

# Systemnahe Programmierung in C

## 12 Programmstruktur und Module

**J. Kleinöder, D. Lohmann, V. Sieh**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2024

<http://sys.cs.fau.de/lehre/ss24>



- Softwareentwurf: Grundsätzliche Überlegungen über die Struktur eines Programms **vor** Beginn der Programmierung
  - Ziel: Zerlegung des Problems in beherrschbare Einheiten
- Es gibt eine Vielzahl von Softwareentwurfs-Methoden
  - Objektorientierter Entwurf
    - Dekomposition in Klassen und Objekte
    - An Programmiersprachen wie C++ oder Java ausgelegt
  - Top-Down-Entwurf / **Funktionale Dekomposition**
    - Bis Mitte der 80er Jahre fast ausschließlich verwendet
    - Dekomposition in Funktionen und Funktionsaufrufe
    - An Programmiersprachen wie Fortran, Cobol, Pascal oder C orientiert



- Softwareentwurf: Grundsätzliche Überlegungen über die Struktur eines Programms **vor** Beginn der Programmierung
  - Ziel: Zerlegung des Problems in beherrschbare Einheiten
- Es gibt eine Vielzahl von Softwareentwurfs-Methoden
  - Objektorientierter Entwurf
    - Dekomposition in Klassen und Objekte
    - An Programmiersprachen wie C++ oder Java ausgelegt
  - Top-Down-Entwurf / **Funktionale Dekomposition**
    - Bis Mitte der 80er Jahre fast ausschließlich verwendet
    - Dekomposition in Funktionen und Funktionsaufrufe
    - An Programmiersprachen wie Fortran, Cobol, Pascal oder C orientiert

Systemnahe Software wird oft (noch) mit **Funktionaler Dekomposition** entworfen und entwickelt.



# Beispiel-Projekt: Eine Wetterstation

## ■ Typisches eingebettetes System

### ■ Mehrere Sensoren

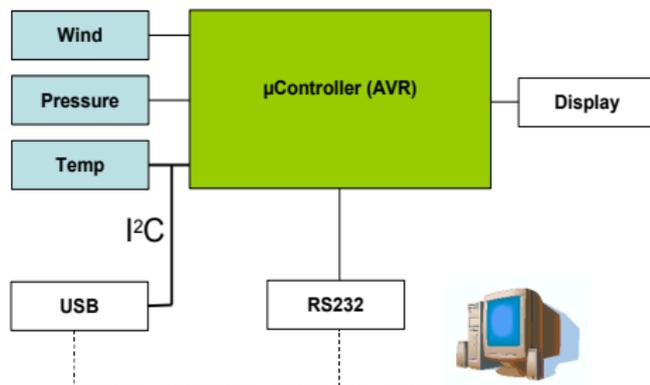
- Wind
- Luftdruck
- Temperatur

### ■ Mehrere Aktuatoren (hier: Ausgabegeräte)

- LCD-Anzeige
- PC über RS232
- PC über USB

### ■ Sensoren und Aktuatoren an den $\mu C$ angebunden über verschiedene Bussysteme

- I<sup>2</sup>C
- RS232



# Beispiel-Projekt: Eine Wetterstation

## ■ Typisches eingebettetes System

### ■ Mehrere Sensoren

- Wind
- Luftdruck
- Temperatur

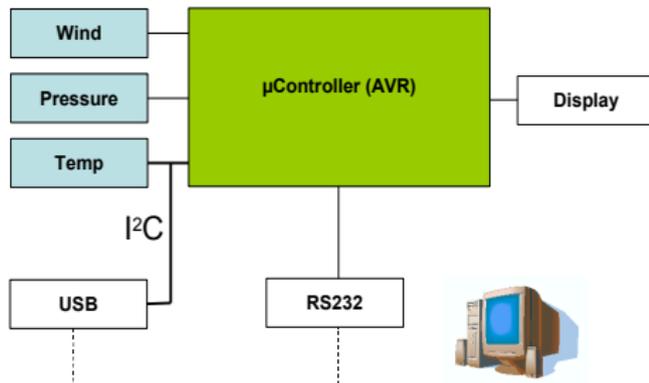
### ■ Mehrere Aktuatoren (hier: Ausgabegeräte)

- LCD-Anzeige
- PC über RS232
- PC über USB

### ■ Sensoren und Aktuatoren an den $\mu\text{C}$ angebunden über verschiedene Bussysteme

- I<sup>2</sup>C
- RS232

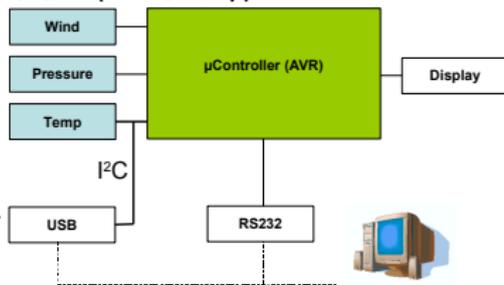
Wie sieht die **funktionale Dekomposition** der Software aus?



