

# **MASTERARBEIT**

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

## **Objektorientierung in Embedded Systems**

Ausgeführt von: Ney Fränz, BSc

Personenkennzeichen: 1610297013

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

Wien, den 8. Oktober 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, 8. Oktober 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 C/C++ Compiler, Entwicklungsumgebungen und Programmiersprachen welche in der embedded Entwicklung zu Einsatz kommen durchgeführt.

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

# Abstract

Much has happened in the development of embedded systems in recent years. Modern programming languages such as C/C++ have established themselves in the embedded development and complex programming in assembler should only be necessary in a few cases. This thesis mainly deals with the question of whether the use of an object-oriented programming language on platforms with only a few kBytes of flash memory makes sense and what advantages this brings to the development of embedded systems.

In particular, the most common concepts (classes, templates, etc.) of the object-oriented language should be analyzed in order to make a statement about performance and memory consumption. For this purpose, the compiled code is analyzed and various benchmark tests are performed. In addition, the comparison with a classical functional programming language is presented.

C/C++ is used as reference programming language in conjunction with the ARM Cortex-M architecture. This combination is very interesting for small and low-power IoT projects and is likely to prevail in the future. At the beginning, a state-of-the-art analysis is performed to list all available C/C++ compilers, IDE's and possible programming languages in the embedded development.

**Keywords:** Object-oriented programming, C/C++, Embedded Software, ARM Cortex

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>State-of-Art Analyse</b>	<b>1</b>
1.1	Mikrocontroller Hardware Analyse . . . . .	1
1.1.1	8bit vs 32bit CPU . . . . .	2
1.1.2	MCU Peripherie und Sicherheits- Features . . . . .	6
1.2	Work-Flow und Tools in der embedded Entwicklung . . . . .	8
1.2.1	Entwicklungs- Umgebungen . . . . .	8
1.3	Programmiersprachen für die embedded Entwicklung . . . . .	10
1.3.1	Kompilierte Programmiersprachen . . . . .	10
1.3.2	Interpretierte Programmiersprachen . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Embedded C++</b>	<b>12</b>
2.1	Einleitung . . . . .	12
2.2	Funktionen Überladen . . . . .	13
2.2.1	Beispiel . . . . .	13
2.2.2	Analyse . . . . .	13
2.2.3	Fazit . . . . .	14
2.3	Standardparameter . . . . .	15
2.3.1	Beispiel . . . . .	15
2.3.2	Analyse . . . . .	16
2.3.3	Fazit . . . . .	16
2.4	Funktions- Templates . . . . .	17
2.4.1	Beispiel . . . . .	17
2.4.2	Analyse . . . . .	17
2.4.3	Fazit . . . . .	18
2.5	Die Standardbibliothek . . . . .	19
2.5.1	Überblick . . . . .	19
2.5.2	Arrays . . . . .	20
2.5.3	Zeichenketten . . . . .	22
2.6	Zeiger vs Referenzen . . . . .	28
2.6.1	Analyse . . . . .	29
2.6.2	Fazit . . . . .	29
2.7	Namensräume . . . . .	30
2.7.1	Fazit . . . . .	31

2.8	Klassen . . . . .	32
2.8.1	Erstes Beispiel . . . . .	32
2.8.2	RAII-Idiom . . . . .	33
2.8.3	Konstruktoren . . . . .	34
2.8.4	Destruktoren . . . . .	36
2.8.5	Vererbung und Polymorphie . . . . .	37
2.8.6	Fazit . . . . .	42
2.9	Fehlerbehandlung . . . . .	43
2.9.1	Fazit . . . . .	45
2.10	Operatoren Überladen . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>48</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>49</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>50</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>51</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>52</b>

# 1 State-of-Art Analyse

Dieses Kapitel soll einen Überblick über aktuelle Mikrocontroller Architekturen und dessen Tools zur Entwicklung darstellen. Die Auswahl des richtigen Mikrocontrollers für ein Projekt ist eines der wichtigsten Schritte was einiges an Zeit und Recherche beansprucht. Auch das Auswählen der richtigen Toolchain oder die Frage ob ein RTOS oder OS zum Einsatz kommen soll wird immer wichtiger und hängt stark davon ab für welchen Mikrocontroller oder welche Architektur man sich entschieden hat. Stellt man während der Projektphase fest das der verwendete Mikrocontroller ungeeignet ist oder bestimmte Hardware Features fehlen, ist das meist ein großes Risiko welches den Erfolg des Projektes beeinflussen kann.

## 1.1 Mikrocontroller Hardware Analyse

Dieses Kapitel soll die Hardware Features und die gängigsten CPU Architekturen näher beschreiben. Der Trend neigt dazu dass immer mehr Funktionalität welche früher als externe Peripherie an den Mikrocontroller angeschlossen werden musste in diesen integriert wird. Dies führt dazu dass moderne Mikrocontroller immer komplexer werden was die Verwendung von Softwarebibliotheken welche die Hardware ansprechen immer notwendiger macht. Auch Co-degeneratoren mit denen man die komplexe Hardware über ein User Interface komfortabel konfigurieren kann finden immer mehr Einzug in die Entwicklungsumgebungen der verschiedenen Halbleiter Hersteller. Dieses Phänomen kann man gut an der Seitenanzahl vom Datenblatt gängiger Mikrocontroller erkennen. Hatten frühere 8 Bit Mikrocontroller noch 500 oder weniger Seiten findet man heute kaum noch ein Datenblatt mit weniger als 2000 Seiten. Auch die Energieeffizienz scheint eine immer wichtigere Rolle zu spielen was durch den steigenden Anteil von mobilen Geräten zu erklären ist.

### 1.1.1 8bit vs 32bit CPU

In den letzten Jahren hat sich die Anzahl an verfügbaren 32 Bit Mikrocontrollern (MCU's) erheblich erhöht was vor allem durch die zunehmende Popularität der ARM Cortex Architektur zu erklären ist. Auch preislich kommen sich beide Architekturen immer näher was die 32 Bit Architektur auch für den low-budget Bereich interessant macht. In dem low-budget und low-power Bereich haben sich vor allem Controller der Cortex-M Familie etabliert. Jedoch ist die 8 Bit Architektur, welche ihren Ursprung in den 1970er Jahren hatte keine Aussterbende Technologie und hat durchaus noch ihr Berechtigungsdasein. Einige Halbleiter Herstellern erweitern ihr 8 Bit Portfolio sogar noch um den heutigen Anforderungen besser Gerech zu werden. Bei der Suche nach einer geeigneter Architektur darf man sich nicht die Frage stellen welche Architektur besser ist, sondern welche Architektur besser zu den Anforderungen des jeweiligen Projektes passt. Dieses Kapitel wird einige Richtlinien aufstellen an denen man festhalten kann wenn es um die Auswahl der richtigen Architektur geht.

#### **System Größe und Peripherie**

In den meisten Fällen kennt man schon die ungefähre Größe an benötigtem Flash Speicher (Code Größe) während des Auswahlprozesses da man meist über eine Referenz Implementierung verfügt. Auch die benötigte Peripherie welche für die Umsetzung des Projektes erforderlich ist muss im Vorhinein bekannt sein. Diese 2 Kriterien sind in vielen Fällen schon ausreichend um eine geeignete Auswahl zu treffen. Werden weniger als 16 kByte an Code Größe benötigt und keine große Anforderungen an Peripherie Module wie Timer, I2C oder SPI vorausgesetzt empfiehlt sich die 8 Bit Architektur. Werden mehr als 64 kByte an Flash Speicher benötigt oder braucht man komplexe Peripherie sollte die 32 Bit Architektur bevorzugt werden. Diese Begrenzung ergibt sich schon alleine dadurch das 8 Bit MCU's welche mehr als 32 kByte an Flash Speicher aufweisen relativ rar sind und meist Peripherie beinhalten welche nicht so komplex ist, jedoch für viele Anwendung völlig ausreichend sind. Befindet man sich genau zwischen diesen 2 Bereichen (16-64 kByte Code Größe) und hat keine spezielle Anforderungen an Peripherie muss man noch weitere Kriterien berücksichtigen um die richtige Auswahl zu treffen.

#### **Chipgehäuse**

Einige Halbleiter Hersteller haben 8 Bit MCU's im Sortiment welche eine extrem kleine Chip Fläche aufweisen mit vergleichsweise wenig IO Pins. Solche Chips bieten sich für sehr kleine low-budget Applikationen an für welche nur sehr wenig Funktionalität benötigt wird. Solche MCU's findet man häufig in integrierten Sensoren welche einfache Messungen durchführen und die Ergebnisse dann über UART oder I2C an einen Host Controller übertragen. Solche Chips bieten oft nur einige kBytes an Flash Speicher mit sehr wenig Peripherie und passen daher in Chipgehäuse welche nicht mehr als 2 x 2 Millimeter beanspruchen. 32 Bit MCU's mit so kleinen Dimensionen sind kaum erhältlich.



## Code und RAM Effizienz

Code und RAM Effizienz ist meist ein sehr heikles Thema wenn beide Architekturen miteinander verglichen werden. Die MCU Architektur sagt nichts über die Befehlsbreite der Instruktionen aus und beträgt bei 8 Bit CPU's meist 16 Bit. 32 Bit MCU's der Cortex-M Familie unterstützen den Thumb oder Thumb-2 Befehlssatz welcher 16 Bit und einige 32 Bit Instruktionen beinhaltet. Somit beeinflusst die Länge der Instruktionen die Code Effizienz kaum, jedoch sind 32 Bit Instruktionen oftmals viel mächtiger da Sie mehrere Bytes auf einmal verschieben können. Auch 32 Bit Mathematik Operationen können bei einer 32 Bit Architektur mit einer Instruktion erledigt werden wobei die 8 Bit Architektur hierfür mehrere Instruktionen benötigt. Somit ist die Code Effizienz bei der 32 Bit Architektur oftmals besser bei Mathematische Operationen oder bei Operationen wo viele Daten hin und her geschoben werden.

Bei der RAM Effizienz kann die 8 Bit Architektur etwas Punkten da hier der RAM Byte-weise organisiert ist. Bei der 32 Bit Architektur ist der RAM in Blöcke von jeweils 4 Byte organisiert. Datentypen wie *uint16\_t* oder *uint32\_t* benötigen aber eine bestimmte Anordnung womit es zu Lücken im RAM kommen kann. Das nachfolgende Beispiel zeigt eine Struktur welche eine Reihe von Daten beinhaltet. Damit man schnellen Zugriff auf die jeweiligen Variablen bekommt sollten Datentypen wie *uint16\_t* an Adressen welche ein vielfaches von 2 sind beginnen und *uint32\_t* Variablen an Adressen welche ein vielfachen von 4 sind beginnen. Wie in Abbildung 2 ersichtlich muss der Compiler gegebenenfalls Lücken mit sogenannten *Padding* Bytes auffüllen um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Will man RAM Speicher sparen kann man bei den meisten Compiler dieses Verhalten abdrehen muss jedoch mit Performance Einbussen rechnen da nicht mehr so schnell auf die Variable zugegriffen werden kann. [7]

```
1 struct example {  
2     uint8_t val_a;  
3     uint16_t val_b;  
4     uint32_t val_c;  
5 }
```

Quellcode (1) Padding

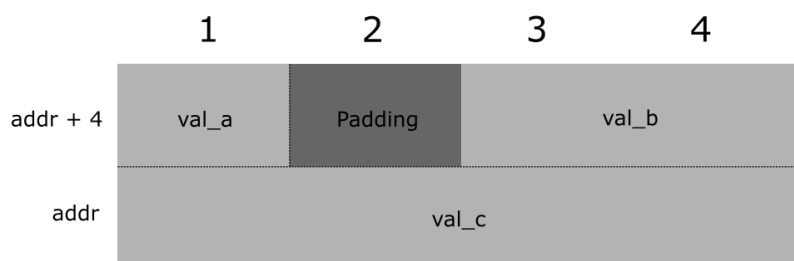


Abbildung 2: Padding

## Benutzerfreundlichkeit

32 Bit MCU's haben meistens ein sehr mächtiges Speicher Model indem Peripherie, RAM und ROM Module alle in ein Adressraum eingebettet sind. Diesen Vorteil sieht man vor allem bei der ARM Cortex Architektur da Software von 3 Herstellern nicht für jede beliebige MCU komplett umgeschrieben werden muss. Hersteller welche RTOS Systeme oder Software Stacks bereitstellen haben es hier einfacher da sie ihr Produkt nur für eine bestimmte Architektur bereitstellen müssen und meistens nur noch geringfügige Änderungen nötig sind um das Produkt auf einer MCU eines beliebigen Herstellers laufen zu lassen welcher die benötigte Architektur unterstützt. Moderne Architekturen bieten auch einige Features welche für die Verwendung eines OS gedacht sind. Die nachfolgende Aufzählung listet einiger dieser OS Features.

