

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science in Engineering“
im Studiengang Embedded Systems

Der Objekt Orientierte Ansatz in der Entwicklung von Eingebetteten Systemen

Ausgeführt von: Ney Fränz, BSc

Personenkennzeichen: 1610297013

BegutachterIn: FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Martin Horauer

Wien, den 12. August 2018



Eidesstattliche Erklärung

„Ich, als Autor / als Autorin und Urheber / Urheberin der vorliegenden Arbeit, bestätige mit meiner Unterschrift die Kenntnisnahme der einschlägigen urheber- und hochschulrechtlichen Bestimmungen (vgl. Urheberrechtsgesetz idgF sowie Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und Gedankengut jeglicher Art aus fremden sowie selbst verfassten Quellen zur Gänze zitiert habe. Ich bin mir bei Nachweis fehlender Eigen- und Selbstständigkeit sowie dem Nachweis eines Vorsatzes zur Erschleichung einer positiven Beurteilung dieser Arbeit der Konsequenzen bewusst, die von der Studiengangsleitung ausgesprochen werden können (vgl. Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Weiters bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit bis dato nicht veröffentlicht und weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im Uploadtoolasas entspricht.“

Wien, 12. August 2018

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'KeyF' with a stylized flourish.

Unterschrift

Kurzfassung

In der Entwicklung von eingebetteten Systemen hat sich in den letzten Jahren einiges getan. Moderne Programmiersprachen wie C/C++ haben sich in der embedded Entwicklung etabliert und aufwendiges programmieren in Assembler sollte nur noch in wenigen Fällen von Nöten sein. Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Frage, ob der Einsatz einer objekt-orientierten Programmiersprache auf Plattformen mit nur wenigen kBytes an Flash Speicher sinnvoll ist und welchen Mehrwert diese für die Embedded Entwicklung haben könnte.

Hierbei sollen vor allem die gängigsten Konzepte (Klassen, Templates, etc.) der objektorientierten Sprache analysiert werden, um Solide Richtwerte über Performance und Speicherverbrauch geben zu können. Dazu soll der kompilierte Code analysiert und diverse Benchmark Tests durchgeführt werden. Zusätzlich wird der Vergleich mit einer klassischen funktionalen Programmiersprache dargestellt.

Als Referenz Programmiersprache wird C/C++ in Verbindung mit der ARM Cortex-M Architektur verwendet, da diese Kombination sehr interessant für stromsparende und kleinere IoT Projekte ist und sich wahrscheinlich in Zukunft durchsetzen wird. Am Anfang wird auch eine State-Of-the-art Analyse über die momentan verfügbaren ARM C++ Compiler durchgeführt um auflisten zu können welche Versionen und Erweiterungen von C++ unterstützt werden.

Schlagworte: Objektorientiertes Programmieren, C/C++, Embedded Software, ARM Cortex-M

Abstract

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Keywords: Keyword1, Keyword2, Keyword3, Keyword4

Danksagung

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Inhaltsverzeichnis

1	State-of-Art Analyse	1
1.1	Mikrocontroller Hardware Analyse	1
1.1.1	Stromverbrauch und Effizienz	1
1.1.2	MCU Peripherie	1
1.1.3	Sicherheits- Features	1
1.2	Work-Flow und Tools in der embedded Entwicklung	1
1.2.1	Entwicklungs- Umgebungen	1
1.2.2	Test und Qualitäts- Management	1
1.2.3	Code Generatoren	1
1.2.4	Low-Level Hardware Bibliotheken	1
1.3	Programmiersprachen für die embedded Entwicklung	1
1.3.1	Kompilierte Programmiersprachen	1
1.3.2	Interpretierte Programmiersprachen	1
1.4	Verfügbare C/C++ Compiler für die ARM Architektur	1
1.4.1	GNU Arm Embedded Toolchain	1
1.4.2	IAR Embedded Workbench	1
1.4.3	ARM Compiler	1
2	Embedded C++	1
2.0.1	Überblick	2
2.0.2	C++ Konzepte	2
2.0.3	Eingabe- und Ausgabestreams	2
2.0.4	Funktionen Überladen	3
2.0.5	Standardparameter	5
2.0.6	Funktions- Templates	7
2.0.7	Arrays	9
2.0.8	Zeichenketten	11
2.0.9	Zeiger vs Referenzen	17
2.0.10	Namensräume	19
2.0.11	Dynamische Speicher Verwaltung	20
2.0.12	Klassen	20
	Literaturverzeichnis	21
	Abbildungsverzeichnis	22

Tabellenverzeichnis	23
Quellcodeverzeichnis	24
Abkürzungsverzeichnis	25
A Anhang A	26
B Anhang B	27

1 State-of-Art Analyse

1.1 Mikrocontroller Hardware Analyse

1.1.1 Stromverbrauch und Effizienz

1.1.2 MCU Peripherie

1.1.3 Sicherheits- Features

1.2 Work-Flow und Tools in der embedded Entwicklung

1.2.1 Entwicklungs- Umgebungen

1.2.2 Test und Qualitäts- Management

1.2.3 Code Generatoren

1.2.4 Low-Level Hardware Bibliotheken

1.3 Programmiersprachen für die embedded Entwicklung

1.3.1 Kompilierte Programmiersprachen

1.3.2 Interpretierte Programmiersprachen

1.4 Verfügbare C/C++ Compiler für die ARM Architektur

1.4.1 GNU Arm Embedded Toolchain

1.4.2 IAR Embedded Workbench

1.4.3 ARM Compiler

2 Embedded C++

2.0.1 Überblick

In diesem Kapitel werden verschiedene Konzepte von C++ näher analysiert um klare Aussagen über Speicherverbrauch und Performance liefern zu können. Es soll zugleich als eine Art Guideline für Embedded Programmierer dienen um C++ effizient einsetzen zu können.