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

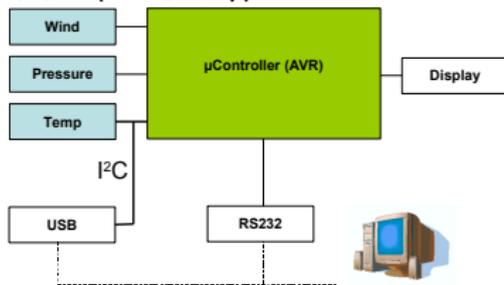
1. Sensordaten lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

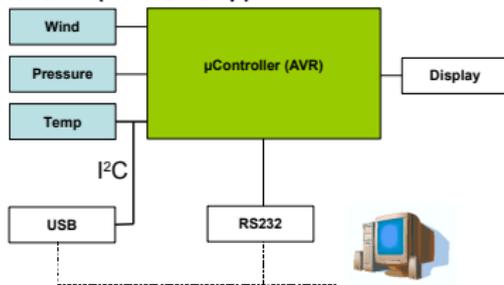
1. Sensordaten lesen
  - 1.1 Temperatursensor lesen
  - 1.2 Drucksensor lesen
  - 1.3 Windsensor lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

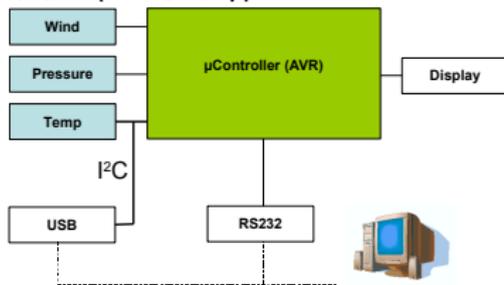
1. Sensordaten lesen
  - 1.1 Temperatursensor lesen
    - 1.1.1 I<sup>2</sup>C-Datenübertragung initiieren
    - 1.1.2 Daten vom I<sup>2</sup>C-Bus lesen
  - 1.2 Drucksensor lesen
  - 1.3 Windsensor lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

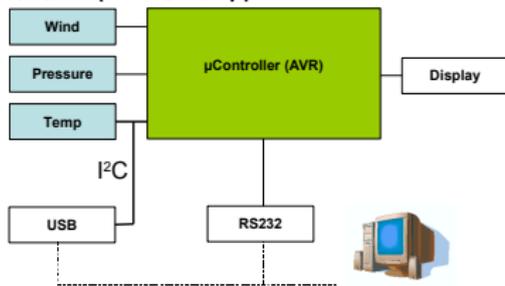
1. Sensordaten lesen
  - 1.1 Temperatursensor lesen
    - 1.1.1 I<sup>2</sup>C-Datenübertragung initiieren
    - 1.1.2 Daten vom I<sup>2</sup>C-Bus lesen
  - 1.2 Drucksensor lesen
  - 1.3 Windsensor lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
  - 3.1 Daten über RS232 versenden
  - 3.2 LCD-Display aktualisieren
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