- **System Tick** - Spezieller Timer welcher den Takt für das Betriebssystem bereitstellt.
- **Context Switching** - Interrupt Mechanismus welcher für das Umschalten mehrerer Task benutzt werden kann.
- **Supervisor Call** - Interrupt welcher Software mäßig aufgerufen werden kann um OS Kernel Funktionalitäten auszuführen.

Dies alles führt dazu das 32 Bit Architekturen wie die ARM Cortex Familie sehr C/C++ freundlich zu programmieren sind und ohne spezielle Assembler Befehle programmiert werden können. Bei 8 Bit MCU's kommt man mit reinem C meist nicht ganz weit da oft spezielle Befehle benötigt werden um mit Modulen wie EEPROM oder SRAM zu agieren. Bei MCU's mit CISC Befehlssatz wie beim klassischen 8051 kann dies sogar Vorteile haben da Operationen an Variablen direkt im Speicher vorgenommen werden können und nicht wie beim RISC Befehlsatz zu erst geladen dann manipuliert und nachher zurückgeschrieben werden müssen. Diesen Overhead kann man heutzutage aber fast vernachlässigen da die Taktfrequenz bei 32 Bit MCU's oft viel höher ist. Auch das wechseln des MCU Herstellers weil der verwendete Mikrocontroller möglicherweise nicht mehr hergestellt wird, ist bei der 8 Bit Architektur meist mit viel Arbeit verbunden. Hat man dieses Problem bei einer MCU der Cortex Familie kann man relativ einfach zu einem andern Hersteller wechseln ohne einen enormen Arbeitsaufwand zu befürchten. Auch Tools wie Debugger oder Programmiergeräte können bei solchen Architekturen universeller eingesetzt werden und müssen nicht ständig ersetzt werden sollte man den Mikrocontroller wechseln. Ein weiteres Kriterium ist das know-How welches die embedded Entwickler benötigen und für die jeweilige Architektur Software zu schreiben. 32 Bit Architekturen sind da oft viel komplexer und setzen ein hohes Wissen an der Programmierer voraus. 8 Bit Architekturen punkten dahingegen mit recht einfacher Peripherie welche vergleichsweise einfach zu programmieren ist. Eine Timer Initialisierung benötigt bei einer 8 Bit MCU weniger als 5 Instruktionen wo hingegen oft 40 oder mehr Instruktionen benötigt werden um dies bei einer 32 Bit Architektur zu erledigen.

## Stromverbrauch

Da der Markt an batteriebetriebenen Geräten ständig wächst ist der Stromverbrauch ein sehr wichtiges Kriterium bei der Auswahl einer MCU. Abbildung 3 zeigt den Stromverbrauch über die Zeit für die jeweilige Architektur.

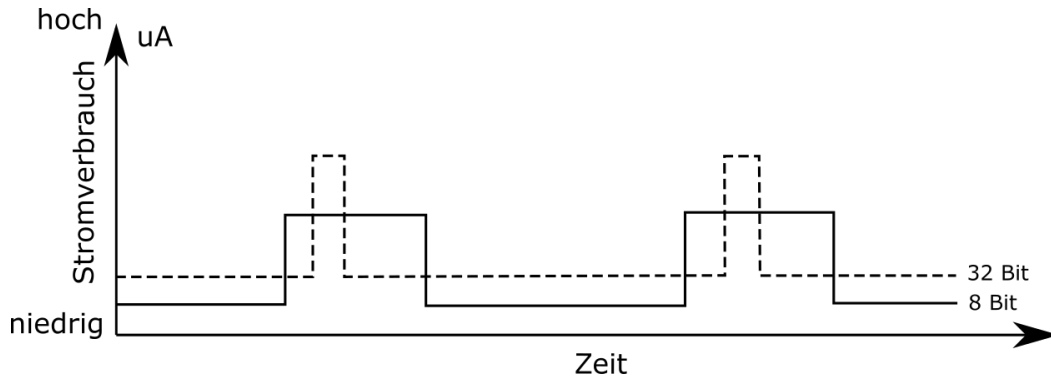


Abbildung 3: Stromverbrauch

Schaut man sich die Datenblätter der Hersteller an ist der Stromverbrauch meistens in  $\mu\text{A}/\text{Hz}$  angegeben. Somit hängt der Stromverbrauch stark von der CPU Frequenz ab mit der der Mikrocontroller getaktet wird. Dies sind berechnete Richtwerte und hängen natürlich stark davon ab wie der Mikrocontroller betrieben wird. Peripherie Module wie ADC oder DAC können durchaus für einen erhöhten Stromverbrauch verantwortlich sein da diese während der Abtastung relativ viel Strom verbrauchen. Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist der Basis Stromverbrauch bei 8 Bit Controllern oftmals noch etwas geringer als beim 32 Bit Konkurrenten. Jedoch benötigen 32 Bit MCU's meist weniger Zeit um eine Aufgabe zu erledigen und können dann wieder in einen Stromsparmodus versetzt werden um Energie zu sparen. Hat man eine Applikation welche immer nur periodisch eine Berechnung erfordert können Controller der ARM Cortex-M Familie Punkten da diese kurz Aufwachen um die Aufgabe zu erledigen und dann wieder in einen Stromsparmodus versetzt werden. Für solche Applikationen welche oftmals komplett Interrupt gesteuert sind und in der main Funktion lediglich über ein *sleep()* Aufruf verfügen kann der Stromverbrauch im Durchschnitt etwas geringer sein als bei 8 Bit Controllern. Bei Anwendungen welche ein kontinuierliches Berechnen von Daten erfordern können 8 Bit MCU's durchaus noch Punkten da der Basisstromverbrauch etwas geringer ist. Schlussfolgernd kann man über den Stromverbrauch sagen dass dieser nicht alleine von der verwendeten Hardware abhängig ist sondern auch vom Software Konzept des jeweiligen Projektes abhängt.

## Fazit

Abbildung 4 gibt schlussfolgernd noch mal einen kurzen Überblick in welchen Anwendungsbereichen die jeweilige Architektur Punkten kann. Die 32 Bit Architektur zeigt vor allem ihre Stärken wenn viel ROM Speicher oder IO's benötigt werden. Auch das Angebot an Software von 3 Herstellern ist bei 32 Bit Controllern weitreichender. 8 Bit MCU's können durch Einfachheit, kleinere Chipgehäuse und attraktivere Preise durchaus noch interessant für ein Projekt sein. [8]

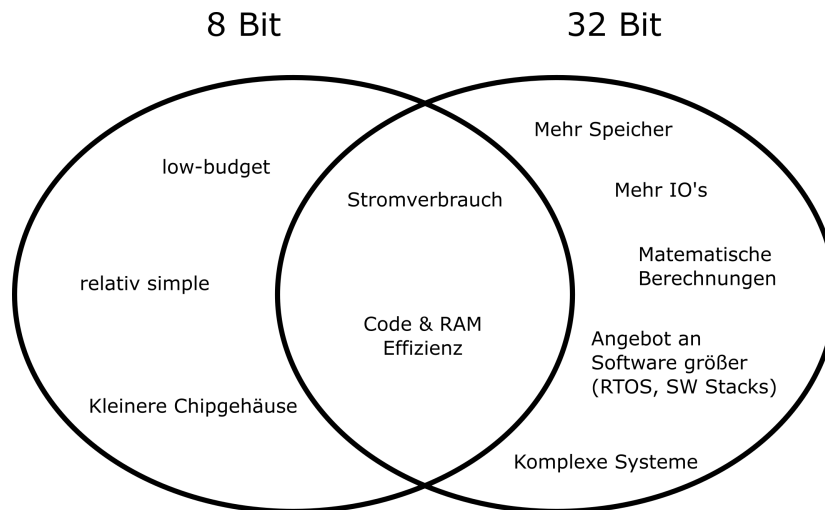


Abbildung 4: Überblick 8 Bit vs 32 Bit MCU

### 1.1.2 MCU Peripherie und Sicherheits- Features

Der Trend neigt dazu das Mikrocontroller Peripherie immer komplexer wird und diese auch unabhängig von der CPU operieren kann. Moderne Mikrocontroller haben neben den üblichen Peripherie Modulen wie Timern, ADC, DAC, UART, SPI oder I2C noch weitere Module welche für moderne IoT Projekte unerlässlich sind. Die nachfolgende Aufzählung listet einige dieser Module und beschreibt in welchen Bereichen diese Anwendung finden.

- **Brown Out Detector (BOD)** - Möchte man die Betriebsspannung überwachen kann man den BOD so konfigurieren dass dieser ein Interrupt generiert sollte die Spannung ein bestimmtes Level unterschreiten. Dies ist vor allem bei batteriebetriebenen Geräten sinnvoll um dann noch persistente Variablen im ROM abzuspeichern und wenn möglich in den Stromsparmodus zu wechseln.
- **Direct memory access (DMA)** - Ein DMA ermöglicht es das Peripherie Module wie UART oder SPI direkt auf den Speicher zugreifen können ohne das die CPU involviert ist. Somit haben Kommunikations- Module direkten Zugriff auf den Sende- oder Empfangs Buffer und die CPU kann während dieser Zeit andere Aufgaben erledigen oder in den Schlaf Modus wechseln um Strom zu sparen.

- **CRC Checksum** - Viele Protokolle benutzen eine CRC (cyclic redundancy check) Checksumme um die Daten auf Gültigkeit zu prüfen und um mögliche Bit Fehler zu erkennen. Der Algorithmus hierfür ist relativ simple und kann durchaus auch in Software implementiert werden jedoch benötigt dies relativ viel Rechenleistung und beansprucht je nach CPU relativ viel Zeit. Eine Implementierung in Hardware ist da viel effizienter. Jedoch ist das verwendete Polynom welcher bei Hardware Lösungen zum Einsatz kommt meist fix und kann nicht verändert werden.
- **Random Number** - Mehrere Technologien wie Bluetooth oder DALI (Digital Addressing Lighting Interface) benötigen einen Zufallsgenerator welcher für die Adressvergabe am Bus benötigt wird. Auch Softwarebibliotheken wie die Standard C Bibliothek können darauf zugreifen wenn es um Funktionen wie *srand()* oder *rand()* geht.

