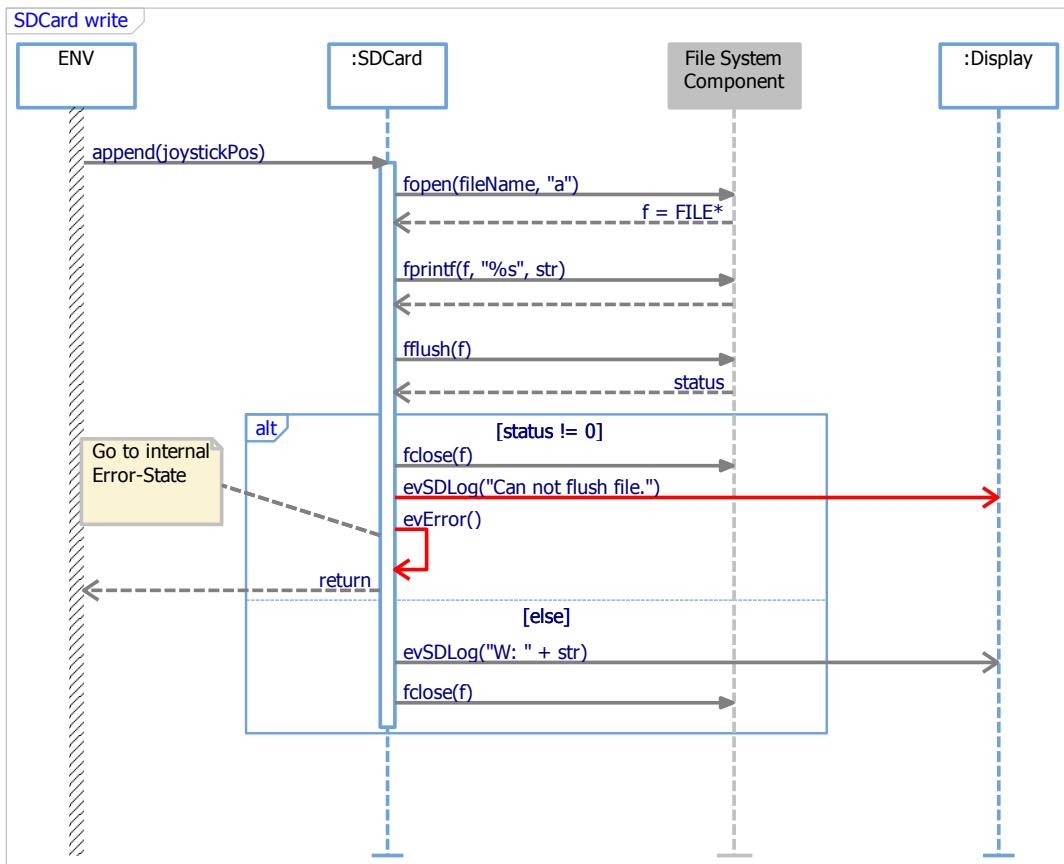
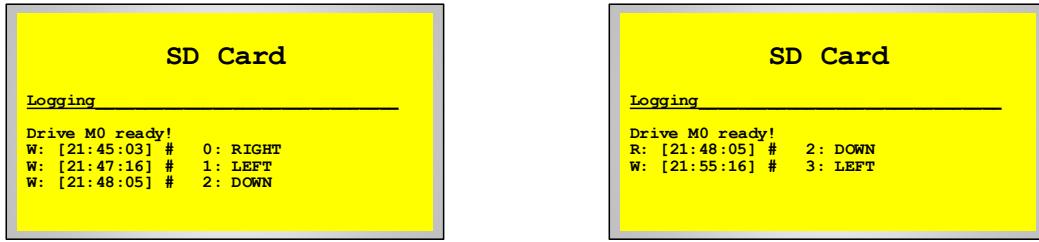


Abbildung 3.13: Schreiben auf die SD-Karte.

3 Implementierungen



(a) Erstellen einer leeren Datei nach Reset und dreifache Schreiboperation.

(b) Auslesen einer bestehenden Datei nach einem Reset und einmaliges Schreiben.



(c) Erstmaliges Betätigen von SELECT fordert zum Wiederholen auf.

(d) Erneutes Betätigen von SELECT löscht die Datei.

Abbildung 3.14: Verschiedene Statusausgaben auf dem Display.

Event `evError` führt die Klasse `SDCard` eine entsprechende Fehlerbehandlung durch. Bei einer erfolgreichen Schreiboperation feuert die Klasse `SDCard` ebenfalls das Event `evSDLog` an das Display. In diesem Fall beinhaltet der Parameter des Events `evSDLog` den Bezeichner „W“ für *Write* sowie die aktuell geschriebene Zeile. Zuletzt muss der Datenstrom durch die Funktion `fclose` wieder geschlossen werden.

Datei anlegen: Das Anlegen einer Datei geschieht implizit beim Aufruf der Funktion `fopen`. Dabei ist der Übergabeparameter für den Zugriffsmodus entscheidend. Mit „a“ für *Append mode* wird nur dann eine leere Datei angelegt, wenn diese noch nicht existiert. Mit dem Parameter „w“ für *Write mode* wird bei jedem Aufruf eine leere Datei angelegt. Eine existierende Datei wird dabei überschrieben.

Datei löschen: Zum Löschen einer Datei dient die Funktion `fdelete`. Als Parameter wird dieser Funktion der Name einer zu löschen Datei oder eines Verzeichnisses übergeben. Mit einem weiteren Parameter „/S“ wird spezifiziert, ob bei Angabe eines Verzeichnisses alle Dateien und Unterverzeichnisse ebenfalls gelöscht werden

sollen. Die Funktion `fdelete` liefert einen Rückgabewert vom Typ `fsStatus` der eine detaillierte Fehlerbehandlung ermöglicht.

Die implementierte Löschprozedur im Rahmen des Beispielszenarios ist in Abbildung 3.15 in grün gekennzeichnet. Zunächst wird nach einem RESET des Targets die SD-Karte initialisiert und eine Leseoperation ausgeführt, so dass sich die SD-Karte im *Read State* befindet. Der Trigger für nahezu alle weiteren Transitionen ist das Event `evNewJoystickPosition`, welches von der Klasse `Joystick` abgefeuert wird. Bei jedem Empfangen wird ausgewertet, ob dessen Parameter der Richtung *SELECT* entspricht. Ist das der Fall, so geht die SD-Karte in die Löschprozedur über, indem zunächst der State *Confirm_Delete* aktiviert wird. In diesem State feuert die Klasse `SDCard` das Event `evSDLog` an das Display, wodurch der Benutzer zum erneuten Betätigen der Richtung *SELECT* aufgefordert wird (siehe Abbildung 3.14(c)). Trifft wiederholt ein Event mit der Richtung *SELECT* als Parameter ein, wird schließlich der State *Delete_File* eingenommen. Das führt letztendlich zum Aufruf der Operation `deleteFile`. Wenn der Parameter des Events `evNewJoystickPosition` ungleich der Richtung *SELECT* ist, kehrt die SD-Karte immer in den *Log State* zurück.

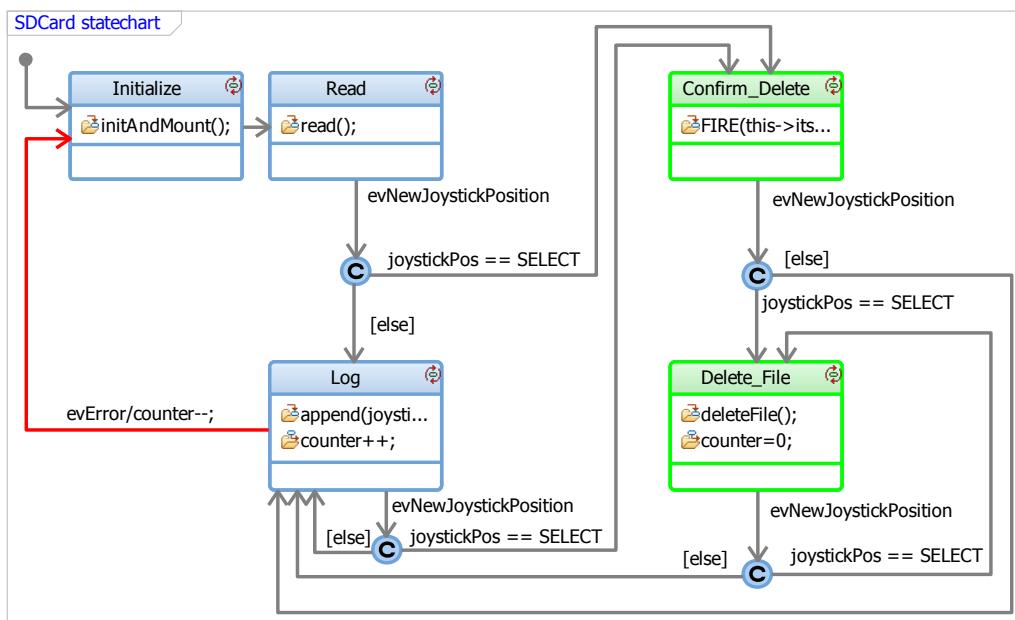


Abbildung 3.15: Statechart zum Initialisieren, Lesen und Schreiben der SD-Karte (blau), sowie zum Löschen einer Datei (grün).