Die GNU ARM Embedded Toolchain wird für diese Tests verwendet da Sie neben Compiler, Linker und Co. auch noch viele nützliche Tools zur Analyse mitliefert. Verschieden Tools die in den nachfolgenden Kapiteln zum Einsatz kommen werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Tool	Beschreibung
arm-none-eabi-g++	C++ Compiler (Präprozessor , Kompiler, Linker)
arm-none-eabi-gcc	C Compiler (Präprozessor , Kompiler, Linker)
arm-mone-eabi-nm	Listet Symbole aus Objekt Dateien
arm-none-eabi-objdump	Zur erweiterten Analyse von Objekt Dateien
arm-none-eabi-size	Zeigt Größe der verschieden Link Segmente (Text, Data, BSS)

Tabelle 1: Analyse Tools

2.0.2 C++ Konzepte

2.0.3 Eingabe- und Ausgabestreams

2.0.4 Funktionen Überladen

C++ bietet ein Mechanismus indem man mehrere Funktionen mit dem gleichen Namen deklarieren kann, diese sich jedoch in ihrer Signatur unterscheiden müssen. Somit kann man bestehende Funktionen überladen, indem man die Datentypen oder Anzahl der Parameter verändert. Der Compiler sucht sich dann die Funktion mit der passenden Signatur heraus.

Beispiel

Im folgendem Beispiel braucht man eine Funktion die jeweils 2 *int* und *double* Werte addieren kann. Im klassischen C müsste man 2 Funktionen deklarieren die sich jeweils in ihrem Namen unterscheiden, wohingegen man in C++ den gleichen Funktionsnamen erneut verwenden darf.

<pre>1 static int add(int a, int b) { 2 return a + b; 3 } 4 5 static double add(double a, double b) { 6 return a + b; 7 } 8 9 volatile int i_1=3, i_2=4, i_3=0; 10 volatile double d_1=3, d_2=4, d_3=0; 11 12 int main() { 13 14 i_3 = add(i_1, i_2); 15 d_3 = add(d_1, d_2); 16 17 return 0; 18 }</pre>	<pre>1 static int add_i(int a, int b) { 2 return a + b; 3 } 4 5 static double add_d(double a, double b) { 6 return a + b; 7 } 8 9 volatile int i_1=3, i_2=4, i_3=0; 10 volatile double d_1=3, d_2=4, d_3=0; 11 12 int main() { 13 14 i_3 = add_i(i_1, i_2); 15 d_3 = add_d(d_1, d_2); 16 17 return 0; 18 }</pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quellcode (1) C++ Beispiel

Quellcode (2) C Beispiel

Analyse

Beide Compiler generieren jeweils eine Funktion für *int* (48 byte) und eine für *double* (76 byte). Beim C++ Compiler kann man erkennen das dieser automatisch 2 verschiedene Funktionen mit dem Index 'ii' und 'dd' erstellt. Somit kann man sagen das Funktions- Überladungen keinen Speicher Overhead erzeugen. Zusätzlich kann man lange Funktionsnamen vermeiden und die Wahrscheinlichkeit das man irrtümlicherweise die falsche Funktion verwendet sinkt erheblich.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -O0 main.cpp \$ arm-none-eabi-nm main.o --print-size ... 00000030 0000004c t _ZL3adddd 00000000 00000030 t _ZL3addii ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-gcc -c -O0 main.c \$ arm-none-eabi-nm main.o --print-size ... 00000030 0000004c t add_d 00000000 00000030 t add_i ...</pre>
Analyse C++	Analyse C

Fazit

Funktions- Überladungen erzeugen keinen Speicher Overhead und sind zu empfehlen wenn sich der Funktions- Block erheblich in verschiedenen Implementationen unterscheidet. Ändern sich nur die Datentypen wie es in diesem Beispiel der Fall ist sind *Funktions- Templates* eher zu empfehlen. Ändert sich nur die Anzahl der Parameter kann man oftmals mit *Standardparametern* (Default Arguments) wie es sie in C++ gibt schöneren Code erzeugen.

2.0.5 Standardparameter

Bei der Initialisierung von Hardware Modulen sind oft Standardparameter sinnvoll. Bei einer Seriellen Schnittstelle ist die Konfiguration *9600 8N1* für viele Anwendungen schon ausreichend. In C++ kann man Funktionsparameter mit festen Standardwerten versehen welche geltend sind sollte beim Funktionsaufruf das Argument fehlen. Im klassischen C gibt es mehrere Möglichkeiten so ein Verhalten nach zu implementieren, jedoch ist dies ohne zusätzlichen Quellcode meist nicht möglich.