Da viele IoT Geräte mittlerweile mit dem Internet verbunden sind und einige Protokolle bestimmte Verschlüsselungs- Algorithmen voraussetzen sind einige Sicherheits- Features mittlerweile Standard bei Mikrocontrollern welche über Kommunikationsschnittstellen wie Ethernet oder Bluetooth unterstützen. Die nachfolgende Aufzählung listet einiger dieser Sicherheits-Features.

- **Advanced Encryption Standard (AES)** - AES ist ein symmetrisches Verschlüsselungsverfahren welches mehrere Schlüssellängen wie 128, 160, 224 oder 256 Bit unterstützt. Ein Merkmal von AES ist das der Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln identisch ist. AES findet Anwendung in verschiedenen Verschlüsselungsstandards wie WPA2, SSH sowie in der Softwarebibliothek OpenSSL. [9]
- **Secure Hash Algorithm (SHA)** - SHA wird benutzt um Prüfsummen von Daten zu erstellen um zu verifizieren dass diese nicht manipuliert wurden. SHA wird vor allem bei der Generierung von Hashes benutzt. Im Gegensatz zu der CRC Prüfsumme welches für die reine Fehlererkennung in Paketen welche über ein fehleranfälliges Medium übertragen werden gedacht ist wird SHA benutzt um Daten auf Manipulationen zu Überprüfen. SHA Algorithmen wurden entwickelt um die Kollisions- Wahrscheinlichkeit zu minimieren, um zu garantieren das es nur einen bestimmten Input für einen Hash geben kann. [10]
- **Secure Boot** - Einige Controller unterstützen Secure Boot um die Echtheit bzw. Unverfälschtheit einiger Softwareteile zu prüfen bevor diese exekutiert werden. Dieses Verfahren kommt vor allem bei Bootloadern zum Einsatz.
- **Memory Protection Unit (MPU)** - Die MPU ist meist in der Memory Management Unit (MMU) integriert und schützt Speichersegmente vor unerlaubten Zugriff. Eine mögliche Anwendung wäre das man User Threads nicht erlaubt auf Speicher zuzugreifen welcher vom OS-Kernel gemanagt wird.
- **Triple DES (3DES)** - Bei elektronischen Bezahlssystemen kommt dieses Protokoll zum Einsatz.

## 1.2 Work-Flow und Tools in der embedded Entwicklung

Die Tools welche heute in der embdded Entwicklung zum Einsatz kommen werden immer mächtiger und beinhalten immer mehr Funktionalität welche dem Entwickler helfen soll bessere Software für die jeweilige Hardware zu schreiben.

### 1.2.1 Entwicklungs- Umgebungen

Fast alle Halbleiter Hersteller bieten Entwicklungsumgebungen (IDE's) an um Software für den jeweilige Controller zu schreiben. Die meisten dieser IDE's basieren auf dem Eclipse oder Microsoft Visual Studio (MSV) Framework welche von Haus aus schon viel Funktionalität wie Editor oder Versionsverwaltung von Dateien mitbringen. Eine gute IDE ist heutzutage durchaus schon ein Grund sich für einen bestimmten Controller eines Herstellers zu entscheiden. Die Entwicklungsumgebungen werden immer wichtiger da die Hardware immer komplexer wird und gute Software Lösungen von Nöten sind um dieser Komplexität gerecht zu werden. Die nachfolgende Aufzählung listet einiger dieser Tools die in modernen IDE's mittlerweile integriert sind.

- **Editor** - Einfache Text Editoren gehören längst der Vergangenheit an. Tools wie Syntax-Highlighting oder Code-Vervollständigung sind unerlässlich geworden. In Projekten mit tausenden an Dateien braucht man mächtige Tools um z.B. herauszufinden in welchen Dateien eine bestimmte Funktion aufgerufen wurde.
- **Debugger** - Breakpoints oder Watchpoints reichen heute oft nicht mehr aus um einen Fehler in komplexen Systemen zu detektieren. Benutzt man ein OS oder RTOS sind Tools welche die Exekution der einzelnen Task grafisch aufzeichnen durchaus nützlich. Auch Support für Hardware Tracing findet man heute in den meisten IDE's. Einige Debugger bieten sogar Digitale Eingänge an welche man sich dann über die Zeit grafisch in der IDE darstellen lassen kann. Dieses Feature ist vor allem für kleine Mikrocontroller interessant welche nur minimale Debug Funktionalitäten bereitstellen.
- **Command Line Version** - Die meisten IDE's bieten eine abgespeckte Version der IDE an mit der man über die Kommandozeile das Projekt kompilieren kann. Dies ist vor allem für große Firmen nützlich da diese meist über komplexe Build Systeme verfügen welche auf einem Server laufen.
- **Dokumentation** - Die Datenblätter der einzelnen Controller werden immer länger und komplizierter. Heutige IDE's beinhalten jegliche Datenblätter oder Applikation Notes und werden komfortabel in der IDE geöffnet und relevante Teile werden hervorgehoben.
- **Code Beispiele** - Diverse Code Beispiele wie man die einzelnen Peripherie Module konfiguriert und in Betrieb nimmt sind in der IDE integriert und helfen enorm bei der Entwicklung ohne sich zuerst durch eine 3000 Seiten Dokumentation durchkämpfen zu müssen.

- **Software Bibliotheken** - Bibliotheken welche die komplexe Hardware abstrahieren werden immer beliebter bei den Entwicklern da man nicht mehr jedes Bit einzeln setzen muss um eine bestimmte Hardware in Betrieb zu nehmen. Diese Bibliotheken stellen meist einfache API Funktionen bereit um ein Peripherie Modul zu initialisieren und um mit diesem Modul auf hoher Ebene zu interagieren. Auch mögliche Hardware Fehler in verschiedenen Versionen des jeweiligen Chips werden in solchen Bibliotheken berücksichtigt was einem eine längere Fehlersuche oft erspart. Diese Bibliotheken unterstützen aber meist nicht die komplette Funktionalität einer Peripherie und wenn man spezielle Funktionen nutzen möchte muss man dies sehr oft noch selber implementieren.
- **Code Generatoren** - Einige Hersteller integrieren sogenannte Code Generatoren in ihre IDE's welche es erlauben das jeweilige Peripherie Modul komfortabel über eine GUI zu konfigurieren. Somit kann man z.B. die Baudrate oder Geschwindigkeit einer Seriellen Schnittstelle einfach einstellen. Die dazugehörigen TX und RX Pins können dann auch einfach über eine Dropdown Liste ausgewählt werden und werden dann automatisch richtig konfiguriert. Code Generatoren bieten sich perfekt an um schnell Funktionalitäten zu testen oder zum entwerfen von Prototypen. Jedoch sind diese in der professionellen Entwicklung noch nicht sehr beliebt da es schwer nachvollziehbar ist was diese Generatoren eigentlich machen. Auch sind diese Konfigurationen dann meist in irgendwelchen XML Dateien gespeichert welche dann schwer in ein Versionsverwaltungssystem zu integrieren sind.
- **Register View** - Während des Debuggen ist es extrem nützlich wenn man die einzelnen Register des Mikrocontrollers auf einen Blick sieht ohne sich diese vorher in separate Variablen kopieren zu müssen.
- **Simulatoren** - Simulatoren bieten einige Hersteller schon länger an und funktionieren recht gut solange nur digitale Eigenschaften wie das toggeln eines Pins simuliert werden. Dies ist recht komfortabel da man keine Hardware angeschlossen haben muss was es dem Entwickler erlaubt verschiedene Funktionalitäten schon offline zu testen.
- **Versionsverwaltung** - Heutzutage bieten die meisten IDE's schon Schnittstellen zu den gängigsten Versionsverwaltungssystemen wie GitHub oder RTC (IBM) an. Versionsverwaltungssysteme gewinnen immer mehr an Bedeutung da der Software Teil bei embedded Projekten ständig wächst und ein vernünftiges Projektmanagement ohne ein Versionsverwaltungssystem nicht mehr möglich ist.
- **Test und Verifizierung** - Tools welche statische Code Analysen durchführen um mögliche Fehler zu finden werden von immer mehr Herstellern angeboten und werden auch bei den Entwicklern immer beliebter. Auch Programme welche den Code auf die Einhaltung verschiedener Richtlinien wie MISRA-C überprüfen finden immer mehr Einzug in die Entwicklungsumgebungen der verschiedenen Hersteller.

## 1.3 Programmiersprachen für die embedded Entwicklung

Dieses Kapitel soll die verschiedenen Programmiersprachen welche in der embedded Entwicklung zum Einsatz kommen kurz erläutern. Der Unterschied zwischen Programmiersprachen welche für die jeweilige Plattform kompiliert werden und Programmiersprachen welche eine Run-time Umgebung benötigen soll hier im Mittelpunkt stehen. Dieses Kapitel bezieht sich hauptsächlich auf kleinere Controller auf welche man kein voll Funktionsfähiges Betriebssystem wie Linux installieren kann.

### 1.3.1 Kompilierte Programmiersprachen

Will man hochperformante Software entwickeln welche die Hardware optimal ausnutzt ist eine Programmiersprache welche für die jeweilige Plattform kompiliert wird unerlässlich. Hier dominieren vor allem die Programmiersprachen C und C++ für welche es auch eine Reihe von verschiedenen Compilern gibt. Die nachfolgende Aufzählung listet die bekanntesten C/C++ Compiler.

- **GCC** - Der GCC Compiler ist ein frei verfügbarer Compiler und bietet Unterstützung für die gängigsten MCU Familien wie ARM Cortex, AVR oder PIC.
- **ARM** - Der ARM Compiler ist noch relativ jung und basiert ab der Version 6 auf der LLVM und Clang Technologie. Er findet vor allem Einsatz im Build System des mbed-os Projektes.
- **Keil** - Keil entwickelte den ersten C Compiler für den 8051. Da Keil im Jahr 2005 von ARM aufgekauft wurde ist dieser nun ein Bestandteil des ARM Projektes.
- **IAR** - IAR Systems bietet auch einen C/C++ Compiler für die gängigsten Architekturen. IAR wirbt vor allem mit Support welcher für Firmen interessant sein könnte und bessere Optimierungen was Code und RAM Effizienz betrifft.

ARM und IAR bieten zusätzlich noch IDE's und Software Komponenten wie RTOS Systeme an. Auch Debugger und Programmiergeräte kann man von diesen Firmen beziehen. Die meisten dieser Toolchains beinhalten Compiler, Linker und nützliche Tools welche dem Entwickler bei der Fehlersuche helfen.

Neunzig Prozent der embedded Projekte welche auf kleinen bis mittelgroßen Mikrocontrollern laufen werden noch mit klassischem C programmiert was vor allem an Softwarekomponenten von Drittanbietern liegt welche noch nicht für C++ angepasst wurden. Auch Projekt Vorlagen in C++ und Compiler welche C++ unterstützten haben es noch nicht in alle IDE's der verschiedenen Hersteller geschafft. Jedoch wird C++ immer beliebter und findet nach und nach Einzug in die embedded Entwicklung. Kapitel 2 beschäftigt sich im Detail mit den Vorzügen von C++ in embedded Projekten.