Joystick

Die Implementierung des Joysticks entspricht im Wesentlichen der Umsetzung aus Kapitel 3.1.3, mit der Ergänzung, dass an dieser Stelle auch die Richtung *SELECT* ausgewertet wird. Dazu ist es nötig, Zeile 4 in Quelltext 3.2 auszkommentieren, so dass erweiterte Richtungsinformationen vorhanden sind. Durch die erweiterten Richtungsinformationen ergeben sich dementsprechend andere Bitmuster, was eine Anpassung der Enumeration DIRECTION erfordert. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Klasse Joystick bei jeder neuen Richtung das Event `evNewJoystickPosition` an die Klasse SDCard sendet.

Clock

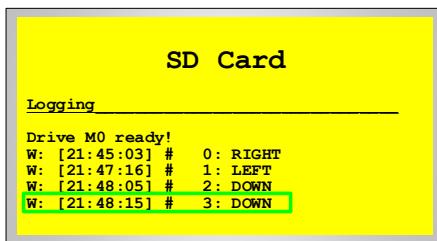
Da ein Logging nur dann Sinn macht, wenn es auch mit einem Zeitstempel versehen ist, wurde die Klasse `Clock` implementiert. Sie greift auf die Real-Time Clock (RTC) des Keil MCB1760 Eval Boards zu. Die Prozedur zur Initialisierung der RTC ist in Quelltext 3.4 dargestellt. Hier ist zu beachten, dass die auskommentierten Blöcke von Zeile 12 bis Zeile 14 und Zeile 17 bis Zeile 19 einmalig vor dem Flashen des Targets einkommentiert und entsprechend aktualisiert werden müssen. Damit wird das Datum und die Uhrzeit des Targets eingestellt und bleibt solange aktuell, bis das Target von der Spannungsversorgung getrennt wird. Zur Ermittlung der Uhrzeit liest die Klasse `Clock` die entsprechenden Register aus und stellt deren Inhalt über Operationen `getHour`, `getMin` und `getSec` zur Verfügung (NXP Semiconductors, 2010, S. 558 ff).

```
1 /* Enable CLOCK into RTC */
2 LPC_SC->PCONP |= (1 << 9);
3
4 /* Disable RTC clock, reset clock, Enable RTC calibration */
5 LPC_RTC->CCR = ((1 << SBIT_CTCRST) | (1 << SBIT_CCALEN));
6 LPC_RTC->CALIBRATION = 0x00;
7 LPC_RTC->CCR = (1 << SBIT_CLKEN); /* Enable the clock for RTC */
8
9 // Set Date and Time only once
10 // Comment these lines after setting the time and date
11 // Set Date 29th May 2017
12 //LPC_RTC->DOM = 29; // Update date value
13 //LPC_RTC->MONTH = 5; // Update month value
14 //LPC_RTC->YEAR = 2017; // Update year value
15
16 // Set Time 22:05:25 AM
17 //LPC_RTC->HOUR = 22; // Update hour value
18 //LPC_RTC->MIN = 05; // Update min value
19 //LPC_RTC->SEC = 25; // Update sec value
```

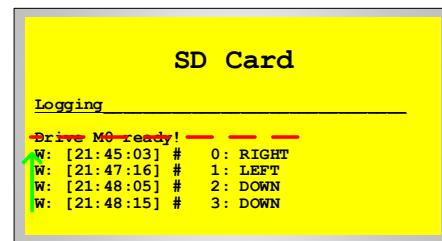
Quelltext 3.4: Initialisierung der RTC.

Display

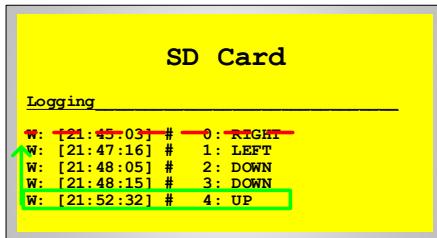
Das Display dient in diesem Szenario als Statusanzeige und soll über erfolgreiche Lese- und Schreiboperationen informieren, sowie auch Fehlermeldungen darstellen. Dazu soll das Display das Funktionsprinzip einer Kommandozeile nachahmen, in welcher das neuste Ereignis an unterster Stelle hinzugefügt wird. Beim Erreichen der maximalen Zeilenanzahl sollen folglich alle Zeilen um eine Position nach oben geschoben werden, was dazu führt, dass die oberste Zeile entfernt wird. Die maximale Zeilenanzahl wird über das Attribut `maxLoggedLines` festgelegt und hat initial den Wert sieben. Das Funktionsprinzip ist beispielhaft für eine maximale Zeilenanzahl von fünf in Abbildung 3.16 dargestellt.



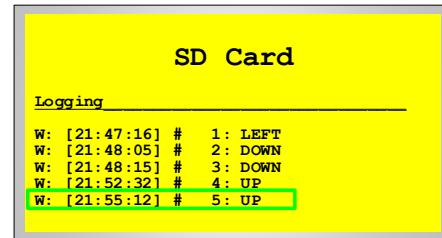
(a) Neues Ereignis tritt ein. Zeile wird unten hinzugefügt. Maximale Zeilenanzahl erreicht.



(b) Neues Ereignis tritt ein. Oberste Zeile wird gelöscht. All weiteren Zeilen werden eine Position nach oben geschoben.



(c) Neue Zeile wird unten hinzugefügt. Neues Ereignis tritt ein. Oberste Zeile wird gelöscht. All weiteren Zeilen werden eine Position nach oben geschoben.



(d) Neue Zeile wird unten hinzugefügt.

Abbildung 3.16: Funktionsprinzip einer Kommandozeile auf dem Display. Das neuste Ereignis wird immer an unterster Stelle hinzugefügt (grüner Rahmen). Wird eine maximale Zeilenanzahl erreicht, wird die oberste Zeile gelöscht (rote Linie). Alle anderen Zeilen werden um eine Position nach oben geschoben (grüner Pfeil).

3.2.4 Konfigurieren des Keil Projekts

Ebenso wie in der Ethernet-Applikation in Kapitel 3.1 wird das Blinky-Beispielprojekt aus dem RXF *Rpy_CPP_CMSIS_Keil5_ARM_MCB1700_TD* von Willert eingesetzt. Somit ist eine lauffähige Entwicklungsumgebung von Rational Rhapsody über das Willert RXF bis zur IDE Keil uVision hergestellt. Im Weiteren werden die wichtigsten Anpassungen in Konfiguration des Keil Projekts beschrieben.

Manage Run-Time Environment

Zur Verwendung der SD-Karte ist es nötig, dem Keil Projekt mit Hilfe des Konfigurationsassistenten *Manage Run-Time Environment*, Software Komponenten hinzuzufügen. Zuallererst wird der Software Pack *Keil::MDK-Middleware* in der Version 7.4.1 (2017-04-21) dem Projekt hinzugefügt. In diesem Paket ist die File System Component in der Version 6.9.8 (2017-04-21) enthalten. Zur Verwendung der File System Component wird der *ARM::CMSIS:CORE* in der Version 5.0.1 benötigt. Zwar erstellt die File System Component keinen eigenen Thread, greift aber dennoch auf die Schnittstellen des Betriebssystems zu. Das geschieht beispielsweise dann, wenn eine Datei geöffnet wird und mittels Mutex ein exklusiver Zugriff auf die Datei gewährleistet wird. Die entsprechende Anpassung in der Run-Time Environment ist in Tabelle 3.6 rot markiert.

Die File System Component unterstützt sowohl das Betreiben rudimentärer Flash-Speicher-Chips in NAND- oder NOR-Architektur, als auch den Datenaustausch mit einem USB Massenspeicher oder einer SD Speicherkarte. Die benötigten Komponenten der File System Component für den Einsatz der SD Speicherkarte sind in Tabelle 3.6 gelb gekennzeichnet.

CMSIS Configuration

Die CMSIS Configuration behandelt die Einstellung des CMSIS RTX Kernel. Zwar legt die File System Component keine neuen Threads an, benötigt aber dennoch das CMSIS-RTOS zum Betrieb. Beispielsweise werden die Mechanismen zum Erstellen eines Mutex verwendet. Die Anforderungen an den CMSIS RTX Kernel werden in der Datei *RTX_Conf_CM.c* eingepflegt, welche Teil der CMSIS Component ist. Diese Datei kann über den *Configuration Wizard* von Keil editiert werden. Im Abschnitt *Thread Configuration* in der Datei *RTX_Conf_CM.c* spezifiziert der erste Parameter *Number of concurrently running user threads* die Anzahl nebenläufiger Tasks. Die Tasks der SD-Karten Applikation sind in Tabelle 3.7 aufgelistet. Dabei sind die Tasks mit der Ursache CMSIS-RTOS und Willert RXF identisch zu den Tasks in Tabelle 3.2 aus der Ethernet-Applikation.