Beispiel

Das folgende Beispiel zeigt wie man die Initialisierungsfunktion einer Seriellen Schnittstelle mit Standardwerten versehen kann. Sofort erkennbar ist das die gleiche Implementierung in C wesentlich unübersichtlicher wirkt. In der main Funktion werden die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt wie man die Funktion aufrufen könnte.

```
1 static int __attribute__ ((noinline))
2 uart_init(int baud=9600,
3           int Ndata=8,
4           int parity=0,
5           int stop=1){
6
7     return baud+Ndata+parity+stop;
8 }
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19 volatile int ret=0;
20
21 int main() {
22
23     ret = uart_init();
24     ret += uart_init(57600);
25     ret += uart_init(57600, 7);
26     ret += uart_init(57600, 7, 1);
27     ret += uart_init(57600, 7, 1, 0);
28     return 0;
29 }
```

Quellcode (5) C++ Beispiel

```
1 static int __attribute__ ((noinline))
2 uart_init(int baud,
3           int Ndata,
4           int parity,
5           int stop){
6
7     if(baud < 0)
8         baud = 9600;
9     if(Ndata < 0)
10         Ndata = 8;
11     if(parity < 0)
12         parity = 0;
13     if(stop < 0)
14         stop = 1;
15
16     return baud+Ndata+parity+stop;
17 }
18
19 volatile int ret=0;
20
21 int main() {
22
23     ret = uart_init(-1, -1, -1, -1);
24     ret += uart_init(57600, -1, -1, -1);
25     ret += uart_init(57600, 7, -1, -1);
26     ret += uart_init(57600, 7, 1, -1);
27     ret += uart_init(57600, 7, 1, 0);
28     return 0;
29 }
```

Quellcode (6) C Beispiel

Analyse

Der C++ Compiler ersetzt die nicht angegebenen Parametern während der Übersetzungszeit durch die Default-Parameter womit die main Funktion bei beiden Varianten gleich viel ROM Speicher (176 byte) benötigt. Jedoch alloziert die uart_init Funktion in der C Version mehr Speicher da hier zur Laufzeit die Standardparameter gegebenenfalls gesetzt werden müssen.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -Os main.cpp \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 00000010 t _ZL9uart_initiiii 00000000 000000b0 T main 00000000 00000004 B ret ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-gcc -c -Os main.c \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 0000002c t uart_init 00000000 000000b0 T main 00000000 00000004 B ret ...</pre>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Analyse C++

Analyse C

Bei Verwendung von C++ Standardparametern sollte man darauf achten dass man die Parameter, wo die Wahrscheinlichkeit einer Änderung am Höchsten ist ganz links in der Funktionsparameter liste packt. Bei der Seriellen Schnittstelle wäre das die Baudrate da sich die restlichen Parameter nicht so häufig ändern.

Fazit

Standardparameter sind sehr nützlich wenn es sich um Konfigurations- Funktionen handelt da man diese übersichtlicher gestalten kann. Auch Funktions- Aufrufe mit langen Parameter Listen kann man vermeiden wenn einem die Standard Werte genügen.

2.0.6 Funktions- Templates

Oftmals muss man eine und dieselbe Funktion für verschiedene Datentypen implementieren. In C++ kann man dieses Problem mit Templates sehr elegant lösen. Templates stellen eine Art Schablone dar mit denen man Funktionen unabhängig von einem bestimmten Datentypen implementieren kann. Dies ist vor allem bei Manipulationen von Listen oder Arrays interessant da man den Algorithmus nicht für jeden Datentyp erneut implementieren muss.

Beispiel

Das nachfolgende Beispiel zeigt wie man in C++ eine Funktion die 2 Werte addieren soll unabhängig von dessen Datentypen implementieren kann. Erkennbar ist auch dass die C++ Variante wesentlich kürzer und somit auch übersichtlicher als die Version in C wirkt.

```
1#include <stdint.h>
2volatile uint8_t a_1=3, a_2=4, a_3=0;
3volatile int16_t b_1=5, b_2=6, b_3=0;
4
5template <typename T> T add(T a, T b) {
6    return a + b;
7 }
8
9
10
11
12
13int main() {
14
15    a_3 = add(a_1, a_2);
16    b_3 = add(b_1, b_2);
17
18    return 0;
19 }
```

Quellcode (9) C++ Beispiel

```
1#include <stdint.h>
2volatile uint8_t a_1=3, a_2=4, a_3=0;
3volatile int16_t b_1=5, b_2=6, b_3=0;
4
5static uint8_t a(uint8_t a, uint8_t b){
6    return a + b;
7 }
8
9static int16_t b(int16_t a, int16_t b){
10    return a + b;
11 }
12
13int main() {
14
15    a_3 = a(a_1, a_2);
16    b_3 = b(b_1, b_2);
17
18    return 0;
19 }
```

Quellcode (10) C Beispiel

Analyse

Beide Versionen wurden mit der Compiler Optimierung **-O0** kompiliert. Analysiert man beide Objekt Dateien findet man jeweils 2 Versionen von der Addier- Funktion. Bei der C Variante heißen die Funktionen genau gleich wie im Quellcode deklariert, wohingegen eine automatische Indexierung bei der C++ Variante erfolgt. In beiden Versionen werden jeweils 64 byte für die *uint8_t* und 72 byte für die *int16_t* Funktion alloziert. Es kann durchaus sein dass bei anderen Optimierungsstufen die Funktionen als inline kompiliert werden, jedoch entsteht auch dann nie ein Unterschied zwischen der C und C++ Version.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -O0 main.cpp \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 00000040 W _Z3addIhET_S0_S0_ 00000000 00000048 W _Z3addIsET_S0_S0_ ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-gcc -c -O0 main.c \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 00000040 t a 00000040 00000048 t b ...</pre>
Analyse C++	Analyse C

Zudem kann man erkennen das die Funktionen in der C Version mit **t** markiert sind und somit in die *.text* Sektion gelinkt werden. Würde man in einer anderen C Datei genau die gleiche Funktionen implementieren würde man nach dem linken 2 Versionen von genau der gleichen Funktion in der auszuführenden Datei (Executable) finden. Hierbei sind die Funktionen a und b fest an die jeweilige Objektdatei gebunden. In der C++ Version sind beide Funktionen als WEAK deklariert und befinden sich in einer eigenen Link Sektion. Dies ermöglicht es dem Linker Optimierungen vorzunehmen falls es mehrere Implementierungen des gleichen Templates in verschieden Objekt Dateien gibt. Dieses Compiler Verhalten ist auch unter dem Namen **Borland Model** bekannt.