### 1.3.2 Interpretierte Programmiersprachen

Programmiersprachen wie Python oder Java welche voraussetzen das auf der jeweiligen Hardware eine Run-Time Umgebung läuft gewinnen immer mehr an Popularität in der embedded Welt. Dies liegt vor allem daran dass Programmiersprachen wie Python relativ simple sind und dementsprechend auch leicht erlernt werden können. Hat man die Möglichkeit Linux oder ein optimiertes Windows für IoT auf einer Plattform aufzusetzen welche Python oder Java unterstützt ist dies durchaus sinnvoll. Projekte wie Raspberry Pi oder Beagle Board verfolgen dieses Konzept ja schon seit längerem erfolgreich. Ob sich solche Konzepte in der professionellen Entwicklung durchsetzen werden wird die Zukunft zeigen. Systeme welche hohe Echtzeitanforderungen haben oder in kritischen Umgebungen zum Einsatz kommen werden wahrscheinlich noch länger an dem klassischen Model festhalten. Script Sprachen wie Java-Script oder Node.js werden auch immer beliebter. Diese werden oft in Produkten eingesetzt wo man dem Benutzer nachträglich die Möglichkeit geben will die bestehende Funktionalität beliebig zu erweitern. Raumsteuergeräte welche schon meist viel Funktionalität mitbringen können z.B. erweitert werden dass diese auf ein Web Interface eines Projektors zugreifen können um diesen einzuschalten zu können sollte der Raum belegt sein. Dafür sind Scripte ideal da Sie einfach auf ein Gerät geladen werden können um dessen Funktionalität zu erweitern da die Hersteller standardmäßig nicht alle Schnittstellen zu anderen Geräten unterstützen können. Was dieses Thema betrifft werden wir in den nächsten Jahren noch viele Neuerungen erfahren und welche Programmier- oder Script Sprache schlussendlich das Rennen macht wird die Zukunft zeigen.

## 2 Embedded C++

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.

### 2.1 Einleitung

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

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

Tabelle 1: Analyse Tools

Die Resultate über Performance und Speicher Overhead welche in den nachfolgenden Kapiteln ermittelt werden sind keine in Stein gemeißelten Werte und sollen nur einen ungefähren Überblick über den zu erwarteten Overhead geben. Die Ergebnisse können je nach der verwendeten Toolchain oder CPU etwas variieren, sollten jedoch für die meisten Anwendungsfälle gültig sein.

## 2.2 Funktionen Überladen

In C++ ist es erlaubt mehrere Funktionen mit dem gleichen Namen zu deklarieren, 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.

### 2.2.1 Beispiel

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

```
1 int add(int a, int b){
2     return a + b;
3 }
4
5 double add(double a, double b){
6     return a + b;
7 }
8
9 int i_1=3, i_2=4, i_3=0;
10 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 }
```

Quellcode (2) C++ Beispiel

```
1 int add_i(int a, int b){
2     return a + b;
3 }
4
5 double add_d(double a, double b){
6     return a + b;
7 }
8
9 int i_1=3, i_2=4, i_3=0;
10 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 }
```

Quellcode (3) C Beispiel

### 2.2.2 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 erzeugen Funktionsüberladungen keinen zusätzlichen Speicher Overhead. Auch lange Funktionsnamen können vermieden werden 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

### 2.2.3 Fazit

Funktionsüberladungen erzeugen keinen Speicher Overhead und sind zu empfehlen wenn sich der Funktionsblock erheblich in verschiedenen Implementierungen unterscheidet. Ändern sich nur die Datentypen wie es in diesem Beispiel der Fall ist sind *Funktionstemplates* zu bevorzugen. Ändert sich nur die Anzahl der Parameter kann man oftmals mit *Standardparametern* (default arguments) wie es sie in C++ gibt eleganteren Code erzeugen.

## 2.3 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 jeweilige Argument fehlen. Im klassischen C gibt es mehrere Möglichkeiten so ein Verhalten nach zu implementieren, jedoch ist dies ohne zusätzlichen Quellcode meist nicht möglich.

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

Quellcode (6) C++ Beispiel

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

Quellcode (7) C Beispiel

### 2.3.2 Analyse

Bei dieser Analyse ist die Größe der *main* Funktion im ROM wichtig, da in dieser die *uart\_init* Funktion aufgerufen wird. Der C und C++ Compiler allozieren jeweils 240 Byte für die *main* Funktion in der *.text* Sektion. Analysiert man den generierten Assembler Code der *main* Funktion von beiden Compilern kann man keinen Unterschied feststellen. Somit ergänzt der C++ Compiler lediglich die nicht gegebenen Argumente mit den Standard Parametern während des Kompilierens. Die *uart\_init* Funktion alloziert in der C Version mehr Speicher da hier gegebenenfalls die Standardparameter noch gesetzt werden müssen.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -O0 main.cpp \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 00000048 t _ZL9uart_initiiii 00000000 000000f0 T main 00000000 00000004 B ret ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-gcc -c -O0 main.c \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000000 00000098 t uart_init 00000000 000000f0 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 möglichst links in die Funktionsparameter-Liste packt. Bei der Seriellen Schnittelle wäre das die Baudrate da sich die restlichen Parameter nicht so häufig ändern.

### 2.3.3 Fazit

Standardparameter sind sehr nützlich wenn es sich um Konfigurations-Funktionen handelt da man diese übersichtlicher gestalten kann. Auch Funktionsaufrufe mit langen Parameter Listen kann man vermeiden wenn einem die Standard Werte genügen. Einen Speicher Overhead oder Änderungen in der Laufzeit des Programms sind nicht zu befürchten.

## 2.4 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 Datentypen erneut implementieren muss.

### 2.4.1 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 int i_1=3, i_2=4, i_3=0;
2 double d_1=5, d_2=6, d_3=0;
3
4 template <typename T> T add(T a, T b) {
5     return a + b;
6 }
7
8
9
10
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 }
```

Quellcode (10) C++ Beispiel

```
1 int i_1=3, i_2=4, i_3=0;
2 double d_1=5, d_2=6, d_3=0;
3
4 int add_i(int a, int b) {
5     return a + b;
6 }
7
8 double add_d(double a, double b) {
9     return a + b;
10 }
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 }
```

Quellcode (11) C Beispiel

### 2.4.2 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 48 Byte für die *int* und 76 Byte für die *double* 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 0000004c W _Z3addIdET_S0_S0_ 00000000 00000030 W _Z3addIiET_S0_S0_ ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-gcc -c -O0 main.c \$ arm-none-eabi-nm a.out --print-size ... 00000030 0000004c T add_d 00000000 00000030 T add_i ...</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 verschiedenen Objekt Dateien gibt. Dieses Compiler Verhalten ist auch unter dem Namen **Borland Model** bekannt.

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

### 2.4.3 Fazit

Funktionstemplates erhöhen die Lesbarkeit des Quellcodes und bewirken das man Fehler nur in einer Funktion beheben muss was die Wartbarkeit erheblich erhöht. 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.



## 2.5 Die Standardbibliothek

Dieses Kapitel widmet sich der Standardbibliothek welche ein wichtiger Bestandteil von C++ darstellt. Einige Begriffe welche im Zusammenhang mit der Bibliothek öfters genannt werden sollen hier näher beschrieben werden und auch die Frage ob sich der Einsatz in embedded Projekten lohnt soll hier beantwortet werden.

### 2.5.1 Überblick

Die Standardbibliothek ist ein fester Bestandteil von C++ und wird von der ISO Organisation verwaltet. Diese wurde ursprünglich unter dem Namen STL (Standard Template Library) von Hewlett-Packard entwickelt und in den C++ Standard integriert. Jedoch handelt es sich nach wie vor um 2 getrennte Bibliotheken die parallel weiterentwickelt werden. Die C++ Standardbibliothek beinhaltet nützliche Funktionen und Algorithmen welche sehr beliebt sind. Zusätzlich beinhaltet die Standardbibliothek auch die komplette C Bibliothek.

#### Container-Klassen

Container-Klassen sind generische Klassen welche andere Objekte und Datentypen speichern und verwalten können. Diese sind meistens als Template-Klassen implementiert wodurch man diese für die meisten Datentypen benutzen kann. Die bekannteste Container sind *std::vector* und *std::array* welche auch in den nachfolgenden Kapiteln analysiert werden.

#### Iteratoren

An sich sind Iteratoren nichts anderes als intelligente Zeiger welche benutzt werden um durch die Elemente eines Containers zu iterieren. Iteratoren sind reine Zugriffsobjekte und stellen die Schnittstelle für Algorithmen in C++ dar.

#### Algorithmen

Mit Algorithmen kann man Manipulationen an Containern vornehmen. Diese sind Container unabhängig implementiert und benutzen Iteratoren um auf die Container Elemente zuzugreifen. Der *std::for\_each* Algorithmus ist einer der bekanntesten mit dem man auf alle Elemente eines Containers Zugriff bekommt.

#### Die Standard Bibliothek in embedded Projekten

Die Bibliothek ist bekannt dafür dass diese eigenständig viel Speicher zur Laufzeit am Heap oder Stack alloziert. Zudem benötigt diese doch relativ viel Speicher womit sie für sehr kleine Mikrokontroller nicht in Frage kommt. Jedoch sollen in den nächsten Kapiteln einige interessante Elemente analysiert werden.

## 2.5.2 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 dem Zugriff mittels `[]` 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.

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. C-Arrays und `std::array` sind beides statische Elemente wodurch die Größe beim kompilieren bereits bekannt sein muss und nachträglich nicht mehr verändert werden kann. Die Verwendung von `std::array` kann sich vor allem dann auszahlen wenn man viele Manipulationen wie das Sortieren oder Ersetzen von Elementen vornimmt. In diesem Fall kann man auf getestete Algorithmen zurückgreifen welche durch die Bereitstellung von Iteratoren möglich ist.

```
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*/
```

Quellcode (16) `std::array`

```
1
2
3 int a[10] = { 0 };
4
5 int main() {
6
7     for(int i=0; i<sizeof(a); i++){
8         a[i] = i;
9     }
10
11     return 0;
12 }
13
14 /*EOF*/
```

Quellcode (17) C-Array

## Analyse C-Array/std::array

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-g++ -c -Os st_array.cpp \$ 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-g++ -c -Os c_array.cpp \$ 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>
<code>std::array</code>	<code>C-Array</code>

## 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 Byte 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 Speicher-verwaltung von Nöten ist bieten gängige RTOS oder OS Systeme bessere Mechanismen an, die im Fehlerfall (Heap/Stack Überläufe) wesentlich besser zu debuggen sind.

## 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.

## 2.5.3 Zeichenketten

Bei textbasierten Schnittstellen 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 Speichers 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`. Da 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_length` (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_length;   // 4 byte
3
4 union {                      // 16 byte
5     char local_data[16];
6     size_t allocated_data;
7 }
```

Quellcode (20) 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\_length*).

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 einen 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 &lt;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 (21) 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 weitere 61 Bytes alloziert wohin die neue Zeichenkette kopiert wird. Nach dem Kopiervorgang 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 &amp;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 (23) 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 &lt;string&gt; 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 &lt;string.h&gt; 2 #include &lt;stdlib.h&gt; 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 (25) std::string

Quellcode (26) 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 aussehen. 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` einher, da diese doch relativ komplex sein kann und durchaus zu bösen Fehlern am Heap oder Stack führen kann.

## 2.6 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 um das 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 (29) 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 (30) 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 Typ *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 Typ *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 des Objektes iterieren.

## 2.6.1 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.o ... 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

## 2.6.2 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 zu verwenden ist. Zudem bieten Referenzen gewisse Vorteile bei Kopier-Konstruktoren oder beim Überladen von Operatoren.