Gemäß ARM Keil Group (2017d) geht der Task *os_idle_demon* nicht in die Anzahl der gleichzeitig laufenden Tasks mit ein, weshalb der Parameter *Number of concurrent running user threads* auf den Wert fünf gesetzt wird. Dementsprechend

Software Component	Blinky		SD Card	
	Sel. Variant	Version	Sel. Variant	Version
Board Support	MCB1700	1.0.0	MCB1700	1.0.0
Graphic LCD (API)		1.0.0		1.0.0
Graphic LCD	<input type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
CMSIS	<input checked="" type="checkbox"/>			
CORE		4.3.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
CMSIS Driver				
SPI (API)		2.01		2.2.0
SPI	<input type="checkbox"/>	2.1	<input type="checkbox"/>	2.1.0
SSP	<input type="checkbox"/>	2.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.7.0
Compiler	ARM Compiler	1.2.0	ARM Compiler	1.2.0
Event Recorder	<input type="checkbox"/> DAP	1.1.0	<input type="checkbox"/> DAP	1.1.0
I/O				
File	<input type="checkbox"/> File System	1.2.0	<input checked="" type="checkbox"/> File System	1.2.0
STDERR	<input type="checkbox"/> User	1.2.0	<input type="checkbox"/> User	1.2.0
STDIN	<input type="checkbox"/> User	1.2.0	<input type="checkbox"/> User	1.2.0
STDOUT	<input type="checkbox"/> User	1.2.0	<input type="checkbox"/> User	1.2.0
TTY	<input type="checkbox"/> User	1.2.0	<input type="checkbox"/> User	1.2.0
Device				
GPDMA	<input type="checkbox"/>	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.2.0
GPIO	<input type="checkbox"/>	1.1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.1.0
PIN	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0
Startup	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0
File System	MDK-Pro	6.9.8	MDK-Pro	6.9.8
CORE	<input type="checkbox"/> SFN	6.9.8	<input checked="" type="checkbox"/> LFN	6.9.8
Drive				
Memory Card	0	6.9.8	1	6.9.8
NAND	0	6.9.8	0	6.9.8
NOR	0	6.9.8	0	6.9.8
RAM	<input type="checkbox"/>	6.9.8	<input type="checkbox"/>	6.9.8
USB	0	6.9.8	0	6.9.8

Tabelle 3.6: Heraufsetzen des CMSIS:CORE (rot), benötigte Komponenten der File System Component und deren Abhängigkeiten (gelb), sowie die Komponenten zum Betreiben des Displays (orange).

Task Name	Priorität	Ursache
osTimerThread	1	CMSIS-RTOS
main	2	CMSIS-RTOS
os_idle_demon	255	CMSIS-RTOS
WST_Monitor_receiveTask	3	Willert RXF
RunningIndicator	4	SD-Karte Applikation
Joystick	5	SD-Karte Applikation

Tabelle 3.7: Verwendete Task für den Betrieb der SD-Karte und deren Ursache.

3 Implementierungen

ist auch der Parameter *Number of threads with user-provided stack size* auf den Wert vier zu setzen, da hier der main-Task nicht mitgezählt wird.

Abhängig vom gewählten Drive Type gibt ARM Keil Group (2017a) vor, wie die Parameter bezüglich der *Default*, *Main* und *Total Thread stack size* zu konfigurieren sind. Für den hier gewählten Drive Type *Memory Card drive 0* in Kombination mit dem CMSIS Treiber für SPI sind keine weiteren Anpassung nötig. Die Änderungen in der Datei *RTX_Conf_CM.c* gegenüber dem Blinky-Projekt sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
⊖-Thread Configuration		
└-Number of concurrent running user threads	6	5 (-1)
└-Default Thread stack size [bytes]	200	200
└-Main Thread stack size [bytes]	1024	1024
└-Number of threads with user-provided stack size	5	4 (-1)
└-Total stack size [bytes] for threads with user-provided stack size	4096	5632 (+1536)
└-Check for stack overflow	☒	☒
└-Processor mode for thread execution	Privileged mode	Privileged mode
⊕-RTX Kernel Timer Tick Configuration		
⊕-System Configuration		

Tabelle 3.8: Anpassungen in der RTX Configuration *RTX_Conf_CM.c* für die SD-Karte.

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle noch auf die Anforderungen bezüglich Mutexes eingegangen, auch wenn im Rahmen dieser Implementierung keine Anpassung nötig sind. Sollen mehr als drei Dateien gleichzeitig geöffnet und bearbeitet werden, muss die Anzahl der Mutexobjekte angepasst werden. Diese Änderung kann nicht über den *Configuration Wizard* erfolgen, sondern muss direkt in der Datei *RTX_Conf_CM.c* manuell durchgeführt werden. Dabei ist der Parameter *OS_MUTEXCNT* zu editieren, welcher standardmäßig auf den Wert acht gesetzt ist. Der Parameter *OS_MUTEXCNT* setzt sich dabei folgendermaßen zusammen: 2 (internal stdio operations) + 3 (stdin, stdout und stderr file streams) + 3 für jede geöffnete Datei.

Device Configuration

Die Dateien *startup_LPC17xx.s* (*Startup*), *startup_LPC17xx.c* (*Startup*) und *RTE_Device.h* (*Startup*) implementieren den Start-up Code, welcher direkt nach einem RESET des Targets ausgeführt wird. Alle drei Dateien gehören zur Device Component und können ebenfalls über den *Configuration Wizard* bearbeitet werden.

Von größerem Interesse ist zunächst die Datei *startup_LPC17xx.s (Startup)* bei der festgelegt wird, wie viel Speicher für Stack und Heap zu reservieren sind.

Bei Verwendung der File System Component ist eine Vergrößerung der Stack Size um 512 Bytes nötig. Eine Anpassung des Heaps ist ebenfalls erforderlich und hängt dabei mit der Anzahl gleichzeitig geöffneter Dateien zusammen. Für jede geöffnete Datei müssen 512+96 Bytes reserviert werden. In diesem Fall soll nur eine Datei gleichzeitig geöffnet werden (ARM Keil Group, 2017a). Wie Tabelle 3.9 zu entnehmen ist, wurde der Heap insgesamt um 4096 Bytes vergrößert. Die Differenz von 3488 Bytes kommt für den Betrieb des Logging-Mechanismus auf dem Display zum Einsatz. Dieser Mechanismus basiert auf der Klasse `OMString`, welche Teil des Rhapsody OXF ist und zusätzlichen Heap benötigt.

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
└-Stack Configuration └-Stack Size (in Bytes)	0x0000 0200	0x0000 0400 (+512)
└-Heap Configuration └-Heap Size (in Bytes)	0x0000 1000	0x0000 2000 (+4096)

Tabelle 3.9: Anpassungen in der Startup Configuration *startup_LPC17xx.s (Startup)* für die SD-Karte.

Die Datei *RTE_Device.h (Startup)* muss ebenfalls angepasst werden. In ihr erfolgt die Pin Konfiguration für die verschiedenen Schnittstellen des Keil MCB1760 Eval Boards. Da in dieser Implementierung die SD-Karte mittels SPI angesprochen wird, müssen die entsprechenden Pins dem SPI Treiber *Driver_SPI0* zugewiesen werden. Die Zuordnung der Pins zu den jeweiligen SPI-Leitungen ist in Tabelle 3.10 abgebildet. Der SPI Treiber *Driver_SPI1* ist ebenfalls aktiviert, er ist zum Betrieb des Displays nötig.

File System Configuration

Die Konfiguration des File Systems geschieht über die Dateien *FS_Config.c (CORE)* und *FS_Config_MC_0.h (Drive:Memory Card)*. Durch die zuvor erfolgte Konfiguration der *Run-Time Environment* wurden die beiden Dateien der File System Component hinzugefügt. Die Datei *FS_Config.c (CORE)* kann bei den Standardeinstellungen belassen werden, wohingegen bei der Datei *FS_Config_MC_0.h (Drive:Memory Card)* eine wichtige Änderung vorzunehmen ist. Dies betrifft den Parameter *Memory Card Interface Mode*, welcher von *Native* auf *SPI* umgestellt wird.

3 Implementierungen

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
USB Controller [Driver_USBD and Driver_USBH]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ENET (Ethernet Interface) [Driver_ETH_MAC0]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I2C0 (Inter-integrated Circuit Interface 0) [Driver_I2C0]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I2C1 (Inter-integrated Circuit Interface 1) [Driver_I2C1]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I2C2 (Inter-integrated Circuit Interface 2) [Driver_I2C2]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UART0 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UART1 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UART2 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UART3 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CAN1 Controller [Driver_CAN1]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CAN2 Controller [Driver_CAN2]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SSP0 (Synchronous Serial Port 0) [Driver_SPI0]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pin Configuration		
SSP0_SSEL		P0_16
SSP0_SCK		P0_15
SSP0_MISO		P0_17
SSP0_MOSI		P0_18
DMA		
Tx	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rx	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SSP1 (Synchronous Serial Port 1) [Driver_SPI1]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SPI (Serial Peripheral Interface [Driver_SPI2])	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I2S0 (Integrated Interchip Sound 0 [Driver_SAI0])	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabelle 3.10: Anpassungen in der Device Configuration *RTE_Device.h (Startup)*.

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
Memory Card Drive 0		
Connected to hardware via Driver_MCI#	0	0
Connected to hardware via Driver_SPI#	0	0
Memory Card Interface Mode	Native	SPI
Drive Cache Size	4 KB	4 KB
Locate Drive Cache and Drive Buffer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Filename Cache Size	0	0
Use FAT Journal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabelle 3.11: Anpassungen in der File System Configuration *FS_Config_MC_0.h (Drive:Memory Card)*.

3.3 WLAN

In diesem Kapitel wird das Keil MCB1760 Evaluation Board um eine WLAN-Schnittstelle ergänzt. Das Ziel dabei ist, dass zwei Eval Boards beliebige Daten bidirektional mittels WLAN austauschen können. Da das Eval Board über keine eigene WLAN-Antenne verfügt, ist es nötig eine externe Antenne an das MCB1760 Eval Board anzubinden. Dazu wird das ESP8266 WLAN-Modul verwendet. Wie in Abbildung 3.17 dargestellt, soll die Kommunikation zwischen dem Eval Board und WLAN-Modul mittels UART erfolgen.