<pre>\$ arm-none-eabi-objdump -d main.o -> .text: 00000000 <main>: ... -> .text._Z3addIhET_S0_S0_: 00000000 <_Z3addIhET_S0_S0_>: ... -> .text._Z3addIsET_S0_S0_: 00000000 <_Z3addIsET_S0_S0_>: ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-objdump -d main.o -> .text: 00000088 <main>: ... 00000000 <a>: ... 00000040 : ...</pre>
Analyse C++	Analyse C

Fazit

Funktions- Templates erhöhen die Lesbarkeit des Quellcodes und bewirken das man Fehler nur in einer Funktion beheben muss und somit die Wartbarkeit erheblich erhöhen. Zudem kann sich die Verwendung von Templates positiv auf die Größe des Executables auswirken da der Linker Optimierungen vornehmen kann. Templates sollten auch wenn möglich in einer header Datei definiert werden und wenn nötig in der .cpp Datei eingebunden werden. Bei großen Projekten kann sich dies jedoch negativ auf die Übersetzungszeit auswirken da der Template Code mehrmals kompiliert werden muss.

2.0.7 Arrays

In C++ gibt es mehrere Möglichkeiten Daten in Arrays zusammenzufassen. C- Array, *std::vector* und *std::array* sind die 3 bekanntesten Modelle um Daten zu speichern und werden in diesem Kapitel näher unter die Lupe genommen. Als embedded Programmierer sollte man genau wissen welche Methode für den jeweiligen Anwendungsfall die beste Wahl ist.

C- Array / *std::array*

Das klassische C- Array ist nach wie vor weit verbreitet und kann auch in C++ weiter verwendet werden. Jedoch sollte man in neuen Projekten darauf verzichten da es in der Standard C++ Bibliothek verschiedene Containerklassen gibt die übersichtlicher aufgebaut sind und somit gängige Fehler im Vorhinein eliminieren. Die *std::array* Containerklasse ist das Pendant zum C- Array, bietet jedoch einige Vorteile was Elementzugriff oder Informationen über die Kapazität des Arrays betrifft. Näher zu erwähnen ist die Methode **at** mit der man Zugriff auf einzelne Elemente des Arrays bekommt, jedoch gegenüber **[]** eine Grenzen Überprüfung während der Laufzeit stattfindet. Dies kann sehr nützlich sein da der Zugriff auf nicht existierende Elemente einer der häufigsten Fehler bei C- Arrays darstellt.

Ein zusätzlicher Vorteil bieten die Standard C++ Containerklassen da diese Iteratoren zu Verfügung stellen womit man verschiedene Algorithmen der Standard Bibliothek verwenden kann. Somit kann man auf vorhandenen und getesteten Code zurückgreifen wenn es ums sortieren oder das manipulieren eines Arrays geht.

Das nachfolgende Beispiel zeigt wie man mittels C- Array und *std::array* ein **int** Array mit jeweils 10 Elementen mit 0 initialisiert und dann mit Daten befüllt.

<pre>1 2 3 int a[10] = { 0 }; 4 5 int main() { 6 7 for(int i=0; i<10; i++){ 8 a[i] = i; 9 } 10 11 return 0; 12 } 13 14 /*EOF*/</pre>	<pre>1 #include <array> 2 3 std::array<int, 10> a = { 0 }; 4 5 int main() { 6 7 for(size_t i=0; i<a.size(); ++i){ 8 a[i] = i; 9 } 10 11 return 0; 12 } 13 14 /*EOF*/</pre>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quellcode (15) C- Array

Quellcode (16) *std::array*

std::vector

Bei der `std::vector` Containerklasse hat man die Möglichkeit die Größe des Arrays dynamisch anzupassen. Somit ist `std::vector` wesentlich komplexer und mit Vorsicht zu genießen da Speicher zur Laufzeit am Stack oder Heap alloziert werden muss. Dies ist auch dadurch zu erkennen dass `sizeof(std::vector<int>)` nicht wie bei `std::array` oder dem C- Array die eigentliche Größe in Bytes zurückliefert sondern immer 12 welche lediglich zur Verwaltung von `std::vector` benötigt werden und die eigentlichen Daten am Heap gespeichert werden. Bei embedded Projekten sollte man auf die `std::vector` Klasse verzichten und wenn eine dynamische Speicherverwaltung von Nöten ist bieten gängige RTOS oder OS Systeme bessere Mechanismen an, die im Fehlerfall (Heap/Stack Überläufe) wesentlich besser zu Debuggen sind.