## 2.7 Namensräume

Namensräume (Namespaces) sind vor allem dann nützlich wenn es um die modulare Programmierung geht. Hiermit können Namenskonflikte 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. In C++ kann man einzelnen Module in Namensräume verpacken um somit eine bessere Trennung von verschiedenen Code Teilen zu erlangen. Der Namensraum *std* in dem sich die Standard C++ Module befinden dürfte jedem ein Begriff sein. Das nachfolgende Beispiel zeigt wie man Namensräume richtig verwenden kann um eine sinnvolle Modularisierung zu erreichen.

```
1#include "serial.h"
2
3// Private Namespace
4namespace {
5
6    typedef enum {INIT, NOT_INIT} state;
7    state is_init = NOT_INIT;
8
9    void send_byte(char byte){
10        // Do something
11    }
12}
13
14namespace driver {
15
16    void serial_init(void){
17
18        is_init = INIT;
19        // Do something
20    }
21
22    void serial_send(char *data,
23                    int len){
24
25        if(is_init == NOT_INIT)
26            return;
27
28        for(int i=0; i<len; i++)
29            send_byte(data[i]);
30    }
31} //namespace driver
```

Quellcode (33) serial.cpp

```
1namespace driver {
2
3    // Init Serial
4    void serial_init(void);
5
6    // Send data
7    void serial_send(char *data,
8                    int len);
9
10} //namespace driver
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31 /*EOF*/
```

Quellcode (34) serial.h

Das Beispiel soll demonstrieren wie man einen Treiber für eine Serielle Schnittstelle mithilfe von Namensräumen implementieren könnte. Zuerst haben wir den Namensraum *driver* deklariert der alle Hardware Treiber eines Mikrocontrollers beinhalten soll. In der Datei *serial.h* befinden sich die Funktionsprototypen welche als Schnittstelle für dieses Modul dienen. Diese müssen natürlich in den Namensraum *driver* verpackt werden. In der Datei *serial.cpp* werden nun die Funktionen *serial\_init* und *serial\_send* im Namensraum *driver* implementiert.

Erkennbar ist dass sich in der Datei *serial.cpp* noch eine anonymer Namensraum befindet. Anonyme Namensräume sind an dem fehlenden Namen erkennbar und dienen dazu Variablen, Funktionen oder Typen zu deklarieren welche nur innerhalb dieses Moduls (.cpp Datei) sichtbar sein sollen. Die Funktion *send\_byte()* und die Variable *is\_init* vom Typ *state* sind somit nur in der Datei *serial.cpp* gültig. Dieses Verhalten kann man natürlich auch mit dem Schlüsselwort *static* erzeugen, jedoch mit dem Nachteil dass Typdeklarationen nicht nach außen verborgen werden. Der neue Typ *state* der den Status des Moduls beschreibt macht natürlich nur Sinn in dieser .cpp Datei und sollte daher nicht nach außen sichtbar sein. Das nachfolgende Beispiel zeigt 2 Methoden wie man das zuvor erstellte Modul verwenden kann.

```
1 #include "serial.h"
2
3 using namespace driver;
4
5 int main(void) {
6
7     serial_init();
8
9     // Do something
10    return 0;
11 }
```

Quellcode (35) using keyword

```
1 #include "serial.h"
2
3
4
5 int main(void) {
6
7     driver::serial_init();
8
9     // Do something
10    return 0;
11 }
```

Quellcode (36) :: Scope Operator

Mit dem Schlüsselwort *using* kann man dem Compiler mitteilen dass man nun die Funktionen welche sich im Namensraum *driver* befinden verwenden möchte. Möchte man jedoch nicht den ganzen Namensraum einbinden kann man mit dem Scope Operator *::* auf Funktionen oder Variablen aus dem jeweiligen Namensraum zugreifen.

## 2.7.1 Fazit

Namensräume sind ideal wenn es um die Modularisierung von Projekten geht und bieten sich perfekt an um Betriebssystem Funktionalitäten vom User Space zu trennen. Auch anonyme Namensräume sollten verwendet werden um Funktionalität nach außen hin zu verbergen. Ein Speicher Overhead kann auch nicht entstehen da Namensräume lediglich dazu dienen dem Compiler mitzuteilen welche Funktionen er zu verwenden hat.

## 2.8 Klassen

In diesem Kapitel werden die Klassen analysiert welche die Grundlage für das OOP Konzept in C++ darstellen. Dazu wird eine Beispiel Klasse implementiert die eine Serielle Schnittstelle eines Mikrocontrollers beschreiben soll. Diese Klasse wird dann fortlaufend während des Kapitels erweitert und adaptiert um zu analysieren wie sich Klassen und dessen Konzepte in Bezug auf Performance und Speicher verhalten. Des Weiteren werden in diesem Kapitel einige Richtlinien aufgestellt wie man Klassen sinnvoll in embedded Projekten einsetzen kann.

### 2.8.1 Erstes Beispiel

Die erste Definition unserer Klasse *Serial* beinhaltet 2 private Variablen (*baudrate*, *mode*) und 2 öffentliche Methoden (*set\_baudrate*, *set\_mode*). Wie im Beispiel ersichtlich sollte man Membervariablen wenn möglich immer im *private* Block definieren und den Zugriff nur über Methoden (Getters / Setters) erlauben. Dies hat den Vorteil dass man die Variablen nur über die öffentlichen Schnittstellen (*set\_baudrate*, *set\_mode*) verändern kann und somit auch den Wertebereich überprüfen kann. Das direkte Verbergen von Daten führt zu einer Datenkapselung womit man die Klasse als einzelnes Modul besser testen kann und man die Gewissheit hat, dass die Variablen sich im gewünschten Wertebereich befinden. Die Klassendefinition und die Implementierung der Klasse sollte man auch immer in separate Dateien verpacken was zu einer besseren Übersichtlichkeit führt.

```
1 #include "serial.h"
2
3 void Serial::set_baudrate(int baudrate) {
4
5     this->baudrate = baudrate;
6 }
7
8 void Serial::set_mode(int mode) {
9
10    this->mode = mode;
11 }
```

Quellcode (37) Klassen Implementierung

```
1 class Serial {
2
3     public:
4     void set_baudrate(int baudrate);
5     void set_mode(int mode);
6
7     private:
8     int baudrate;
9     int mode;
10
11 };
```

Quellcode (38) Klassendefinition

Analysiert man mit *sizeof(Serial)* die Größe unserer Klasse erhält man das Ergebnis 8 Byte. Diese 8 Byte setzen sich aus den 2 *int* Werten zusammen welche jeweils 4 Byte allozieren. Somit benötigt eine Klasse keinen zusätzlichen Speicher neben den eigentlichen Klassen Variablen solange man auf Virtuelle Methoden und Vererbung verzichten kann. Für diesen Fall benötigt eine C++ Klasse nicht mehr Speicher als eine äquivalente C Struktur. Lediglich eine leere Klasse alloziert 1 Byte im RAM Speicher.

Das nachfolgende Beispiel zeigt den Zusammenhang zwischen C Strukturen und Klassen da diese oft miteinander verglichen werden. Bis auf den großen Unterschied das man bei Klassen mit den Schlüsselwörtern *private*, *public* und *protected* die Zugriffskontrolle einer Klasse steuern kann ähneln sich beide sehr.

```
1 class Base{
2     int id;
3 };
4
5 class Serial : public Base {
6     int baudrate;
7     int mode;
8 };
9 /*EOF*/
```

Quellcode (39) Klasse C++

```
1 struct Base{
2     int id;
3 };
4
5 struct Serial{
6     struct Base base;
7     int baudrate;
8     int mode;
9 };
```

Quellcode (40) C Structur

Wie im Beispiel ersichtlich kann man mit C Strukturen sogar eine Art Vererbung nach implementieren indem man einfach mehrere Strukturen ineinander verschachtelt.

## 2.8.2 RAIL-Idiom

Bevor wir mit den Konstruktoren und Destruktoren fortfahren soll hier kurz das RAIL-Idiom erläutert werden welches eine wichtige Programmieretechnik in C++ darstellt. RAIL steht für "Resource acquisition is initialization" was dafür sorgen soll dass bei der Ressourcenbelegung für ein Objekt die Initialisierung für dieses gleich mit erfolgt. Das nachfolgende Beispiel zeigt wie ein Array RAIL oder nicht RAIL Konform angelegt werden kann. Bei der *Vector* Containerklasse wird automatisch der Konstruktor beim Anlegen des Objektes aufgerufen und der Destruktor wenn der Funktionsblock verlassen wird. Bei dem nicht RAIL Konformen Beispiel wo Speicher mit *new* alloziert wurde muss man das Array selber noch mit Initialisierungs-Daten befüllen und nach der Verwendung auch wieder dafür sorgen dass der allozierte Speicher mit *delete* frei gegeben wird.

```
1 void func(void)
2 {
3     vector<char> buffer = {'A', 'B'};
4
5     // buffer verwenden
6 }
7
8
9 /*EOF*/
```

Quellcode (41) RAIL Konform

```
1 void func(void)
2 {
3     char* buffer = new char[2];
4     buffer[0] = 'A';
5     buffer[1] = 'B';
6
7     // buffer verwenden
8     delete[] buffer;
9 }
```

Quellcode (42) Nicht RAIL Konform

Dieses Konzept ist eines der größten Vorteile von C++ da hier der Compiler automatisch dafür sorgt dass beim Anlegen eines neuen Objektes am Stack oder Heap der Konstruktor aufgerufen wird. Auch der Destruktor wird automatisch ausgeführt sollte der Block in dem das Objekt angelegt wurde verlassen werden. Das automatische Aufrufen von Konstruktor und Destruktor kann das Laufzeitverhalten des Programms natürlich extrem beeinflussen und kann für unerfahrene C++ Programmierer eine Fehlerquelle darstellen da es nicht immer ersichtlich ist wann diese aufgerufen werden. Das Erzeugen temporärer Objekte in Schleifen ist ein häufiger Grund warum C++ Programme langsam werden.