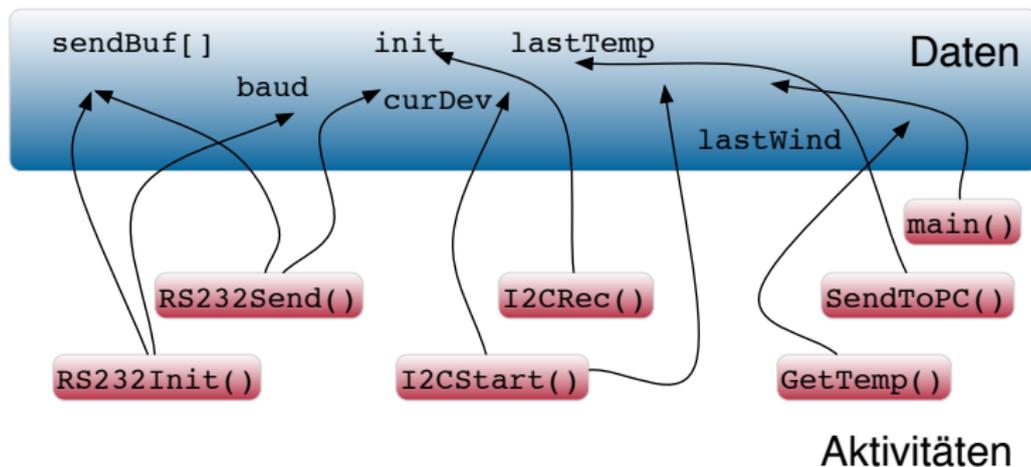
## Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

1. Sensordaten lesen
  - 1.1 Temperatursensor lesen
    - 1.1.1 I<sup>2</sup>C-Datenübertragung initiieren
    - 1.1.2 Daten vom I<sup>2</sup>C-Bus lesen
  - 1.2 Drucksensor lesen
  - 1.3 Windsensor lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
  - 3.1 Daten über RS232 versenden
    - 3.1.1 Baudrate und Parität festlegen (einmalig)
    - 3.1.2 Daten schreiben
  - 3.2 LCD-Display aktualisieren
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen



# Funktionale Dekomposition: Probleme

- Erzielte Gliederung betrachtet nur die Struktur der **Aktivitäten**, nicht jedoch die Struktur der **Daten**
- Gefahr: Funktionen arbeiten „wild“ auf einer Unmenge schlecht strukturierter Daten  $\rightsquigarrow$  mangelhafte Trennung der Belange



# Funktionale Dekomposition: Probleme

- Erzielte Gliederung betrachtet nur die Struktur der **Aktivitäten**, nicht jedoch die Struktur der **Daten**
- Gefahr: Funktionen arbeiten „wild“ auf einer Unmenge schlecht strukturierter Daten  $\rightsquigarrow$  mangelhafte Trennung der Belange

## Prinzip der **Trennung der Belange**

Dinge, die **nichts miteinander** zu tun haben, sind auch **getrennt** unterzubringen!

Trennung der Belange (*Separation of Concerns*) ist ein **Fundamentalprinzip** der Informatik (wie auch jeder anderen Ingenieursdisziplin).



# Zugriff auf Daten (Variablen)

## ■ Variablen haben

↔ 10-1

- Sichtbarkeit (*Scope*) „Wer kann auf die Variable zugreifen?“
- Lebensdauer „Wie lange steht der Speicher zur Verfügung?“

## ■ Wird festgelegt durch Position (Pos) und Speicherklasse (SK)

Pos	SK	↔	Sichtbarkeit	Lebensdauer
Lokal	<i>keine</i> , <b>auto</b>		Definition → Blockende	Definition → Blockende
	<b>static</b>		Definition → Blockende	Programmstart → Programmende
Global	<i>keine</i>		unbeschränkt	Programmstart → Programmende
	<b>static</b>		modulweit	Programmstart → Programmende



# Zugriff auf Daten (Variablen)

## ■ Variablen haben

↔ 10-1

- Sichtbarkeit (*Scope*) „Wer kann auf die Variable zugreifen?“
- Lebensdauer „Wie lange steht der Speicher zur Verfügung?“

## ■ Wird festgelegt durch Position (Pos) und Speicherklasse (SK)

Pos	SK	↔	Sichtbarkeit	Lebensdauer
Lokal	<i>keine</i> , <b>auto</b>		Definition → Blockende	Definition → Blockende
	<b>static</b>		Definition → Blockende	Programmstart → Programmende
Global	<i>keine</i>		unbeschränkt	Programmstart → Programmende
	<b>static</b>		modulweit	Programmstart → Programmende

```
int a = 0;           // a: global
static int b = 47;  // b: local to module

void f(void) {
    auto int a = b;  // a: local to function (auto optional)
                    // destroyed at end of block
    static int c = 11; // c: local to function, not destroyed
}
```