Analyse

Kompiliert man die C- Array und `std::array` Variante jeweils mit der Optimierungsstufe **-Os** kann man keinen Unterschied zwischen den beiden Implementierungen feststellen. Jedoch entsteht ein geringer Overhead bei Verwendung von `std::array` in Kombination mit niedrigeren Optimierungsstufen die durch die höhere Abstraktion zum eigentlichen Speicher Segment zu erklären ist. Auch zu erkennen ist dass bei beiden Implementierungen jeweils Speicher für genau 10 **int** Werte statisch in der **bss** Sektion reserviert wird.

<pre>\$ arm-none-eabi-size a.out text data bss dec hex 1840 1092 64 2996 bb4 \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00018bb0 00000028 B a ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-size a.out text data bss dec hex 1840 1092 64 2996 bb4 \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00018bb0 00000028 B a ...</pre>
C- Array	std::array

Fazit

Schlussfolgernd kann man sagen dass `std::array` ohne weiteres in embedded Projekten verwendet werden darf und eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem C- Array bietet. Auch die Kompatibilität zu älterem Code der möglicherweise noch klassische Pointer benötigt sollte kein Problem darstellen da man mit der `std::array` Methode **data** direkten Zugriff auf das darunterliegende Array bekommt. In der Standard C++ Bibliothek findet man auch noch einige andere Containerklassen wie `std::list` oder `std::deque` die sich zur Speicherung von Daten anbieten, jedoch auch wie `std::vector` wesentlich komplexer sind und somit nur zum Einsatz kommen sollten wenn Speicherverbrauch und CPU Auslastung keine wesentliche Rolle spielen.

2.0.8 Zeichenketten

Bei textbasierten Schnittellen oder Dateioperationen kommt man um Zeichenketten nicht herum. In C++ kann man die Klasse `std::string` aus der C++ Standardbibliothek verwenden oder man benutzt weiterhin klassische C Strings. Der größte Vorteil von `std::string` ist dass dieser Datentyp seine exakte Größe kennt und somit unerlaubte Zugriffe außerhalb des zugewiesenen Speicher vermieden werden können. Dies ist ein bekanntes Problem bei C Strings in Kombination mit Funktionen aus der Standardbibliothek `string.h`, da man hier extrem aufpassen muss dass man nicht über die Grenzen hinaus operiert und Zeichenketten stets richtig mit `'\0'` terminiert.

Um die Funktionsweise von `std::string` besser zu verstehen analysieren wir die Größe der Datentypen `std::string` und `char`. Das die Größe von `char` 1 Byte ist sollte keine Überraschung sein, jedoch ist einem auf den ersten Blick unklar warum die Größe von `std::string` 24 Byte ist.

Datentyp	Größe mittels sizeof()
<code>std::string</code>	24
<code>char</code>	1

Tabelle 2: Größe von `std::string` und `char`

Analysiert man die `std::string` Klasse findet man heraus dass diese eine Instanziierung von der Template Klasse `std::basic_string` mit dem Datentypen `char` ist. Schaut man sich die Header-Datei dieser Klasse an kann man ein Datenschema wie im Quellcode 19 vereinfacht dargestellt erkennen. Nun weiß man auch warum `sizeof(std::string)` 24 ergibt. Die Daten setzen sich aus einem Pointer `*data` (4 byte) der auf den Datenblock zeigt, einer Variable `string_lenght` (4 byte) welche die Länge des Strings beinhaltet und einer Union (16 byte) welche als Buffer dient oder als Variable die Anzahl des allozierten Speichers am Heap beinhaltet.

```
1 char      *data;           // 4 byte
2 size_t    string_lenght;   // 4 byte
3
4 union {                      // 16 byte
5     char local_data[16];
6     size_t allocated_data;
7 }
```

Quellcode (19) Datenschema `std::string`

Solange die Zeichenkette weniger als 17 Zeichen beinhaltet, werden Daten im lokalen Datenblock von 16 Byte abgelegt auf welchen auch der Zeiger `*data` zeigt. Überschreitet die Zeichenkette die Länge von 16 Zeichen wird zur Laufzeit dynamisch Speicher am Heap reserviert wo

dann der neue String auch hin kopiert wird. Jetzt zeigt der Zeiger **data* nicht mehr auf den lokalen Buffer sondern auf den am Heap allozierten Speicher. Die Variable *allocated_data* beinhaltet nun die Größe des allozierten Speichers am Heap. Um Speicher zu sparen wurde der Buffer *local_data[16]* und die Variable *allocated_data* in eine Union verpackt da immer nur eine zur gleichen Zeit verwendet wird. Die Größe des allozierten Speichers am Heap muss mindestens so groß sein wie die Länge der eigentlichen Zeichenkette (*allocated_data* >= *string_lenght*).

Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht wie dynamisch Speicher am Heap alloziert wird wenn man die Länge von *std::string* dynamisch verändert. Dazu wird die Zeichenkette bei jedem Schleifendurchgang um das Zeichen '=' erweitert. Die Funktionen *malloc* und *free* wurden so manipuliert das diese jeweils ein Text ausgeben wenn Speicher am Heap alloziert oder de-alloziert wird.