### 2.8.3 Konstruktoren

Um die Konstruktoren näher zu analysieren erweitern wir unsere *Serial* Klasse um 2 Konstruktor Methoden. Der Standard Konstruktor welcher geltend ist wenn bei der Definition des Objektes keine Initialisierungswerte angegeben wurden. Diesen sollte man immer implementieren um das Objekt mit Standard Werten zu initialisieren außer man will explizit erreichen dass man das Objekt nur mit einem benutzerdefinierten Konstruktor erstellen kann. Mit dem zweiten Konstruktor kann man das Objekt mit benutzerdefinierten Werten für *baudrate* und *mode* anlegen. Bei den Konstruktoren gelten die gleichen Regeln wie bei den Funktionsüberladungen womit man theoretisch eine unbegrenzte Zahl an Konstruktoren definieren kann. Zudem können auch Standardwerte in Konstruktoren verwendet werden.

```
1 #include "serial.h"
2
3 Serial::Serial()
4 : baudrate{115000}, mode{2} { }
5
6 Serial::Serial(int _baud, int _mode)
7 : baudrate{_baud}, mode{_mode} { }
8
9 void Serial::set_baudrate(int baudrate) {
10
11     this->baudrate = baudrate;
12 }
13
14 void Serial::set_mode(int mode) {
15
16     this->mode = mode;
17 }
```

Quellcode (43) Klassen Implementierung

```
1 class Serial {
2
3     public:
4         // ctors
5         Serial();
6         Serial(int _baud, int _mode);
7
8         void set_baudrate(int baudrate);
9         void set_mode(int mode);
10
11     private:
12         int baudrate;
13         int mode;
14
15 };
16
17 /*EOF*/
```

Quellcode (44) Klassendefinition

Bei der Definition globaler Objekte muss man sich zusätzlich Gedanken machen zu welchem Zeitpunkt der Konstruktor aufgerufen wird und ob dies zu diesem Zeitpunkt schon sinnvoll ist. Konstruktoren von globalen Objekten werden vor dem Eintritt in die *main* Funktion aufgerufen



wodurch das System möglicherweise noch nicht zu 100 Prozent initialisiert ist. Das nachfolgende Beispiel soll dieses Problem verdeutlichen.

```
1 #include "serial"
2
3 // Create Serial Object global
4 Serial com(9600, 2);
5
6 int main(void) {
7
8     // Init System
9     SystemInit();
10
11     // Send Byte
12     com.sendByte(0xAA); //Error
13
14     return 0;
15 }
```

Quellcode 45: Konstruktor Aufruf bei globalen Objekten

Üblicherweise müssen Mikrocontroller nach dem Power-On Reset initialisiert werden damit das Bus-System oder Taktsignal ordnungsgemäß funktioniert. Dies wird üblicherweise als erstes in der *main* Funktion erledigt. Würde man jetzt im Konstruktor Operationen durchführen welche eine korrekte Initialisierung des Systems voraussetzen würde es zu einem Fehler kommen. In diesem Beispiel würde die Initialisierung der seriellen Schnittelle im Konstruktor fehlschlagen da das Peripherie-Modul noch über kein Taktsignal verfügt. Um dieses Problem zu umgehen kann man eine separate Methode zur Initialisierung bereitstellen welche dann nach der Systeminitialisierung aufgerufen werden muss, oder man müsste im Konstruktor überprüfen ob das System bereits initialisiert wurde und wenn nicht eine Systeminitialisierung durchführen. Die eleganteste Methode ist jedoch wenn man das Objekt nicht global anlegt sondern erst dynamisch nach der Systeminitialisierung erzeugt. Verwendet man jedoch ein RTOS oder anderes OS System kann man davon ausgehen dass die Systeminitialisierung bereits durchgeführt wurde bevor Konstruktoren von globalen Objekten aufgerufen werden.

Wird zur Laufzeit eine Instanz eines Objektes erzeugt wird dieses üblicherweise am Stack angelegt und wieder entfernt sobald der Gültigkeitsbereich in welcher die Instanz erstellt wurde verlassen wird. Solange das jeweilige Objekt über normale Datentypen wie (*int*, *double*, ...) enthält funktioniert das automatisch. Wurde jedoch beim Anlegen der Instanz Speicher mit *new*, *malloc* im Konstruktor alloziert muss man sich selber im Destruktor darum kümmern das dieser wieder ordnungsgemäß freigegeben wird. Destrukturen und der Lebensbereich von Instanzen werden im nächsten Kapitel näher analysiert.

## 2.8.4 Destruktoren

Unsere Serial Klasse wird nun um einen Sende Buffer welcher bis zu 100 Zeichen speichern kann erweitert. Dieses *char* Array wird im Konstruktor mit *new* dynamisch angelegt. Anders als bei den Standard Datentypen wie *int* oder *double* wird dieser Speicher nicht automatisch wieder aufgeräumt. Verwendet man die Schlüsselwörter *new* oder *malloc* im Konstruktor muss man unbedingt daran denken einen Destruktor zu definieren wo man den allozierten Speicher wieder frei gibt. Das nachfolgende Beispiel demonstriert die Verwendung eines Destruktors im Bezug auf unsere Serial Klasse.

```
1#include "serial.h"
2
3Serial::Serial(int _baud, int _mode)
4: baudrate{_baud}, mode{_mode} {
5
6    buffer = new char[100];
7}
8
9Serial::~Serial(){
10
11    delete[] buffer;
12}
13
14void Serial::set_baudrate(int baudrate){
15
16    this->baudrate = baudrate;
17}
18
19void Serial::set_mode(int mode){
20
21    this->mode = mode;
22}
```

Quellcode (46) Klassen Implementierung

```
1class Serial {
2
3    public:
4        // ctors
5        Serial():Serial(9600, 1){};
6        Serial(int _baud, int _mode);
7        ~Serial();
8
9        void set_baudrate(int baudrate);
10       void set_mode(int mode);
11
12    private:
13        int baudrate;
14        int mode;
15        char *buffer;
16
17};
18
19
20
21
22 /*EOF*/
```

Quellcode (47) Klassendefinition

Zusätzlich hat unsere Serial Klasse eine Konstruktor Definition weniger als noch in der vorherigen Version. Dies ist möglich da man in C++ Konstruktoren delegieren kann was einiges an Tipparbeit ersparen kann da man nur Code für einen Konstruktor schreiben muss. Der Standardkonstruktor welcher in der vorherigen Version die Klasse mit den Default Werten *9600, 1* initialisiert hat wurde jetzt nicht mehr extra definiert sondern wird auf einen andern Konstruktor delegiert. Wenn man mehrere Konstruktoren in der Klassendefinition deklariert jedoch nur einen Konstruktor definiert auf welchen alle anderen delegiert werden ist ein sehr schöner Programmierstil da man sich nicht darum kümmern muss Fehler in jeder Konstruktor Version zu beheben. Hätte man in diesem Beispiel die Containerklasse *std::array* verwendet müsste man den Speicher nicht im Destruktor freigeben da diese Klasse schon über einen eignen Destruktor verfügt welcher automatisch aufgerufen wird.

## 2.8.5 Vererbung und Polymorphie

In diesem Kapitel wird der Overhead welcher bei der Verwendung von virtuellen Methoden oder mehrfacher Vererbung auftritt näher analysiert. In der Literatur liest man häufig von einem großen Overhead wenn es um virtuelle Funktionen oder mehrfache Vererbung geht, jedoch wird meist der Grund dafür nicht sehr eindeutig erläutert. Um die Probleme zu verdeutlichen werden wir zuerst eine einfache Basis Klasse kreieren von welcher dann unsere Serial Klasse abgeleitet wird.

```
1 class Com {
2
3 public:
4 void set_status(int status){
5     this->status = status;
6 };
7
8 int get_status(void){
9     return status;
10 };
11
12 virtual void send_byte(char byte){
13     printf("Com:_%c_\n", byte);
14 }
15
16 private:
17 int status;
18 };
```

Quellcode (48) Basis Klasse

```
1 #include "com.h"
2
3 class Serial : public Com{
4
5 public:
6     // ctors
7     Serial():Serial(9600, 1){};
8     Serial(int _baud, int _mode);
9     ~Serial();
10
11 void set_baudrate(int baudrate);
12 void set_mode(int mode);
13
14 private:
15 int baudrate;
16 int mode;
17 char *buffer;
18 };
```

Quellcode (49) Klassendefinition

Wie im Beispiel ersichtlich wurde eine Klasse *Com* erzeugt welche als Basis für jegliche Kommunikationsschnittstellen wie UART, SPI oder I2C dienen soll. Die Klasse verfügt über eine private Variable *status* welche über die öffentlichen Schnittstellen *set\_status* und *get\_status* angegriffen werden kann und über eine virtuelle Methode *send\_byte* welche im Normalfall von der ableitenden Klasse überschrieben werden soll. Wird diese nicht überschrieben oder verwendet man die *Com* Klasse als einzelnes Modul wird die Ausgabe von *send\_byte* zum Debug Interface oder zu STDIO weitergeleitet.

Die Verwendung von Basisklassen führt meist zu sehr elegantem Code da man gemeinsame Funktionalitäten wie das auch bei Kommunikationsschnittstellen der Fall ist sehr gut gruppieren kann. Auch für Benutzer einer API bringt das enorme Vorteile da die Funktionen einer SPI oder I2C Schnittstelle sich in vielen Punkten ähneln was zu einer besseren Übersichtlichkeit führt. Jedoch muss man viel mehr Zeit in die Design Phase investieren und sich genau überlegen wie man die Funktionalität sinnvoll modularisieren kann.

## Einfache Vererbung

Zuerst analysieren wir die einfache Vererbung ohne Verwendung der virtuellen Methode *send\_byte*. In diesem Fall wird die Basisklasse *Com* lediglich um die Funktionalität welche in der *Serial* Klasse definiert wurde erweitert. Man spricht dann von einfacher Vererbung wenn eine Klasse immer nur von einer anderen Klasse erbt. Das nachfolgende Diagramm soll dies verdeutlichen.

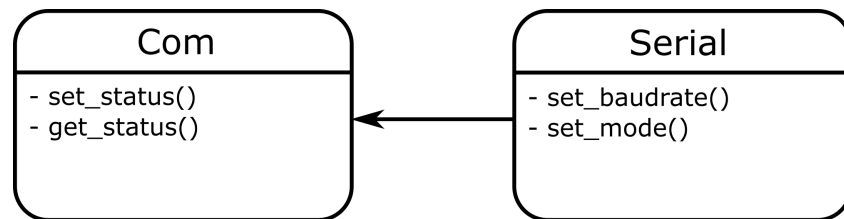


Abbildung 29: Einfache Vererbung

Die Verwendung von einfacher Vererbung erzeugt keinen Overhead an Speicher und verändert auch das Laufzeitverhalten des Programmes nicht. Dies ist möglich, da der Compiler die Funktionen statisch binden kann, da es immer eindeutig ist, welche Funktion aufgerufen werden soll. Um zu analysieren, ob der Compiler keine zusätzlichen Daten einbaut, überprüfen wir die Größe der *Serial* Klasse mit *sizeof*. Das Ergebnis von `sizeof(Serial)` liefert 16 Byte, welche sich wie in Tabelle 4 beschrieben zusammensetzen.

Variable	Bytes
int baudrate (Serial)	4
int mode (Serial)	4
char *buffer (Serial)	4
int status (Com)	4
<b>sizeof(Serial)</b>	16

Tabelle 4: Sizeof(Serial)

Die 16 Byte setzen sich nur aus den Member Variablen zusammen, welche in den Klassen *Com* und *Serial* definiert wurden. Somit ist bewiesen, dass einfache Vererbung keinen Speicher Overhead mit sich bringt und sich identisch verhält, als hätte man in C mehrere Strukturen ineinander verschachtelt. Bei der einfachen Vererbung werden die Elemente der Basisklasse einfach vor die Elemente der abgeleiteten Klasse gelegt, und der Aufruf einer Elementfunktion erfolgt auch ohne zusätzlichen Overhead.

## Virtuelle Methoden

Virtuelle Methoden erlauben es einer Klasse Methoden zu überschreiben welche bereits (virtuell) in der Basisklasse definiert wurden. Jedoch führt die Verwendung von virtuellen Methoden zu einigen Schwierigkeiten da der Compiler die Methoden jetzt nicht mehr statisch Binden kann sondern zur Laufzeit ein dynamisches Binden der Methoden durchgeführt werden muss. Um dieses Problem zu lösen fügt der Compiler eine Tabelle (Virtual Function Table) ein welche die Referenz auf die zu verwendete Methode beinhaltet. Diese Tabelle wird im Konstruktor des Objektes erzeugt und muss jedesmal durchsucht werden, wenn eine virtuelle Funktion aufgerufen wird. Dies hat den Nachteil, dass die Tabelle zusätzlichen Speicher belegt und das Laufzeitverhalten beeinflusst wird da bei jedem Aufruf einer virtuellen Funktion zusätzlicher Code ausgeführt werden muss.