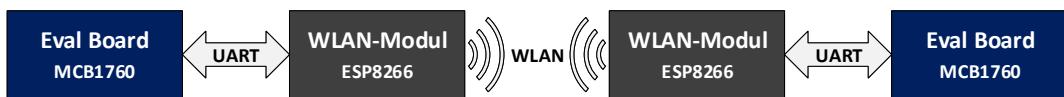


Abbildung 3.17: Funktionsprinzip der Kommunikation zwischen zwei MCB1760 Evaluation Boards über WLAN unter Verwendung von ESP8266 WLAN-Modulen.

Eine detaillierte Skizze der Entwicklungsumgebung zeigt Abbildung 3.18. Oben, ganz links und rechts sind die beiden Eval Boards abgebildet. Dazwischen befinden sich auf einem Steckbrett die beiden WLAN-Module. Die Eval Boards sind jeweils über ihre serielle Schnittstelle mit einem WLAN-Modul verbunden (bezeichnet als *Serielle Datenübertragung 2*). Dabei kann ein Eval Board sowohl Daten vom WLAN-Modul empfangen, als auch senden. Wie in Abbildung 3.18 beschriftet, wird das linke WLAN-Modul als Soft Access Point betrieben. Es erstellt somit ein WLAN-Netzwerk, zu welchem ein beliebiger Teilnehmer eine Verbindung aufbauen kann. In diesem Zusammenhang stellt das rechte WLAN-Modul einen Teilnehmer dar, welcher im Betriebsmodus Station arbeitet und eine Verbindung zum WLAN-Netzwerk herstellt. Das Funktionsprinzip der WLAN-Module basiert nun darauf, dass die beiden WLAN-Module über ihre serielle Schnittstelle Daten empfangen und diese unverändert über WLAN weiterleiten. Umgekehrt werden über WLAN empfangende Daten unverändert an der seriellen Schnittstelle ausgegeben.

Die in grau gekennzeichnete USB-Verbindung *Serielle Datenübertragung 1* dient zum Flashen der WLAN-Module. Des Weiteren wird über diese Schnittstelle ein Logging ausgegeben, welches die Empfangenen und Versendeten Datenpakete auflistet. Das Logging kann mittels eines Terminal-Programms am entsprechenden COM-Port des PCs ausgelesen werden. Die in weiß abgebildeten USB-Verbindungen von den Eval Boards zum USB Hub dienen lediglich zur Spannungsversorgung.

Des Weiteren ist jedes WLAN-Modul mit einer roten und einer grünen LED zur Statusanzeige auf dem Steckbrett verbunden. Die rote LED blinkt zyklisch mit einer Periodendauer von einer Sekunde und signalisiert, dass das WLAN-Modul in Betrieb ist. Beim Betriebsmodus Soft Access Point leuchtet die grüne LED, sobald sich ein

3 Implementierungen

Teilnehmer mit dem WLAN-Netzwerk verbunden hat. Befindet sich das WLAN-Modul im Modus Station leuchtet die grüne LED, sobald eine Verbindung zu einem WLAN-Netzwerk besteht.

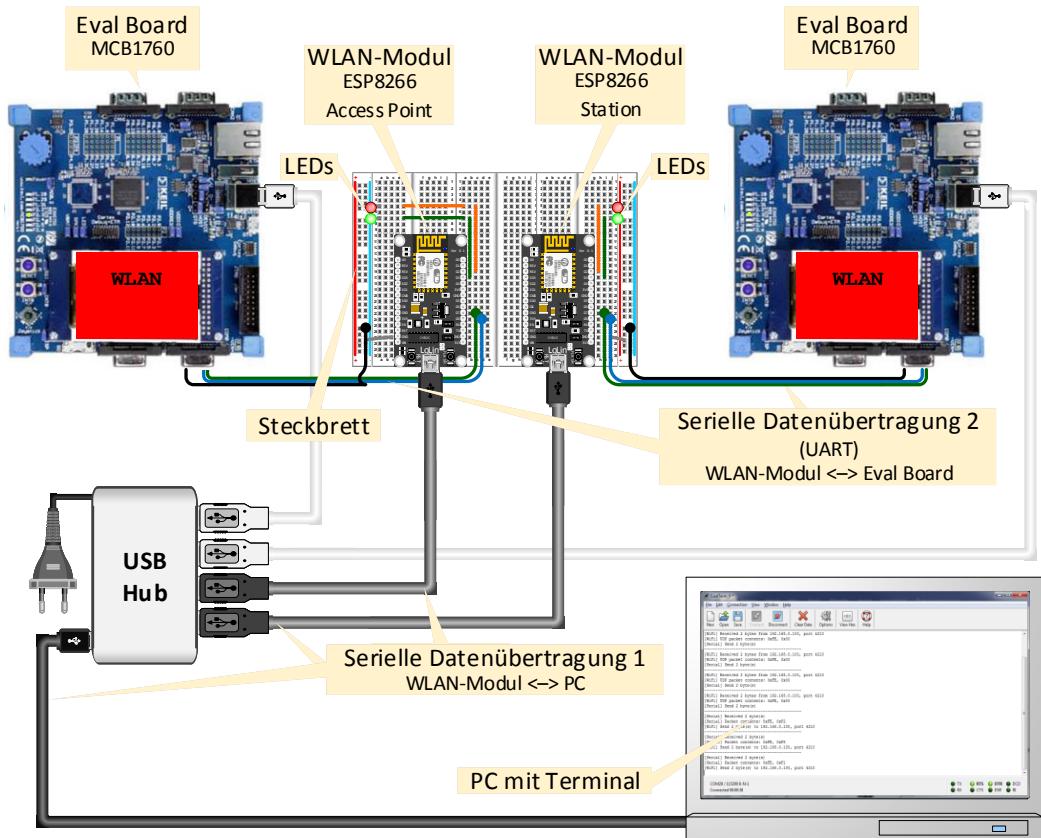


Abbildung 3.18: Demonstrator für die Kommunikation zwischen zwei MCB1760 Evaluation Boards über WLAN unter Verwendung von ESP8266 WLAN-Modulen.

3.3.1 Anforderungen

Zum Nachweis einer funktionstüchtigen WLAN-Kommunikation dient ein beispielhaftes Szenario. Dabei sollen LEDs durch den Joystick auf dem jeweils anderen Eval Board ein- und ausgeschaltet werden, so wie es bereits bei der Ethernet-Applikation (siehe Kapitel 3.1.1) umgesetzt ist. Das Display soll in der WLAN-Applikation jedoch nur die zuletzt gesendete und empfangene Position anzeigen. Hintergrund ist, dass im Vergleich zur Ethernet-Applikation die IP-Adresse für das Eval Board unbekannt ist, da sie im WLAN-Modul festgelegt wird.

3.3.2 Architektur

Die Software-Architektur für die Eval Boards ist in Abbildung 3.19 als Klassendiagramm dargestellt. Der wesentliche Unterschied zur Ethernet-Applikation ist, dass die dort verwendete Basisklasse `EthernetController` durch die Basisklasse `UartController` ersetzt wird. Von ihr werden die beiden Spezialisierungen `UartTransmitter` und `UartReceiver` abgeleitet. Diese beiden Klassen dienen zum Senden und Empfangen von Datenpaketen über die serielle Schnittstelle. Damit sie den Programmablauf nicht blockieren, beispielsweise während der `UartReceiver` auf ein Datenpaket wartet, werden sie in eigenen Tasks ausgeführt. Links in Abbildung 3.19 sind die beiden Klassen `RunningIndicatorLed` und `Joystick` abgebildet. Sie nehmen die selbe Funktion ein, wie in der Ethernet-Applikation. Das gleiche gilt für die Klassen `LedBar`, `Display` und `Led` (siehe Kapitel 3.1.2).

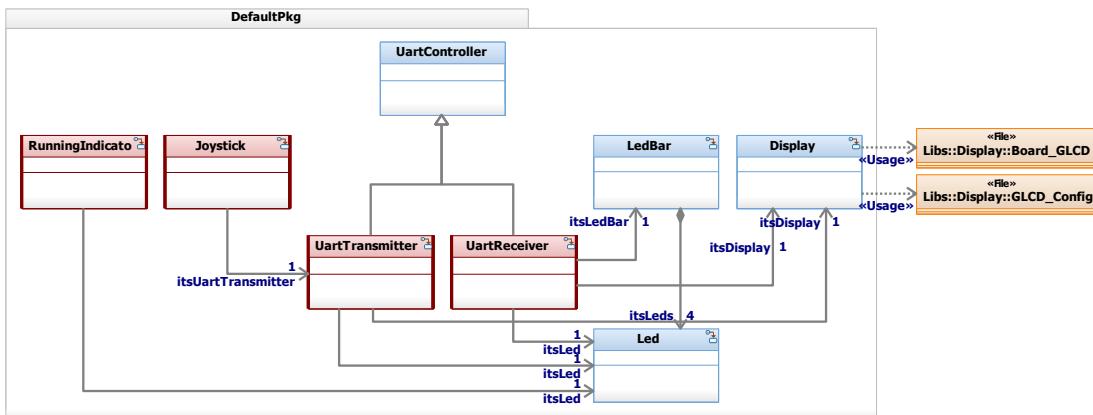


Abbildung 3.19: Klassendiagramm zur WLAN-Kommunikation. Klassen, die in eigenen Tasks laufen sind rot eingezeichnet.

3.3.3 Design und Coding

Im Folgenden werden Attribute, Funktionen und Statecharts wichtiger Klassen vorgestellt.