<pre> 1 int main() { 2 3 std::string str; 4 5 for(int i=2; i <33; i++){ 6 str.append("="); 7 printf("%02d:_%s\n", i, 8 str.c_str()); 9 } 10 11 return 0; 12 } 13 14 15 16 17 /*EOF*/ </pre>	<pre> 02: = 03: == :: 15: ===== 16: ===== * Allocate 31 bytes 17: ===== 18: ===== :: 30: ===== 31: ===== * Allocate 61 bytes * Deallocate 32: ===== 33: ===== </pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quellcode (20) Dynamisches Verhalten

Ausgabe Quellcode (20)

Wie bei den C Strings ist auch bei *std::string* jede Zeichenkette mit '\0' terminiert. Fügt man das 17 Zeichen hinzu werden 31 Bytes am Heap alloziert da der interne Buffer mit 16 bytes jetzt zu klein ist. Wächst die Zeichenkette auf 32 Zeichen an werden weiter 61 Bytes alloziert wohin die neue Zeichenkette kopiert wird. Nach dem Kopier- Vorgang wird der alte Speicher von 31 Bytes wieder freigegeben. Erkennbar ist also dass der Speicher jeweils um das doppelte wächst sollte der momentane Speicher am Heap nicht mehr ausreichend sein. Die meisten modernen Compiler verfolgen eine ähnliche Strategie was das Verhalten von *std::string* angeht, jedoch kann man Unterschiede in der Größe des lokalen Buffers oder dem Algorithmus wie Speicher am Heap alloziert wird erkennen.

Die `std::string` Klasse stellt eine Reihe von Methoden zu Verfügung die das Arbeiten mit Strings sehr vereinfachen. Solche Methoden bieten eine ähnliche oder erweiterte Funktionalität wie die aus der Standard C Bibliothek `string.h` und können in diversen Dokumentationen nachgeschlagen werden. Da in kleinen embedded Systemen die Speicherverwaltung eine wichtige Rolle spielt sollen die Methoden welche Auskünfte über Kapazität und Länge der Zeichenkette geben näher analysiert werden. Grundsätzlich muss man bei der `std::string` Klasse zwischen 2 Größen unterscheiden: Der eigentlichen String Länge und des Speichers der momentan zu Verfügung steht. Tabelle 3 unterteilt die Methoden in genau diese 2 Gruppen.

String Länge	Kapazität
<code>size()</code>	<code>capacity()</code>
<code>length()</code>	<code>reserve()</code>
<code>empty()</code>	<code>shrink_to_fit()</code>
<code>resize()</code>	
<code>clear()</code>	
<code>max_size()</code>	

Tabelle 3: Überblick Methoden über Kapazität und Länge

Lediglich die Methoden `capacity()`, `reserve()` und `shrink_to_fit()` beziehen sich auf die Speicherverwaltung des Strings, bei allen anderen Funktionen geht es um die reine Länge der Zeichenkette. Da bei `std::string` Zeichen als ASCII-byte interpretiert werden liefern die Methoden `size()` und `length()` genau das gleiche Ergebnis. Das nachfolgende Beispiel soll Unterschiede noch einmal hervorheben.

Analysiert man die Ausgabe vom Quellcode 22 hat der String eine Länge von 10 Zeichen und eine Kapazität von 15 Byte nach der Initialisierung. Ruft man die Methode `reserve()` mit 500 auf, werden 500 Byte alloziert. Beim Aufruf der Methode `resize()` mit 5, wird lediglich die Zeichenkette auf eine Länge von 5 Zeichen reduziert. Die Methode `clear()` löscht alle Zeichen ändert aber nichts am alloziertem Speicher. Das Ergebnis der Methode `max_size()` ist nicht sehr aussagekräftig da dies nur ein konstanter Wert ist und **keine** Informationen über den noch verfügbaren Speicher am Heap liefert. Die Methode `shrink_to_fit()` die es ab C++11 gibt sollte den allozierten Speicher auf den kleinstmöglichen Wert begrenzen damit der eigentliche String noch hineinpasst. Dies funktioniert jedoch nur bedingt da die Methode nicht bindend ist und der Optimierungsgrad bei der Klasse selbst liegt.

<pre> 1 void print_string_info(std::string &str){ 2 3 printf("String:_%s\n", str.c_str()); 4 printf("Size()_=_%d\n", str.size()); 5 printf("Length()_=_%d\n", str.length()); 6 printf("Max_Size()_=_%d\n", str.max_size()); 7 printf("Capacity()_=_%d\n\n", str.capacity()); 8 } 9 10 int main(void) { 11 12 std::string msg("Hallo_Welt"); 13 print_string_info(msg); 14 15 msg.reserve(500); 16 print_string_info(msg); 17 18 msg.resize(5); 19 print_string_info(msg); 20 21 msg.reserve(50); 22 print_string_info(msg); 23 24 msg.clear(); 25 print_string_info(msg); 26 27 if(msg.empty()) { 28 device.printf("String_is_empty\n"); 29 } else { 30 device.printf("String_is_not_empty\n"); 31 } 32 } </pre>	<pre> String: Hallo Welt size() = 10 length() = 10 max_size() = 2147483647 capacity() = 15 String: Hallo Welt size() = 10 length() = 10 max_size() = 2147483647 capacity() = 500 String: Hallo size() = 5 length() = 5 max_size() = 2147483647 capacity() = 500 String: Hallo size() = 5 length() = 5 max_size() = 2147483647 capacity() = 50 String: size() = 0 length() = 0 max_size() = 2147483647 capacity() = 50 String_is_empty </pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quellcode (22) Kapazität von std::string

Ausgabe Quellcode (22)

Da wir jetzt einen relativ guten Eindruck über den Unterschied der Speicherverwaltung am RAM (Daten, Heap) von *std::string* gegenüber von C-Strings haben widmen wir uns jetzt dem ROM (Code) Speicherbedarf. Dieser wird hauptsächlich durch die Funktionen beeinflusst welche in der C und C++ Standardbibliothek definiert sind. Um den ROM Overhead von *std::string* herauszufinden wurde ein lauffähiges Programm was Strings manipuliert jeweils einmal mit Hilfe von C- Strings und *std::string* implementiert. Das nachfolgende Beispiel zeigt auch dass man bei *std::string* Operatoren wie + und « sinnvoll verwenden kann um zum Beispiel Strings aneinanderzuhängen.