- Sichtbarkeit und Lebensdauer sollten **restriktiv** ausgelegt werden
  - Sichtbarkeit so **beschränkt wie möglich!**
    - Überraschende Zugriffe „von außen“ ausschließen (Fehlersuche)
    - Implementierungsdetails verbergen (Black-Box-Prinzip, *information hiding*)
  - Lebensdauer so **kurz wie möglich**
    - Speicherplatz sparen
    - Insbesondere wichtig auf  $\mu$ -Controller-Plattformen

↔ 1-4



- Sichtbarkeit und Lebensdauer sollten **restriktiv** ausgelegt werden
  - Sichtbarkeit so **beschränkt wie möglich!**
    - Überraschende Zugriffe „von außen“ ausschließen (Fehlersuche)
    - Implementierungsdetails verbergen (Black-Box-Prinzip, *information hiding*)
  - Lebensdauer so **kurz wie möglich**
    - Speicherplatz sparen
    - Insbesondere wichtig auf  $\mu$ -Controller-Plattformen

↔ 1-4

## **Konsequenz:** Globale Variablen vermeiden!

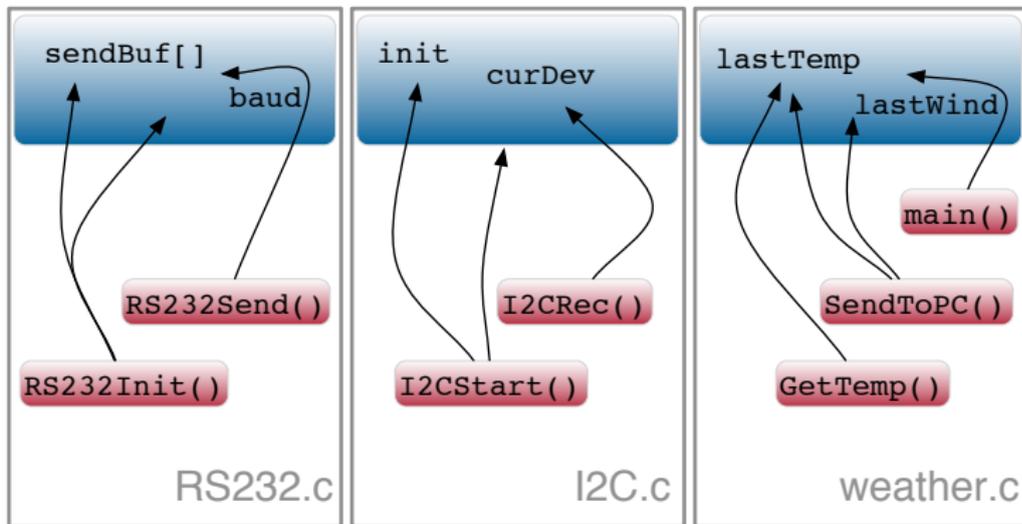
- Globale Variablen sind überall sichtbar
- Globale Variablen belegen Speicher über die gesamte Programmlaufzeit

**Regel:** Variablen erhalten stets die **geringstmögliche Sichtbarkeit und Lebensdauer**



# Lösung: Modularisierung

- Separation jeweils zusammengehöriger **Daten** und **Funktionen** in übergeordnete Einheiten  $\rightsquigarrow$  **Module**



# Was ist ein Modul?

- **Modul** := (*<Menge von Funktionen>*, ( $\mapsto$  „class“ in Java)  
*<Menge von Daten>*,  
*<Schnittstelle>*)
- Module sind größere Programmbausteine  $\leftrightarrow$  9-1
  - Problemorientierte Zusammenfassung von Funktionen und Daten  
 $\rightsquigarrow$  Trennung der Belange
  - Ermöglichen die einfache Wiederverwendung von Komponenten
  - Ermöglichen den einfachen Austausch von Komponenten
  - Verbergen Implementierungsdetails (**Black-Box**-Prinzip)  
 $\rightsquigarrow$  Zugriff erfolgt ausschließlich über die Modulschnittstelle



# Was ist ein Modul?

- **Modul** := (*<Menge von Funktionen>*, ( $\mapsto$  „**class**“ in Java)  
*<Menge von Daten>*,  
*<Schnittstelle>*)
- Module sind größere Programmbausteine  $\leftrightarrow$  9-1
  - Problemorientierte Zusammenfassung von Funktionen und Daten  
 $\rightsquigarrow$  Trennung der Belange
  - Ermöglichen die einfache Wiederverwendung von Komponenten
  - Ermöglichen den einfachen Austausch von Komponenten
  - Verbergen Implementierungsdetails (**Black-Box**-Prinzip)  
 $\rightsquigarrow$  Zugriff erfolgt ausschließlich über die Modulschnittstelle