UART-Controller, Transmitter und Receiver

Initialisierung: Die Implementierung des UART-Controllers erfolgt nach NXP Semiconductors, 2010, S. 298 ff, wobei die UART0-Schnittstelle verwendet wird. Neben dem Konfigurieren der entsprechenden Power- und Clock-Register, ist das Berechnen der Baudrate die wichtigste Einstellung. Dabei ist die Baudrate BR der Quotient

3 Implementierungen

aus Peripherie-Clock $PCLK$ und einem zu ermittelnden Divisor DL . Der Divisor DL lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$DL = \frac{PCLK}{16 \times BR} \quad (3.1)$$

Bei einer Ziel-Baudrate $BR = 115.200baud$ und gegebener Peripherie-Clock $PCLK = 25MHz$ ergibt sich der Divisor zu $DL = 13,56$. Dieser Wert kann jedoch nicht verwendet werden, da nur ganzzahlige Werte in das Register geschrieben werden können. Ein Auf- oder Abrunden auf den nächsten ganzzahligen Wert könnte zu Übertragungsfehlern führen. In diesem Fall gilt es einen weiteren Teiler DM zu bestimmen. Dazu gibt NXP Semiconductors, 2010, Abbildung 46 einen Algorithmus zur Berechnung des Divisors DL und des Teilers DM vor. Dabei wird zunächst die obige Formel um einen weiteren Divisor FR ergänzt:

$$DL = \frac{PCLK}{16 \times BR \times FR} \quad (3.2)$$

Im ersten Schritt wird dabei der Wert $FR = 1,5$ gewählt, was zu $DL = 9,04$ führt. Dieser wird näherungsweise als $DL = 9$ angenommen und in die nach FR aufgelöste Gleichung 3.3 eingesetzt.

$$FR = \frac{PCLK}{16 \times BR \times DL} \quad (3.3)$$

Als Folge dessen ergibt sich $FR = 1,51$. Anhand dieses Wertes wird in NXP Semiconductors, 2010, Tabelle 286 der entsprechende Teiler $DM = 0,5$ ermittelt. Die eingestellte Baudrate kann mit Gleichung 3.4 berechnet werden.

$$BR = \frac{PCLK}{16 \times DL \times (1 + DM)} \quad (3.4)$$

Somit beträgt die tatsächliche Baudrate $BR = 115.741baud$, was zu einem relativen Fehler von 0,5% führt. Damit wird die Empfehlung aus NXP Semiconductors, 2010, S. 313 erfüllt, welche einen maximalen relativen Fehler von 1,1% vorsieht.

Die Klasse `UartController` mit ihren Attributen, Operationen und Subklassen ist in Abbildung 3.20 dargestellt. Das Attribut `isInitialized` verhindert, dass der Konstruktor der Basisklasse `UartController` zweimal durchlaufen wird. Der Konstruktor wird das erste Mal aufgerufen, sobald eine der beiden Subklassen `UartReceiver` oder `UartTransmitter` instanziert wird. Dabei wird das Attribut `isInitialized` auf den Wert eins gesetzt und verhindert somit einen erneuten Durchlauf. Das zweite Attribut `dbuf` der Klasse `UartController` dient als Buffer mit einer Größe von zwei Byte. Die beiden Operationen `rxChar` und `txChar` implementieren die Registerzugriffe zum Empfangen und Senden auf der UART0-Schnittstelle.

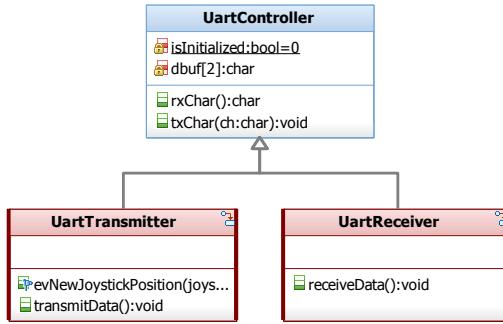
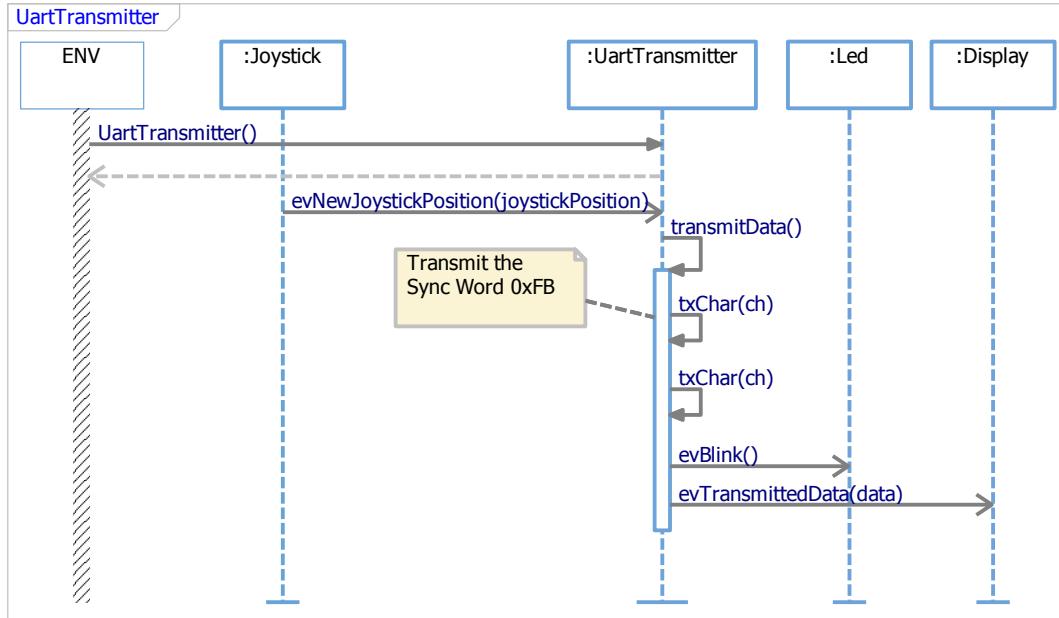


Abbildung 3.20: Basisklasse UART-Controller mit abgeleiteten Klassen.

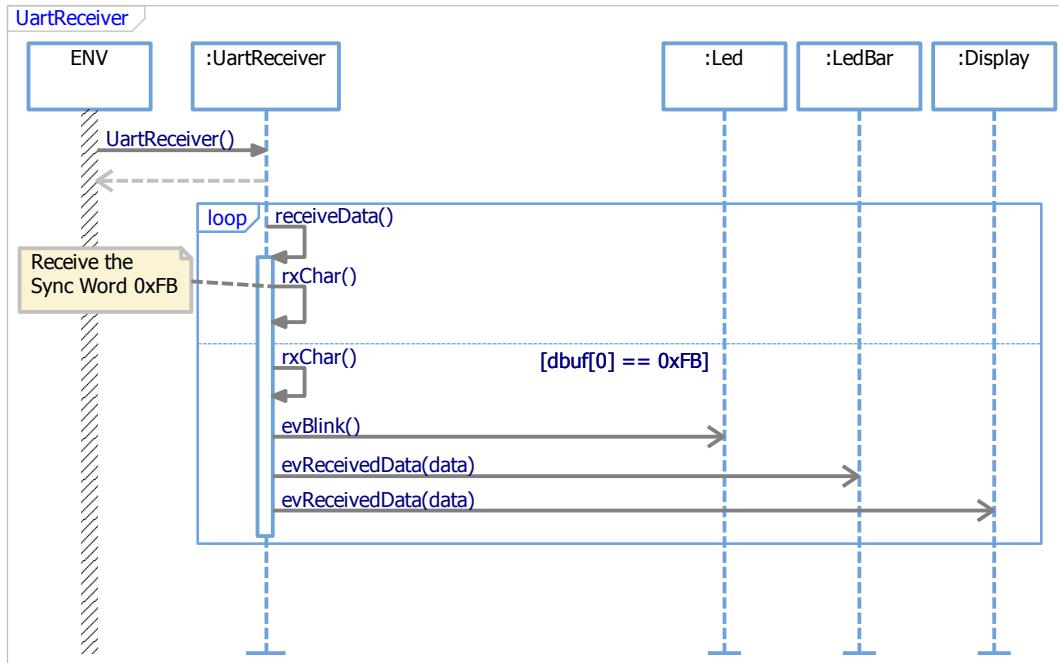
Daten senden: Das Verhalten des UART-Transmitters zeigt das Sequenzdiagramm in Abbildung 3.21(a). Nach erfolgreicher Initialisierung durch den Konstruktorauf- ruf befindet sich der UART-Transmitter gewissermaßen im Leerlauf. Der UART- Transmitter wartet auf das Event `evNewJoystickPosition` der Klasse Joystick. Tritt das Event `evNewJoystickPosition` ein, ruft die Klasse `UartTransmitter` ihre Operation `transmitData` auf. Für die Datenübertragung wurde ein minimales Protokoll implementiert. Dieses Protokoll basiert auf einer Größe von zwei Bytes, wobei das erste Byte immer den Wert `0xFB` (**FrameBegin**) enthält und zur Synchronisation dient. Infolgedessen ruft die Operation `transmitData` zunächst zwei Mal die Operation `txChar` auf, welche die Klasse `UartTransmitter` von der Basis- klasse `UartController` erbt. Beim ersten Aufruf wird das Synchronisations-Byte `0xFB` übertragen. Beim zweiten Aufruf wird das Datenbyte mit der Joystickposition als Inhalt übertragen. Die Übertragung endet mit dem Event `evBlink`, welches die Sende-LED P1.28 blinken lässt und dem Event `evTransmittedData`, welches die zuletzt übertragende Joystickposition auf dem Display anzeigt.