Um keine Fehler in der Analyse zu begehen wurde das nachfolgende Beispiel kompiliert und gelinkt damit es auf einem realen Mikrocontroller lauffähig ist. Zur Analyse wurden nun die Größen der verschiedenen Link Sektionen von allen gelinkten Objekten der C und C++ Standardbibliothek und von der main.o Datei aufgelistet.

<pre> 1 #include <string> 2 3 4 int main() { 5 6 std::string str{"C++_ist_eine_"}; 7 8 str += "schoene_"; 9 str += "Sprache"; 10 int pos = str.find("schoene_"); 11 str.replace(pos, 8, "coooole_"); 12 13 return 0; 14 } 15 16 17 /*EOF*/ </pre>	<pre> 1 #include <string.h> 2 #include <stdlib.h> 3 4 int main() { 5 6 char *str = (char *) 7 malloc(sizeof(char)*50); 8 9 strcpy((char *)str, "C++_ist_eine_"); 10 strcat((char *)str, "schoene_"); 11 strcat((char *)str, "Sprache"); 12 13 char *help = strstr(str, "schoene_"); 14 strncpy(help, "coooole_", 8); 15 16 return 0; 17 } </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quellcode (24) std::string

Quellcode (25) C- String

Da wir hier ein komplett lauffähiges Projekt mit OS analysieren ist die Größe der einzelnen Sektionen nicht sehr aussagekräftig sondern die Differenz zwischen beiden Implementationen von größerer Bedeutung. Erkennbar ist dass die Link Größen von der C Bibliothek und der main.o relativ ähnlich ausschauen. Jedoch fügt die C++ Bibliothek mit rund 8,5 KByte einen relativ großen Overhead an ROM (Code) dazu. Dieser doch recht hoher Overhead ist dadurch zu erklären dass die C++ Bibliothek hier zum ersten mal ins Projekt eingebunden wurde und somit nicht alles auf *std::string* zurückzuführen ist. Der Overhead ist daher zum größten Teil einmalig da die Initialisierungs- Routinen der C++ Bibliothek doch einen recht großen Anteil an dem Overhead haben dürften. Wie groß jetzt der Overhead von *std::string* wirklich ist kann man nicht so generell sagen, da es extrem von den Compiler Einstellungen (Flags) und der verwendeten C++ Bibliothek abhängt. Bei Verwendung einer auf ROM optimierten C++ Bibliothek wie zum Beispiel der UlibC++, die speziell für embedded Projekte entwickelt wurde, kann man durchaus noch etwas Speicher sparen.

Module	.text	.data	.bss	Module	.text	.data	.bss
[lib]\c.a	25452	2472	11	[lib]\c.a	24319	2472	89
[lib]\c++.a	8558	20	204	[lib]\c++.a	4	0	0
main.o	372	0	132	main.o	355	0	132

std::string

C- Strings

Fazit

Ob man nun `std::string` in seinem Projekt verwenden soll, hängt eher von der generellen Frage ab ob man Funktionen aus der Standard C++ Bibliothek verwenden will. Kann man mit dem doch relativ hohen Overhead leben bietet `std::string` doch einige Vorteile gegenüber klassischen C- Strings. Jedoch geht eher Gefahr mit der dynamischen Speicher Verwaltung von `std::string` daheer, da diese doch relativ komplex sein kann und durchaus zu bösen Fehlern am Heap oder Stack führen kann.

2.0.9 Zeiger vs Referenzen

Wenn große Datenblöcke einer Funktion übergeben werden sollen, übergibt man meist nicht den kompletten Datenblock sondern eine Referenz oder einen Zeiger auf diesen. In C++ kann man dazu Referenzen benutzen welche meist eine bessere Alternative zu den Zeigern darstellen. Zeiger sind Variablen die auf eine Adresse im Speicher zeigen, welche Daten oder Programmcode beinhalten können. Mit Referenzen kann man dies auch, jedoch können diese während der gesamten Laufzeit immer nur auf ein Datenobjekt referenzieren und können daher auch als eine Art Alias für ein anderes Objekt angesehen werden. Im Gegensatz zu Referenzen können Zeiger ihren Wert verändern und somit während der Laufzeit auf beliebig viele Datenblöcke zeigen. Bei Zeigern besteht somit immer die Möglichkeit dass dieser nicht auf einen gültigen Speicherblock zeigt und sollte daher immer auf dessen Gültigkeit überprüft werden.