## Modul $\mapsto$ Abstraktion

$\leftrightarrow$  4-1

- Die Schnittstelle eines Moduls **abstrahiert**
  - Von der tatsächlichen Implementierung der Funktionen
  - Von der internen Darstellung und Verwendung von Daten



- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, sondern rein **idiomatisch** (über **Konventionen**) realisiert ↔ 3-16
  - Modulschnittstelle ↔ .h-Datei (enthält Deklarationen ↔ 9-7)
  - Modulimplementierung ↔ .c-Datei (enthält Definitionen ↔ 9-3)
  - Modulverwendung ↔ `#include <Modul.h>`

```
extern void Init(uint16_t br);  
extern void Send(char ch);  
...
```

**RS232.h: Schnittstelle / Vertrag (öffentl.)**  
Deklaration der bereitgestellten  
Funktionen (und ggf. Daten)



- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, sondern rein **idiomatisch** (über **Konventionen**) realisiert ↔ 3-16
  - Modulschnittstelle ↔ .h-Datei (enthält Deklarationen ↔ 9-7)
  - Modulimplementierung ↔ .c-Datei (enthält Definitionen ↔ 9-3)
  - Modulverwendung ↔ #include <Modul.h>

```
extern void Init(uint16_t br);
extern void Send(char ch);
...
```

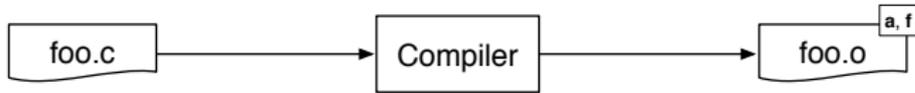
**RS232.h: Schnittstelle / Vertrag (öffentl.)**  
 Deklaration der bereitgestellten Funktionen (und ggf. Daten)

```
#include <RS232.h>
static uint16_t  baud = 2400;
static char      sendBuf[16];
...
void Init(uint16_t br) {
    ...
    baud = br;
}
void Send(char ch) {
    sendBuf[...] = ch;
    ...
}
```

**RS232.c: Implementierung (nicht öffentl.)**  
 Definition der bereitgestellten Funktionen (und ggf. Daten)  
 Ggf. modulinterne Hilfsfunktionen und Daten (static)  
 Inklusion der eigenen Schnittstelle stellt sicher, dass der Vertrag eingehalten wird



- Ein C-Modul **exportiert** eine Menge von definierten **Symbolen**
  - Alle Funktionen und globalen Variablen (↪ „**public**“ in Java)
  - Export kann mit **static** unterbunden werden (↪ „**private**“ in Java)  
(↪ Einschränkung der Sichtbarkeit ↔ 12-5)
- Export erfolgt beim Übersetzungsvorgang (.c-Datei → .o-Datei)



Quelldatei (foo.c)

```

uint16_t a;
// public
static uint16_t b;
// private

void f(void) // public
{ ... }
static void g(int) // private
{ ... }
  
```

Objektdatei (foo.o)

Symbole **a** und **f** werden exportiert.

Symbole **b** und **g** sind **static** definiert und werden deshalb nicht exportiert.



- Ein C-Modul **importiert** eine Menge nicht-definierter **Symbole**
  - Funktionen und globale Variablen, die verwendet werden, im Modul selber jedoch nicht definiert sind
  - Werden beim Übersetzen als **unaufgelöst** markiert

## Quelldatei (**bar.c**)

```
extern uint16_t a; // declare
extern void f(void); // declare

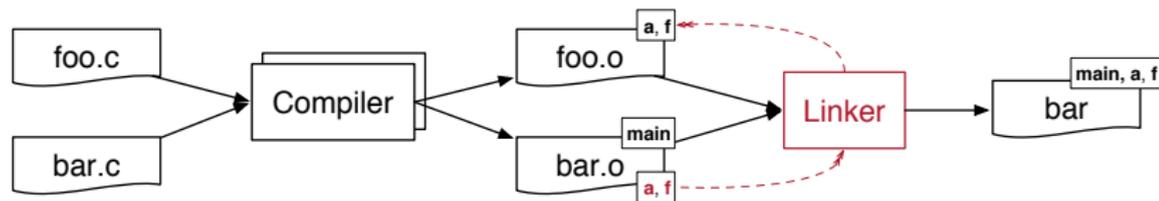
void main(void) { // public
    a = 0x4711; // use
    f(); // use
}
```