Daten empfangen: Das Empfangen von Daten ist im Sequenzdiagramm Abbil- dung 3.21(b) dargestellt. Nach der Initialisierung befindet sich der UART-Reveiver in einer Endlos-Schleife. Dort ruft die Klasse `UartReceiver` ihre Operation `receiveData` auf. In ihr wird durch den Aufruf der Operation `rxChar` überprüft, ob das Synchro- nisations-Byte `0xFB` vorliegt. Ist das nicht der Fall, endet die Operation `receiveData`. Liegt das Synchronisations-Byte `0xFB` vor, wird nochmals die Operation `rxChar` aufgerufen, um das Datenbyte auszulesen. Der Empfangsvorgang endet mit dem Blinken der Empfangs-LED P1.29 durch das Event `evBlink`. Außerdem wird das Event `evReceivedData` mit der empfangenden Joystickposition als Parameter an die Klasse `LedBar` sowie an die Klasse `Display` gesendet. An der LED-Bar wird die entsprechende LED ein- oder ausgeschaltet, am Display die zuletzt empfangene Joystickposition angezeigt.

3 Implementierungen



(a) Sendeablauf des UART-Transmitters.



(b) Verhalten des UART-Receivers beim Empfangen von Daten.

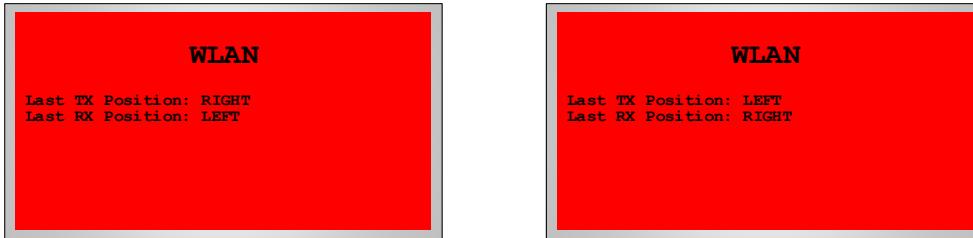
Abbildung 3.21: Sequenzdiagramme des UART-Transmitters und -Receivers.

Joystick

Die Implementierung des Joysticks erfolgt analog zur Ethernet Applikation in Kapitel 3.1.3.

LED-Bar und Display

Die LED-Bar und das Display sind die Empfänger des Events `evReceivedData`. Das Event wird vom UART-Receiver ausgelöst und beinhaltet das Datenbyte als Parameter. Die Klasse `LedBar` weist das Datenbyte der entsprechenden LED zu und ruft die Operation `toggleLed` der Klasse `Led` auf. Zugleich wird das Datenbyte von der Klasse `Display` verarbeitet, welche die zuletzt empfangene Joystickposition auf dem Display ausgibt. Im Unterschied zur Ethernet Applikation in Kapitel 3.1.3 zeigt das Display keine IP-Adressen an, da diese im WLAN-Modul konfiguriert wurden. Dafür wird auf dem Display die zuletzt gesendete Joystickposition dargestellt. Abbildung 3.22(a) zeigt das linke Eval Board, Abbildung 3.22(b) das rechte Eval Board der Entwicklungsumgebung.



(a) Exemplarische Anzeige für das linke Eval Board aus Abbildung 3.18. (b) Exemplarische Anzeige für das linke Eval Board aus Abbildung 3.18.

Abbildung 3.22: Ausgaben auf dem Display für die WLAN Applikation. Beispielhaft für die beiden Eval Boards aus der Entwicklungsumgebung.

3.3.4 Konfigurieren des Keil Projekts

Wie in auch in den vorherigen Implementierungen wurde das Blinky-Beispielprojekt aus dem RXF *Rpy_CPP_CMSIS_Keil5_ARM_MCB1700_TD* von Willert verwendet. Dadurch ist das Zusammenspiel von Rational Rhapsody, dem Willert RXF und der IDE Keil uVision sichergestellt. Nachfolgend werden die wichtigsten Anpassungen in der Konfiguration dargestellt.

Manage Run-Time Environment

Dem Keil Projekt können über den Konfigurationsassistenten *Manage Run-Time Environment* Software-Komponenten des Herstellers hinzugefügt werden. So wird dem Projekt das Paket *Keil::MDK-Middleware* in der Version 7.4.1 (2017-04-21) beigefügt, welches Software-Komponenten zum zügigen Erstellen von funktionsfähigen Applikationen enthält. Unter anderem beinhaltet das Paket die Board Support Komponente in der Version 1.0.0 (2017-04-21). Aus dieser Komponente wird der Treiber *Board Support:Graphic LCD* für das Display verwendet. Die nötigen Anpassungen zur Verwendung des Displays sind in Tabelle 3.12 orange gekennzeichnet. Für die UART-Schnittstelle sind die beiden Treiber *Device:PIN* und *Device:GPIO* erforderlich, welche in Tabelle 3.12 gelb markiert sind. Des Weiteren wurde der *ARM::CMSIS:CORE* auf die Version 5.0.1 heraufgesetzt (siehe rote Kennzeichnung in Tabelle 3.12).

Software Component	Blinky		SD Card	
	Sel. Variant	Version	Sel. Variant	Version
└─❖ Board Support	MCB1700	1.0.0		1.0.0
└─❖ Graphic LCD (API)		1.0.0		1.0.0
└─❖ Graphic LCD	<input type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
└─❖ CMSIS				
└─❖ CORE	<input checked="" type="checkbox"/>	4.3.0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.0.1
└─❖ CMSIS Driver				
└─❖ SPI (API)		2.01		2.2.0
└─❖ SPI	<input type="checkbox"/>	2.1	<input type="checkbox"/>	2.1.0
└─❖ SSP	<input type="checkbox"/>	2.5	<input checked="" type="checkbox"/>	2.7.0
└─❖ Device				
└─❖ GPDMA	<input type="checkbox"/>	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.2.0
└─❖ GPIO	<input type="checkbox"/>	1.1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.1.0
└─❖ PIN	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0
└─❖ Startup	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0.0

Tabelle 3.12: Heraufsetzen des CMSIS:CORE (rot), benötigte Komponenten der File System Component und deren Abhängigkeiten (gelb), sowie die Komponenten zum Betreiben des Displays (orange).

CMSIS Configuration

Bei der CMSIS Configuration wird der CMSIS RTX Kernel eingestellt. Die Konfiguration des CMSIS RTX Kernel erfolgt über die Datei *RTX_Conf_CM.c*, welche über den *Configuration Wizard* von Keil editiert werden kann. Im Abschnitt *Thread Configuration* gibt der erste Parameter *Number of concurrently running user threads* die Anzahl nebenläufiger Tasks an. Tabelle 3.13 listet die Tasks der WLAN-Applikation auf. Die Tasks mit der Ursache CMSIS-RTOS und Willert RXF sind identisch zu den

Tasks in Tabelle 3.2 aus der Ethernet-Applikation. Dazu kommen noch die Tasks der WLAN-Applikation. Entsprechend den rot markierten Klassen in Abbildung 3.19 sind das die Tasks *RunningIndicator*, *UartReceiver*, *UartTransmitter* und *Joystick*. Somit ist der Parameter *Number of concurrently running user threads* auf den Wert sieben zu setzen, da nach ARM Keil Group (2017d) der Task *os_idle_demon* nicht mit eingerechnet wird.

Task Name	Priorität	Ursache
osTimerThread	1	CMSIS-RTOS
main	2	CMSIS-RTOS
os_idle_demon	255	CMSIS-RTOS
WST_Monitor_receiveTask	3	Willert RXF
RunningIndicator	4	WLAN-Applikation
UartReceiver	5	WLAN-Applikation
UartTransmitter	6	WLAN-Applikation
Joystick	7	WLAN-Applikation

Tabelle 3.13: Verwendete Tasks für die WLAN-Applikation und deren Ursache.

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
⊖-Thread Configuration		
└-Number of concurrent running user threads	6	7 (+1)
└-Default Thread stack size [bytes]	200	200
└-Main Thread stack size [bytes]	1024	1024
└-Number of threads with user-provided stack size	5	6 (+1)
└-Total stack size [bytes] for threads with user-provided stack size	4096	4096
└-Check for stack overflow	✗	✗
└-Processor mode for thread execution	Privileged mode	Privileged mode
⊕-RTX Kernel Timer Tick Configuration		
⊕-System Configuration		

Tabelle 3.14: Anpassungen in der RTX Configuration *RTX_Conf_CM.c* für die WLAN-Applikation.

Device Configuration

Die Device Configuration erfolgt über die Dateien *startup_LPC17xx.s* (*Startup*), *startup_LPC17xx.c* (*Startup*) und *RTE_Device.h* (*Startup*), welche zur Device Komponente gehören. Sie implementieren den Start-up Code, welcher nach einem Reset des Targets ausgeführt wird. Im Rahmen der WLAN-Applikation ist lediglich die

3 Implementierungen

Datei *RTE_Device.h (Startup)* anzupassen. Da die UART0-Schnittstelle des Eval-Boards zur Kommunikation mit dem WLAN-Modul verwendet werden soll, müssen die entsprechenden Pins gemäß Tabelle 3.15 zugewiesen werden. Zudem ist der SPI Treiber *Driver_SPI1* zum Betrieb des Displays aktiviert.