Wenn es ums manipulieren von Datenblöcken geht, sieht man sehr oft noch die Verwendung von Zeigern da man hier in einer Schleife alle Elemente eines Datenblock durch iterieren kann indem man den Zeiger bei jedem Durchlauf erhöht. Das nachfolgende Beispiel zeigt wie man die Verwendung von Zeigern vermeiden kann indem man seinen Code etwas moderner gestaltet. Das Beispiel- Programm soll die Daten von jeweils 100 Personen ausgeben.

```
1#include "stdio.h"
2
3typedef struct {
4    int age;
5    int size;
6} Person;
7
8
9void print_info(Person *per, int cnt){
10
11    for(int i=0; i<cnt; i++){
12        printf("Age:_%d\n", per->age);
13        printf("Size:_%d\n", per->size);
14    }
15 }
16
17int main(void) {
18
19    Person per[100];
20
21    print_info(per, 100);
22 }
```

Quellcode (28) Zeiger Beispiel

```
1#include <array>
2
3struct data {
4    int age;
5    int size;
6};
7typedef std::array<data, 100> Person;
8
9void print_info(Person &per){
10
11    for(auto &elem : per){
12        printf("Age:_%d\n", elem.age);
13        printf("Size:_%d\n", elem.size);
14    }
15 }
16
17int main(void) {
18
19    Person per;
20
21    print_info(per);
22 }
```

Quellcode (29) Referenz Beispiel

Bei dem Zeiger- Beispiel wird zuerst ein neuer Datentyp *Person* mittels *typedef struct* angelegt welche die Daten einer Person beschreibt. In der main Funktion wird dann ein Array vom Type *Person* mit der Größe 100 angelegt. Die Funktion welche die Informationen aller Personen ausgibt benötigt dann einen Zeiger auf das Array und die zusätzliche Information wie viele Elemente vom Type *Person* ausgegeben werden sollen.

Bei dem Beispiel mit Referenzen wird zuerst eine einfache Struktur *data* mittels *struct* angelegt und dann ein neuer Datentyp mithilfe der Containerklasse *std::array* angelegt. Die Größe von 100 ist ein fixer Bestandteil dieses Datentyps womit man sich die Anzahl der auszugeben Elemente als Funktionsparameter sparen kann. Zudem kann man mit der *for-each* Schleife die es seit C++11 gibt eleganter und sicherer durch alle Elemente durch iterieren.

Analyse

Die Analyse zeigt dass Referenzen keinesfalls einen Overhead an Speicher mit sich bringen. Das Beispiel mit Zeigern ist sogar um 9 Byte Größer was durch den zusätzlichen Parameter in der *print_info* Funktion zu erklären ist. Ersetzt man beim Zeiger Beispiel die Länge durch einen Konstanten Wert erzeugt der Compiler bei beiden Versionen genau das Gleiche Ergebnis.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -Os main.cpp \$ arm-none-eabi-size main ... text data bss 163 0 0 ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -Os main.c \$ arm-none-eabi-size main.o ... text data bss 155 0 0 ...</pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Analyse Zeiger Beispiel

Analyse Referenze Beispiel

Fazit

Als Fazit kann man sagen dass man Referenzen gegenüber Zeigern wenn möglich bevorzugen soll und seinen Code so gestalten soll das die Verwendung von Zeigern überflüssig wird. Referenzen haben den Vorteil dass die Syntax mit dem Punkt Operator übersichtlicher wirkt, eine Referenz immer auf ein gültiges Datenobjekt zeigt und somit sicherer ist und gewisse Vorteile zeigen wenn es um kopier- Konstruktoren oder das Überladen von Operatoren geht.

2.0.10 Namensräume

Namensräume (Namespaces) sind vor allem dann nützlich wenn es um die modulare Programmierung geht. Hiermit können Namens Konflikte im Vorhinein eliminiert werden. Jeder war schon einmal in der Situation dass der Compiler einen Fehler produziert hat weil eine Funktion oder Variable schon einmal in einer anderen Datei deklariert wurde. Dies tritt vor allem bei größeren Projekten oder bei der Verwendung von externen Bibliotheken auf.

2.0.11 Dynamische Speicher Verwaltung

2.0.12 Klassen

Konstruktoren

Destruktoren

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Analyse Tools	2
Tabelle 2	Größe von std::string und char	11
Tabelle 3	Überblick Methoden über Kapazität und Länge	13

Quellcodeverzeichnis

Quellcode 1	C++ Beispiel	3
Quellcode 2	C Beispiel	3
Quellcode 3	. . . . .	4
Quellcode 4	. . . . .	4
Quellcode 5	C++ Beispiel	5
Quellcode 6	C Beispiel	5
Quellcode 7	. . . . .	6
Quellcode 8	. . . . .	6
Quellcode 9	C++ Beispiel	7
Quellcode 10	C Beispiel	7
Quellcode 11	. . . . .	8
Quellcode 12	. . . . .	8
Quellcode 13	. . . . .	8
Quellcode 14	. . . . .	8
Quellcode 15	C- Array	9
Quellcode 16	std::array	9
Quellcode 17	. . . . .	10
Quellcode 18	. . . . .	10
Quellcode 19	Datenschema std:string	11
Quellcode 20	Dynamisches Verhalten	12
Quellcode 21	. . . . .	12
Quellcode 22	Kapazität von std:string	14
Quellcode 23	. . . . .	14
Quellcode 24	std::string	15
Quellcode 25	C- String	15
Quellcode 26	. . . . .	15
Quellcode 27	. . . . .	15
Quellcode 28	Zeiger Beispiel	17
Quellcode 29	Referenz Beispiel	17
Quellcode 30	. . . . .	18
Quellcode 31	. . . . .	18

Abkürzungsverzeichnis

ABC Alphabet

WWW world wide web

ROFL Rolling on floor laughing

A Anhang A

B Anhang B