Um dieses Problem zu verdeutlichen erweitern wir unsere Serial Klasse so, dass die virtuellen Funktionen, welche in der Basisklasse *Com* virtuell implementiert wurden, überschrieben werden. Seit C++11 kann man mit dem Schlüsselwort *override* dem Compiler explizit sagen, dass eine Funktion überschrieben werden soll was bei schwer auffindbaren Tippfehlern hilfreich sein kann.

```
1 #include "serial.h"
2
3 Serial::Serial(int _baud, int _mode)
4 : baudrate{_baud}, mode{_mode} {
5
6     buffer = new char[100];
7 }
8
9 Serial::~Serial() {
10
11     delete[] buffer;
12 }
13
14 void Serial::set_baudrate(int baudrate) {
15
16     this->baudrate = baudrate;
17 }
18
19 void Serial::set_mode(int mode) {
20
21     this->mode = mode;
22 }
23
24 void Serial::send_byte(char byte) {
25     printf("Serial:_%c_\n", byte);
26 }
```

Quellcode (50) Klassen Implementierung

```
1 #include "com.h"
2
3 class Serial : public Com{
4
5     public:
6         // ctors
7         Serial():Serial(9600, 1){};
8         Serial(int _baud, int _mode);
9         ~Serial();
10
11         void set_baudrate(int baudrate);
12         void set_mode(int mode);
13         void send_byte(char byte);
14
15     private:
16         int baudrate;
17         int mode;
18         char *buffer;
19 };
20
21
22
23
24
25
26 /*EOF*/
```

Quellcode (51) Klassendefinition

Wie in Abbildung 31 ersichtlich besteht nun das Problem das man zur Laufzeit eine dynamische Bindung der Funktion *send\_byte* mit Hilfe der *Virtual Function Table* durchführen muss.

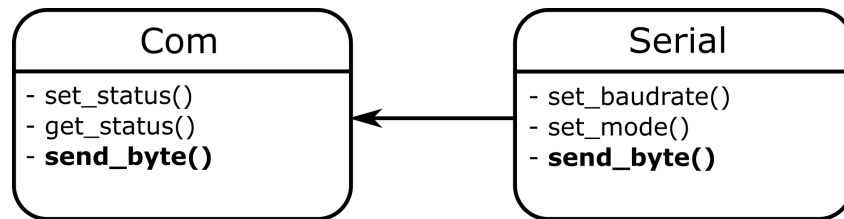


Abbildung 31: Vererbung mit virtuellen Methoden

Um nun zu Überprüfen wie sich virtuelle Funktionen auf den Speicherverbrauch unserer *Serial* Klasse auswirken schauen wir uns das Ergebnis von *sizeof(Serial)* erneut an. Nun erhält man das Ergebnis von 20 Byte welche sich wie in Tabelle 5 beschrieben zusammensetzen. Ein zusätzlicher Zeiger (4 Byte) welcher auf die *Virtual Function Table* zeigt ist in der Basisklasse *Com* dazugekommen. Die VFT kann je nach Compiler Konfiguration in eine Sektion im ROM oder RAM gelinkt werden und beinhaltet für jede virtuelle Funktion einen Eintrag. Somit entsteht ein Speicher Overhead, welcher sich durch die Größe der VFT Tabelle und dem Zeiger auf diesen zusammensetzt.

Variable	Bytes
int baudrate (Serial)	4
int mode (Serial)	4
char *buffer (Serial)	4
int status (Com)	4
Pointer to VFT (Com)	4
<b>sizeof(Serial)</b>	<b>20</b>

Tabelle 5: Sizeof(Serial)

Die Verwendung von vielen virtuellen Funktionen wirkt sich dadurch extrem negativ auf die Laufzeit des Programmes aus da bei jedem Funktionsaufruf einer virtuellen Funktion die Tabelle durchsucht werden muss und diese auch beim Anlegen eines solchen Objektes zuerst erzeugt werden muss. Der genaue Overhead hängt natürlich von der Größe der VFT Tabelle ab.

Ein Beispiel soll noch einmal verdeutlichen warum die VFT Tabelle benötigt wird und warum der Compiler keine statische Bindung der Funktion *send\_byte* zur Übersetzungszeit durchführen kann. Im nachfolgenden Beispiel wird ein Objekt *ser* vom Typ *Serial* angelegt. Zusätzlich wurde eine Funktion *send* implementiert die ein Zeichen auf der verwendeten Schnittstelle ausgibt. Die Funktion benötigt dafür einen Parameter welcher vom Typ *Com* ist um die Funktion allgemein zu halten. Somit kann die Funktion für alle Objekte verwendet werden welche von

der Basisklasse *Com* erben und ist unabhängig von der eigentlichen Schnittstelle (I2C, SPI oder UART). Darin besteht auch jetzt das Problem da die Funktion *send* ohne Hilfe der VFT nicht weiß welche *send\_byte* Funktion verwendet werden soll. Dies ist auch der Grund warum sich der Zeiger welcher auf die VFT Tabelle zeigt auch immer in der Basisklasse befinden muss was wir vorher mit *sizeof(Serial)* auch herausgefunden haben.

```
1 #include "com.h"
2 #include "serial.h"
3
4 void send(Com& arg) {
5     arg.send_byte('A');
6 }
7
8 int main(void) {
9
10     Serial ser;
11
12     send(ser);
13
14     return 1;
15 }
```

Quellcode 52: Beispiel Virtuelle Funktion

## Mehrfache Vererbung

Bei einer mehrfachen Vererbung erbt eine Klasse von mehr als einer Basisklasse. Abbildung 32 zeigt ein mögliches Konstrukt einer mehrfachen Vererbung. Gegenüber anderen objektorientierten Sprachen ist eine mehrfache Vererbung in C++ erlaubt, sollte jedoch mit Vorsicht verwendet werden weil man sich seine Modularisierung komplett zerstören kann wenn man nicht richtig aufpasst. Der Overhead hält sich noch relativ in Grenzen da der *this* Zeiger gelegentlich angepasst werden muss wenn eine Methode aus einer Basisklasse aufgerufen wird. Der Compiler erzeugt eine sogenannte *thunk* Methode welche den *this* Zeiger adaptiert. Noch komplizierter wird es wenn die Basisklasse virtuelle Methoden vorweist oder wenn es Methoden mit der gleichen Signatur in mehreren Basisklassen gibt. Modernen Compiler lösen diese Probleme sehr elegant jedoch muss man immer daran denken dass dies nicht ohne zusätzlichen Overhead möglich ist. Auch muss man sich zusätzliche Gedanken machen in welcher Reihenfolge die Konstruktoren der Basisklassen aufgerufen werden man eine Klasse erzeugt welche von mehreren Basisklassen erbt.

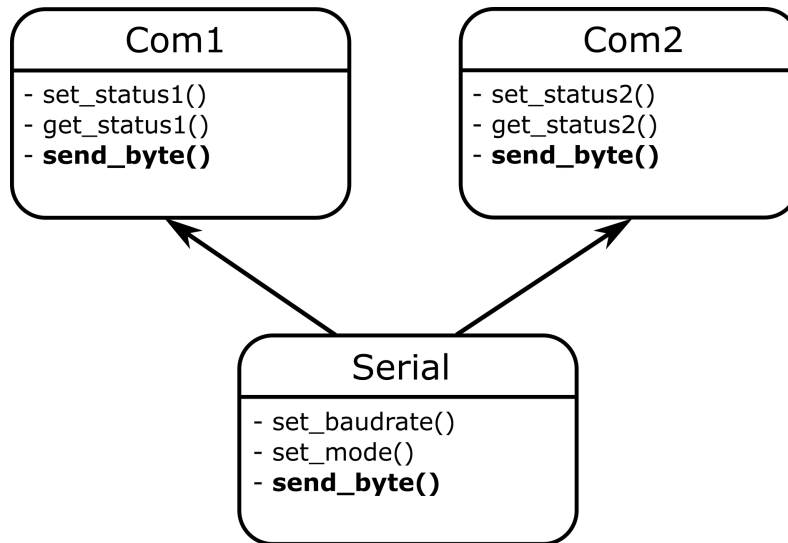


Abbildung 32: Mehrfache Vererbung

Um zu verdeutlichen welche Auswirkungen ein Konstrukt wie in Abbildung 32 dargestellt auf die Größe der Serial Klasse auswirkt analysieren wir die Größe erneut mit *sizeof*. Das Ergebnis von *sizeof(Serial)* ergibt nun 28 Byte was ein Overhead von 8 Byte gegenüber der Version mit nur einer Basisklasse. Die 8 Byte setzen sich aus einer zusätzlichen Variable (4 Byte) welche in der zweiten Basisklasse definiert wurde und einem Zeiger auf eine VFT welche sich nun auch in der *Serial* Klasse befindet. Schlussfolgernd kann man sagen dass mehrfache Vererbung in Kombination mit vielen virtuellen Methoden zu einem hohen Overhead führt und somit in embedded Projekten nicht zur Routine werden soll.

## 2.8.6 Fazit

Das Verwenden von Klassen und den dazugehörigen Konzepten wie Konstruktoren oder Vererbung kann definitiv ein Mehrwert für ein Projekt darstellen, da man oftmals eine bessere Modularisierung erlangt und die Wartbarkeit erhöht. Auch der Overhead ist oftmals nicht höher als bei einer äquivalenten C Implementierung wenn man auf gewisse Punkte achtet. Bei der Verwendung von virtuellen Methoden und mehrfacher Vererbung sollten bei jedem embedded Entwickler die Alarmglocken läuten und man muss sich Überlegen ob man mit dem Overhead leben kann wenn der Vorteil der dadurch entsteht überwiegt. Jedoch muss man ganz klar sagen dass eine Implementierung in C++ viel mehr Wissen und Know-How von einem embedded Entwickler fordert als eine reine funktionale Implementierung in C.



## 2.9 Fehlerbehandlung

Fehlerbehandlung mittels *try, catch* ist in embedded Projekten noch sehr exotisch da ein relativ hoher Overhead im Fehlerfall entstehen kann. Jedoch hat diese Art von Fehlerbehandlung einige Vorteile welche hier erläutert werden sollen. Braucht man eine sehr performante Fehlerbehandlung welche sich über mehrere Softwareebenen erstreckt kann die Anwendung der *try, catch* Methode durchaus sinnvoll sein. Somit kann man auch Fehler welche in Konstruktoren auftreten behandeln was aufgrund des fehlenden Rückgabewertes bei Konstruktoren nicht über die übliche Art funktioniert.