Option	Blinky	SD-Karte
	Value	Value
⊕-USB Controller [Driver_USBD and Driver_USBH]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-ENET (Ethernet Interface) [Driver_ETH_MAC0]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-I2C0 (Inter-integrated Circuit Interface 0) [Driver_I2C0]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-I2C1 (Inter-integrated Circuit Interface 1) [Driver_I2C1]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-I2C2 (Inter-integrated Circuit Interface 2) [Driver_I2C2]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-UART0 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
-UART0_TX Pin		P0_2
-UART0_RX Pin		P0_3
⊕-DMA		
⊕-Tx	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-Rx	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-UART1 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-UART2 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-UART3 (Universal asynchronous receiver transmitter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-CAN1 Controller [Driver_CAN1]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-CAN2 Controller [Driver_CAN2]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-SSP0 (Synchronous Serial Port 0) [Driver_SPI0]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-SSP1 (Synchronous Serial Port 1) [Driver_SPI1]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
⊕-SPI (Serial Peripheral Interface [Driver_SPI2])	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⊕-I2S0 (Integrated Interchip Sound 0 [Driver_SAI0])	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabelle 3.15: Anpassungen in der Device Configuration *RTE_Device.h (Startup)*.

3.3.5 Inbetriebnahme der WLAN-Module ESP8266

Die beiden WLAN-Module ESP8266 bilden in der WLAN-Applikation die Schnittstelle zwischen den beiden Eval-Boards. Dabei gilt es zu beachten, dass beide WLAN-Module zwar die selbe Funktionalität erfüllen hinsichtlich der Datenübertragung, aber unterschiedliche Rollen im WLAN einnehmen. So baut ein WLAN-Modul ein Netzwerk auf und agiert als Soft Access Point, während das andere WLAN-Modul als Station eine Verbindung zu diesem Netzwerk herstellt. Diese Unterscheidung wird in der `setup`-Funktion mit Hilfe der Bibliothek *ESP8266WiFi* konfiguriert. Auf die Details wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

In der `loop`-Funktion spiegeln sich die Gemeinsamkeiten in Bezug auf die Datenübertragung wider. Die Implementierung für den Soft Access Point und für die Station sind im Wesentlichen identisch, wie auch das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 3.23 darstellt. Zunächst wird überprüft, ob Daten via WLAN empfangen

wurden. Ist das der Fall, werden diese unverändert über die UART-Schnittstelle ausgegeben. Anschließend wird die UART-Schnittstelle auf eingehende Daten abgefragt. Liegen hier Daten vor, werden diese unverändert als UDP-Paket an das andere WLAN-Modul drahtlos übertragen. Zuletzt überprüft jedes WLAN-Modul, ob eine Verbindung zum Netzwerk besteht. Hier wird unterschieden zwischen Soft Access Point und Station. Der Soft Access Point ermittelt die Anzahl der mit ihm verbunden Stations. Ist diese größer Null, leuchtet die grüne LED auf dem Steckbrett auf. Dagegen aktiviert die Station ihre grüne LED auf dem Steckbrett, wenn eine Verbindung zum Netzwerk besteht.

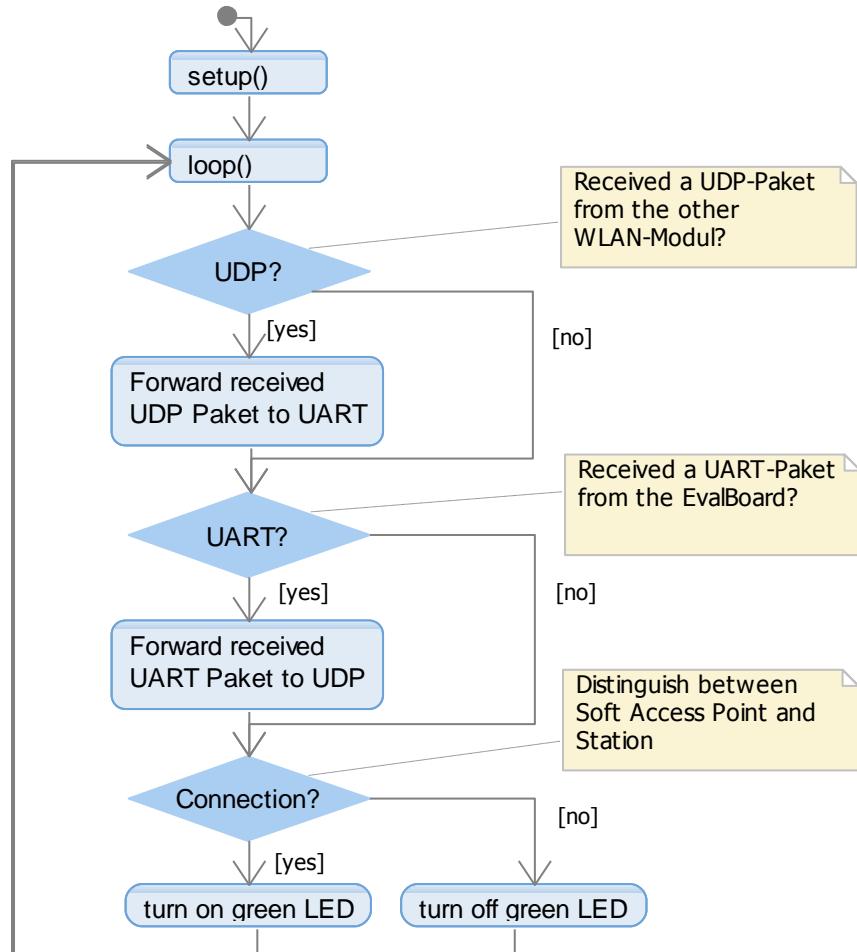


Abbildung 3.23: Ablauf der loop-Funktion in den beiden WLAN-Modulen.

UART-Schnittstelle

Bei der Implementierung der UART-Schnittstelle muss beachtet werden, dass die USB-Schnittstelle mit der UART0-Schnittstelle (GPIO3/GPIO1) verbunden ist. Mit dem Aufruf `Serial.printf` kann über die USB-Schnittstelle des WLAN-Moduls ein Logging realisiert werden. Somit ist es möglich, mit dem verbundenen PC das Logging mit einem Terminal-Programm mitzulesen. Das bedeutet aber auch, dass über den Pin GPIO1 sämtliche Daten des Loggings ausgegeben werden. In Folge dessen wird auf die UART2-Schnittstelle (GPIO13/GPIO15) ausgewichen. Die entsprechende Konfiguration erfolgt bei der Definition der UART-Schnittstelle, welche vom Typ `SoftwareSerial` ist. Wie der vereinfachte Quelltext 3.5 darstellt, wurde dazu die Open-Source Bibliothek `SoftwareSerial` eingebunden (Lerup, 2017). In der `setup`-Funktion muss die UART2-Schnittstelle lediglich mit der Ziel-Baudrate von `115.200baud` initialisiert werden.

```
1 #include <SoftwareSerial.h>
2
3 //D7 == GPIO 13 == RXD2
4 //D8 == GPIO 15 == TXD2
5 SoftwareSerial swSer(13, 15, false, 256);
6
7 void setup() {
8     //...
9
10    swSer.begin(115200);
11
12    //...
13 }
```

Quelltext 3.5: Definition und Initialisierung der UART2-Schnittstelle. Auf die UART2-Schnittstelle reduzierter Ausschnitt aus dem Quellcode, der in beiden WLAN-Modulen implementiert wird.

Während der Verifizierung der UART-Schnittstelle stellte sich heraus, dass bei jedem gesendeten Datenpaket das erste Bit stets einer logischen Null entspricht und somit die gesendete Information verfälscht. Nach ausgiebiger Analyse mit Logic-Analyzer und Code-Review stellte sich heraus, dass die Bibliothek `SoftwareSerial` einen zusätzlichen High-Pegel vor dem Start-Bit jedes Pakets einspeist. Die Ursache dafür konnte nicht ermittelt werden, liegt aber vermutlich daran, dass die Bibliothek `SoftwareSerial` auf die UART-Kommunikation mit einem Arduino Board ausgelegt ist. Eine Anpassung der Bibliothek löste dieses Problem, so dass Datenpakete unverfälscht zum Eval-Board gesendet werden können. Zudem sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Bibliothek die Datenpakete invers empfängt und sendet. Das hat zur Folge, dass zum Beispiel das empfangene Synchronisations-Byte 0xFB als 0x04 dargestellt wird.

WLAN-Schnittstelle

Initialisierung als Soft Access Point: Die Implementierung des Soft Access Point findet sich im Sketch *WiFiAccessPoint.ino* wider. Der Quelltext 3.6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Sketch, der auf die wesentlichen Elemente zur Inbetriebnahme des WLAN-Moduls als Soft Access Point reduziert wurde.

Wie zuvor erwähnt erfolgt die WLAN-Konfiguration mit Hilfe der *ESP8266WiFi* Bibliothek. Zudem wird die Bibliothek *WiFiUdp* inkludiert, da die WLAN-Kommunikation auf UPD basieren soll. Anschließend werden von Zeile 7 bis Zeile 12 die wichtigsten Parameter für die WLAN-Kommunikation definiert. Darunter befindet sich auch die SSID, das heißt der Netzwerkname unter dem der Soft Access Point erreicht wird. Ein Passwort für den Zugang zum Netzwerk wird zunächst nicht vergeben. In der *setup*-Funktion erfolgt von Zeile 18 bis Zeile 22 die Initialisierung des WLAN-Moduls als Soft Access Point, sowie das Setzen der zuvor definierten Parameter. Zuletzt wird in Zeile 25 der UDP-Protokollstapel aufgesetzt.

```

1 #include <ESP8266WiFi.h> // Used for the soft AP
2 #include <WiFiUdp.h>      // Used for UDP communication
3
4 WiFiUDP Udp;
5
6 //*** Soft AP variables ***
7 const char *APssid = "ESP8266-12E";
8 const char *APpassword = ""; // No password for the AP
9 IPAddress APlocal_IP(192, 168, 0, 100);
10 IPAddress APgateway(192, 168, 0, 254);
11 IPAddress APsubnet(255, 255, 255, 0);
12 unsigned int localUdpPort = 4209;
13
14 void setup() {
15     //...
16
17     // Set operation mode and configure the network
18     WiFi.mode(WIFI_AP);
19     WiFi.softAPConfig(APlocal_IP, APgateway, APsubnet);
20     WiFi.softAP(APssid, APpassword);
21     // Confirm Soft Ap IP address
22     WiFi.softAPIP();
23
24     // Setup the UDP port
25     Udp.begin(localUdpPort);
26     //...
27 }
```

Quelltext 3.6: Definition und Initialisierung der WLAN-Schnittstelle als Soft Access Point. Ausschnitt aus dem Sketch *WiFiAccessPoint.ino*.

3 Implementierungen

Initialisierung als Station: Der Sketch *WiFiStation.ino* beinhaltet den Quellcode für den Betriebsmodus Station. Die wichtigsten Elemente des Sketches zur Verwendung des WLAN-Moduls als Station fasst der Quelltext 3.7 zusammen.

Auch hier werden zunächst die beiden Bibliotheken *ESP8266WiFi* und *WiFiUdp* eingebunden. Im Anschluss werden von Zeile 7 bis Zeile 14 die SSID und das Passwort des Soft Access Points übernommen, sowie die Parameter der Station festgelegt. Wichtig ist, dass die Gateway-IP und die Subnet-IP identisch mit dem Soft Access Point sind. Der UDP-Port legt fest, welcher Port auf eingehende Datenpakete überprüft wird. Es kann für beide WLAN-Module gleich bleiben. Die Initialisierung des WLAN-Moduls als Station erfolgt in der *setup*-Funktion in Zeile 20 und Zeile 21. In der darauf folgenden while-Schleife wird alle 500ms versucht, eine Verbindung zum Soft Access Point aufzubauen. Wie beim Soft Access Point wird am Ende in Zeile 31 der UDP-Protokollstapel aufgesetzt.

```
1 #include <ESP8266WiFi.h> // Used for the soft AP
2 #include <WiFiUdp.h>      // Used for UDP communication
3
4 WiFiUDP Udp;
5
6 //*** Soft AP variables ***
7 const char *APssid = "ESP8266-12E";
8 const char *APpassword = "";                                // No password for the AP
9
10 //***STAtion variables ***
11 IPAddress STAlocal_IP(192, 168, 0, 101);
12 IPAddress STAgateway(192, 168, 0, 254);
13 IPAddress STAsubnet(255, 255, 255, 0);
14 unsigned int localUdpPort = 4209;
15
16 void setup() {
17     //...
18
19     // Set operation mode and configure the network
20     WiFi.begin(APssid, APpassword);
21     WiFi.config(STAlocal_IP, STAgateway, STAsubnet);
22
23     // Connect to Soft AP
24     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
25     {
26         delay(500);
27         Serial.print(".");
28     }
29
30     // Setup the UDP port
31     Udp.begin(localUdpPort);
32     //...
```

```
33 }
```

Quelltext 3.7: Definition und Initialisierung der WLAN-Schnittstelle als Station.
Ausschnitt aus dem Sketch *WiFiStation.ino*.

4 Verifikation

4.1 Testobjekt

Wie einleitend erwähnt, existiert derzeit kein Willert RXF auf dem Markt, welches die verwendete Entwicklungsumgebung in C++ unterstützt. Aus diesem Grund wird als Testobjekt ein Teil aus der achten Laboraufgabe in C gewählt. Dabei soll die sequentiell aufleuchtende LED-Bar des Eval Boards durch den Joystick gestoppt und gestartet werden. Das Funktionsprinzip der sequentiell aufleuchtenden LED-Bar ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Nach einem Durchlauf startet die Sequenz wieder von vorne. Wird nun der Joystick nach rechts bewegt, so soll die LED-Bar an der entsprechende Stelle gestoppt werden. Bei einer Bewegung nach links soll die Sequenz fortgesetzt werden.

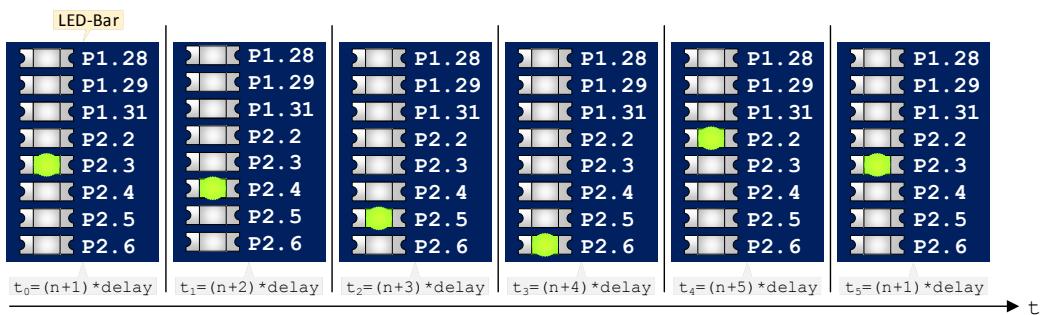


Abbildung 4.1: Sequentiell aufleuchtende LED-Bar von links nach rechts über der Zeit.

Aus dieser funktionalen Beschreibung sollen exemplarisch zwei Anforderungen formuliert werden. Rational Rhapsody bietet die Möglichkeit, dass Anforderungen beispielsweise über Requirements-Tools wie DOORS importiert werden können. Der Einfachheit halber werden die Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit direkt in Rational Rhapsody formuliert. Die beiden Anforderungen sind nachfolgend aufgelistet:

- REQ_1: If the Joystick is turned left, the LED-Bar shall stop.
- REQ_2: If the Joystick is turned right, the LED-Bar shall run.

4.2 Modellbasierter Test

5 Zusammenfassung und Ausblick

Abkürzungsverzeichnis

<i>CMSIS</i>	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
<i>CPU</i>	Central Processing Unit
<i>IDE</i>	Integrated Development Environment
<i>MDK</i>	Microcontroller Development Kit
<i>RL – ARM</i> ...	Real-Time Library for ARM microprocessors
<i>RTC</i>	Real-Time Clock
<i>RTE</i>	Run-Time-Environment
<i>RTOS</i>	Real Time Operating System
<i>RXF</i>	Real-time eXecution Framework

Literaturverzeichnis

- ARM Keil Group (2014). *Migrate RTX to CMSIS-RTOS*. Application Note 264.
- ARM Keil Group (2017a). *File System Component: Resource Requirements*. URL: http://www.keil.com/pack/doc/mw/FileSystem/html/fs_resource_requirements.html (besucht am 24.06.2017).
- ARM Keil Group (2017b). *MDK Microcontroller Development Kit*. URL: <http://www2.keil.com/mdk5/> (besucht am 14.05.2017).
- ARM Keil Group (2017c). *Network Component: MDK Middleware for IPv4 and IPv6 Networking*. URL: http://www.keil.com/pack/doc/mw/Network/html/nw_resource_requirements.html (besucht am 23.05.2017).
- ARM Keil Group (2017d). *Real-Time Operating System: API and RTX Reference Implementation*. URL: <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS/html/threadConfig.html> (besucht am 23.05.2017).
- IBM (2017). *Rational Rhapsody family*. URL: <http://www-03.ibm.com/software/products/en/ratirhafam> (besucht am 25.05.2017).
- Lerup, Peter (2017). *EspSoftwareSerial*. URL: <https://github.com/plerup/espsoftwareserial> (besucht am 08.08.2017).
- Matuschek, Marco und Van der Heiden, Walter (2015). *external sources*. Handout. Willert Software Tools GmbH.
- Maxfield, Clive (2017). *2017 Embedded Markets Study*. Study. EE Times.
- NXP Semiconductors (2010). *LPC17xx User manual*. User manual.
- OMG (2013). *UML Testing Profile (UTP)*. Technical Report. OMG.
- OSC Embedded Systems AG (2017). *IBM Rational Rhapsody TestConductor Add On*. User Guide.
- Römer, Eike (2012). *RXF Migration Guide*. Application Note. Willert Software Tools GmbH.

Literaturverzeichnis

- Sauter, Thomas (2017). *Installationsanleitung WLAN-Modul ESP8266*. Guide.
- Steinmeyer, Timo und Pollithy, Stefan (2015). *Codegenerierung aus UML Aktivitätsdiagrammen und Implementierung einer Ethernet Schnittstelle für Embedded Systems*. Master-Projektarbeit. Hochschule Ulm.
- Van der Heiden, Walter (2016). *Modeling Embedded Systems*. Datenblatt. Willert Software Tools GmbH.
- Van der Heiden, Walter (2017). *Modeling Embedded Systems*. Technical Report. Willert Software Tools GmbH.
- von Schwerin, Marianne und Normann, Norbert (2017). *Laboratory Guide - Embedded Systems*. Guide. Hochschule Ulm.