Um den Overhead von *try, catch* zu analysieren implementieren wir einmal eine Fehlerbehandlung mittels Rückgabewert und der *try, catch* Methode um beide Versionen auf Performance und Speicher Overhead zu testen. In der *set\_baudrate* Methode soll eine Fehlerüberprüfung implementiert werden um ein falsches setzen der Baudrate zu detektieren.

```
1 class Serial {
2
3 public:
4 void set_baudrate(int baudrate){
5     if(baudrate <= 0)
6         throw (int)-1;
7
8     this->baudrate = baudrate;
9 }
10
11
12 private:
13 int baudrate;
14 };
```

Quellcode (53) Try, Catch Methode

```
1 class Serial {
2
3 public:
4 int set_baudrate(int baudrate){
5     if(baudrate <= 0)
6         return -1;
7
8     this->baudrate = baudrate;
9     return 1;
10 }
11
12 private:
13 int baudrate;
14 };
```

Quellcode (54) Return Methode

In der *try, catch* Version ist der Rückgabe Typ der Methode *void* und mittels *throw* kann ein Fehler eines beliebigen Typs geworfen werden welcher dann außerhalb im *try, catch* Block aufgefangen werden muss. In unserer Implementierung wird lediglich ein Fehler vom Typ *int* geworfen. In der Praxis werden häufig eigene Fehler Klassen implementiert welche im Fehlerfall detaillierte Informationen über den Fehler ausgeben oder spezifische Fehler Routinen ausführen. In der klassischen Version mittels Rückgabewert liefert die Methode (-1) im Fehlerfall und (1) wenn die Baudrate auf einen gültigen Wert gesetzt wurde. In diesem Fall muss das Hauptprogramm den Rückgabewert der der *set\_baudrate* Methode jedes Mal überprüfen um einen möglichen Fehler zu detektieren. Das nachfolgende Beispiel zeigt wie eine Fehlerbehandlung von beiden Versionen im Hauptprogramm ausschauen würde.

```

1 #include "serial.h"
2
3 int main(void) {
4
5     Serial ser;
6
7     try{
8         ser.set_baudrate(-1);
9     }
10    catch(int exception){
11        return exception;
12    }
13
14    return 1;
15 }

```

Quellcode (55) Try, Catch Methode

```

1 #include "serial.h"
2
3 int main(void) {
4
5     Serial ser;
6
7     if(ser.set_baudrate(-1) == -1){
8         return -1;
9     }
10
11    return 1;
12 }
13
14
15 /*EOF*/

```

Quellcode (56) Return Methode

Die beiden Programme tun exakt das Gleiche unterscheiden sich jedoch in Performance und ROM Größe. Um die Performance zu analysieren wurden die Assembler Instruktion ab Zeile 7 bis zum Programm Ende für den Fehlerfall und den nicht Fehlerfall gezählt. Hierfür wurde das Programm auf einen Mikrocontroller gespielt und im Debug Modus die Instruktionen zwischen 2 Breakpoints gezählt. Mit diesem Test bekommt man ein ungefähres Gefühl wie viel Overhead die jeweilige Fehlerbehandlungs Methode in beiden Fällen hat. Der genaue Performance Overhead hängt natürlich stark von der verwendeten CPU und der Optimierungsstufe des Compilers ab. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis dieses Testes.

Methode	Fehlerfall	Nicht Fehlerfall
try, catch	550	18
return value	25	26

Tabelle 6: Performance Fehlerbehandlung

Wie in der Tabelle 6 ersichtlich ist die *try, catch* Methode sogar um 8 Instruktionen schneller als die herkömmliche Methode mit Rückgabewert wenn kein Fehler auftritt. Dieser kleine Overhead liegt hauptsächlich an der Überprüfung des Rückgabewertes welcher bei der return Methode durchgeführt werden muss. Dies ist möglich da moderne C++ Compiler das *zero-cost Model* bei der *try, catch* Methode umsetzen. Dies besagt das im nicht Fehlerfall kein zusätzlicher Code ausgeführt werden soll. Jedoch erkennt man im Fehlerfall warum die *try, catch* Methode in embedded Projekten noch nicht sehr beliebt ist. Im Fehlerfall ergibt sich bei der *try, catch* Methode nämlich ein Overhead von ungefähr 500 Instruktionen was enorm ist. Dieser Overhead entsteht durch eine zusätzliche Exception Tabelle die zur Laufzeit erstellt und gewartet werden muss. Diese Tabelle beinhaltet die Information zu welchem catch Block im Fehlerfall gesprungen werden muss und wird bei jedem Eintritt in ein try Block adaptiert.

### 2.9.1 Fazit

Bei kleineren Mikrocontrollern macht die *try, catch* Fehlerbehandlung absolut keinen Sinn da der ROM Overhead einfach zu groß ist. Auf Plattformen mit leistungstärkeren CPU's in Kombination mit genügend ROM Speicher kann die Verwendung einer solchen Fehlerbehandlungsmethode durchaus einen Überlegungswert sein. Die geringe Performanceverbesserung bei der *try, catch* Methode kann bei der Berechnung mathematischer Probleme die unter Umständen viel Zeit in Anspruch nehmen kann sogar einen großen zeitlichen Unterschied in der Berechnungszeit bewirken. Schlussfolgernd kann man sagen dass die konventionelle Methode mit Überprüfung des Rückgabewertes für die meisten Projekte vollkommen ausreichend ist und so schnell nicht aussterben wird.

## 2.10 Operatoren Überladen

Bei der Verwendung von Klassen welche verschiedene Datentypen beinhalten müssen Operatoren wie `+`, `+=`, `»` überschrieben werden damit man diese sinnvoll einsetzen kann. Ist ein Operator in Bezug auf eine bestimmte Klasse sinnvoll sollte man diesen stets überschreiben um die gewünschte Funktionalität zu gewährleisten. Überladene Operatoren führen dazu dass der Code wesentlich übersichtlicher wirkt als müsste man eine eigene Operator Funktion aufrufen. Das nachfolgende Beispiel zeigt wie man den Addier- Operator überschreiben kann und wie eine Implementierung ohne Überschreiben des Operators möglich wäre. Direkt ersichtlich ist das der Aufruf in Zeile 23 wesentlich übersichtlicher wirkt wenn der Operator überladen wurde. Wenn man den `+` Operator überschrieben hat sollte man auch immer den zugehörigen `+=` Operator überschreiben um blöde Fehler im vorhinein zu vermeiden. Implementiert man in C++ eine Klasse welche eine Ausgabe oder Eingabe erfordert sollte man wenn möglich die `»` und `«` Operatoren überschreiben.

```
1 class Class {
2
3 public:
4 int a{0};
5 int b{0};
6
7 Class operator+(const Class& val) {
8     Class tmp;
9     tmp.a = a + val.a;
10    tmp.b = b + val.b;
11    return tmp;
12 }
13 };
14
15 int main(void) {
16
17     Class class_a, class_b;
18     Class class_c;
19
20     class_a.a = 2;
21     class_b.b = 5;
22
23     class_c = class_a + class_b;
24
25     return 1;
26 }
```

Quellcode (57) Operator Überladen

```
1 class Class {
2
3 public:
4 int a{0};
5 int b{0};
6
7 Class add(const Class& val) {
8     Class tmp;
9     tmp.a = a + val.a;
10    tmp.b = b + val.b;
11    return tmp;
12 }
13 };
14
15 int main(void) {
16
17     Class class_a, class_b;
18     Class class_c;
19
20     class_a.a = 2;
21     class_b.b = 5;
22
23     class_c = class_a.add(class_b);
24
25     return 1;
26 }
```

Quellcode (58) Addier Methode

Das Überladen von Operatoren erzeugt auch keinen Overhead an Performance oder ROM Größe. Der Compiler generiert für beide Versionen exakt das gleiche Ergebnis womit ein Unterschied nur in der Lesbarkeit und Wartbarkeit des Codes besteht.

<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -Os main.cpp \$ arm-none-eabi-size main.o ... text    data    bss 16      0      0 ...</pre>	<pre>\$ arm-none-eabi-g++ -c -Os main.c \$ arm-none-eabi-size main.o ... text    data    bss 16      0      0 ...</pre>
---	---

Analyse Operator Überladen

Analyse Addier Methode

### 3 Schlussfolgerung

C++ und das objektorientierte Paradigma erweisen sich als durchaus Nützlich in der Entwicklung von Eingebetteten Systemen. Das Verwenden von Konzepten wie Klassen oder Vererbung führen dazu das Software Wartbarer und Wiederverwendbarer wird. Auch simple C++ Features wie Funktion- Überladungen, Templates oder das Verwenden von Standardparameter in Funktionen bringen einen erheblichen Mehrwert ohne das eine Overhead an Speicher oder Performance befürchtet werden muss. Jedoch wird durchaus mehr know-how von den Entwicklern benötigt wenn es um die Verwendung von Funktionen aus der C++ Standardbibliothek geht oder wenn mehrfache Vererbungen im Spiel sind. Auch was Tools und Programmiersprachen betrifft welche in der embedded Entwicklung Anwendung finden hat sich in den letzten Jahren viel getan. Moderne IDE's beinhalten immer mehr Funktionalität und unterstützen den Entwickler immer mehr bei seiner Arbeit was dazu führt das Produkte schneller auf den Markt gebracht werden können. Al dies führt dazu das die embedded Entwicklung sehr Interessant bleibt und mit ständigen Neuerungen zu rechnen ist.

# Literaturverzeichnis

- [1] C von A bis Z (Jürgen Wolf) - ISBN 978-3-8362-1411-7
- [2] Grundkurs C++ (Jürgen Wolf) - ISBN 978-3-8362-3895-3
- [3] C und C++ für Embedded Systems (Friedrich Bollow, Matthias Homann, Klais-Peter Köhn)  
ISBN 978-3-8266-1764-5
- [4] Effective Modern C++ (Scott Meyers) - ISBN 978-1-4919-0399-5
- [5] C++ In der Embedded-Entwicklung (Günter Obiltschnig)
- [6] Resource Acquisition Is Initialization (Wikipedia)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Resource\\_acquisition\\_is\\_initialization](https://en.wikipedia.org/wiki/Resource_acquisition_is_initialization)
- [7] 8 Bit vs 32 Bit (Silicon labs)  
[https://www.silabs.com/community/blog.entry.html/2015/10/16/choosing\\_betweenan-1NtK](https://www.silabs.com/community/blog.entry.html/2015/10/16/choosing_betweenan-1NtK)
- [8] 8 Bit vs 32 Bit (EECatalog)  
<http://eecatalog.com/8bit/2017/07/31/iot-choosing-8-bit-vs-32-bit-mcus/>
- [9] Advanced Encryption Standard (AES) (Wikipedia)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Encryption\\_Standard](https://de.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard)
- [10] Secure Hash Algorithm (SHA) (Wikipedia)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Secure\\_Hash\\_Algorithm](https://de.wikipedia.org/wiki/Secure_Hash_Algorithm)

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2	Padding . . . . .	3
Abbildung 3	Stromverbrauch . . . . .	5
Abbildung 4	Überblick 8 Bit vs 32 Bit MCU . . . . .	6
Abbildung 29	Einfache Vererbung . . . . .	38
Abbildung 31	Vererbung mit virtuellen Methoden . . . . .	40
Abbildung 32	Mehrfache Vererbung . . . . .	42



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Analyse Tools . . . . .	12
Tabelle 2 Größe von std::string und char . . . . .	22
Tabelle 3 Überblick Methoden über Kapazität und Länge . . . . .	24
Tabelle 4 Sizeof(Serial) . . . . .	38
Tabelle 5 Sizeof(Serial) . . . . .	40
Tabelle 6 Performance Fehlerbehandlung . . . . .	44

# Abkürzungsverzeichnis

<b>STL</b>	Standard Template Library
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ROM</b>	read-only memory
<b>RAM</b>	random-access memory
<b>RTOS</b>	Real Time Operating System
<b>OS</b>	Operating System
<b>VTF</b>	Virtual Funktion Table
<b>MCU</b>	microcontroller unit
<b>RISC</b>	Reduced Instruction Set Computer
<b>CISC</b>	Complex Instruction Set Computer
<b>API</b>	application programming interface
<b>IDE</b>	integrated development environment