## Objektdatei (**bar.o**)

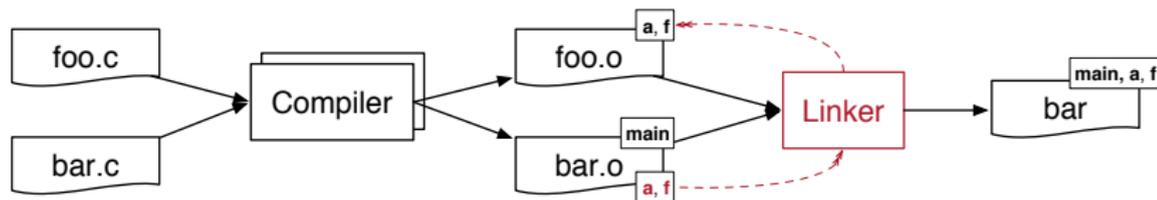
Symbol **main** wird exportiert.  
Symbole **a** und **f** sind unaufgelöst.



- Die eigentliche Auflösung erfolgt durch den **Linker**



- Die eigentliche Auflösung erfolgt durch den **Linker**



### Linken ist **nicht typsicher!**

- Typinformationen sind in Objektdateien nicht mehr vorhanden
- Auflösung durch den Linker erfolgt **ausschließlich** über die **Symbolnamen** (Bezeichner)
- ↪ Typsicherheit muss beim **Übersetzen** sichergestellt werden
- ↪ Einheitliche Deklarationen durch gemeinsame Header-Datei



- Elemente aus fremden Modulen müssen deklariert werden

- Funktionen durch `extern` Deklaration

↔ 9-7

```
extern void f(void);
```

- Globale Variablen durch `extern`

```
extern uint16_t a;
```

Das `extern` unterscheidet eine Variablendeklaration von einer Variablendefinition.

- Die Deklarationen erfolgen sinnvollerweise in einer `Header-Datei`, die von der Modulentwicklerin bereitgestellt wird

- Schnittstelle des Moduls (↔ „`interface`“ in Java)

- Exportierte Funktionen des Moduls
- Exportierte globale Variablen des Moduls
- Modulspezifische Konstanten, Typen, Makros
- Verwendung durch Inklusion

(↔ „`import`“ in Java)

- Wird **auch vom Modul inkludiert**, um Übereinstimmung von Deklarationen und Definitionen sicher zu stellen

(↔ „`implements`“ in Java)



## Modulschnittstelle: foo.h

```
// foo.h
#ifndef _F00_H
#define _F00_H

// declarations
extern uint16_t a;
extern void f(void);

#endif // _F00_H
```

## Modulimplementierung foo.c

```
// foo.c
#include <foo.h>

// definitions
uint16_t a;
void f(void) {
    ...
}
```

## Modulverwendung bar.c

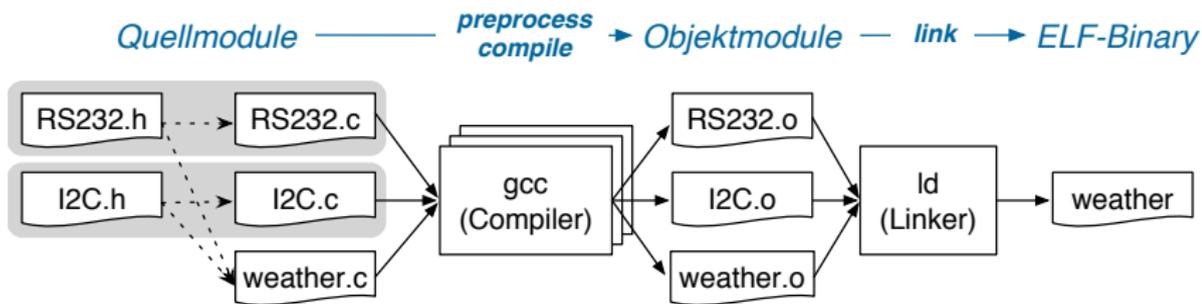
(vergleiche ↔ 12-11)

```
// bar.c
extern uint16_t a;
extern void f(void);
#include <foo.h>

void main(void) {
    a = 0x4711;
    f();
}
```



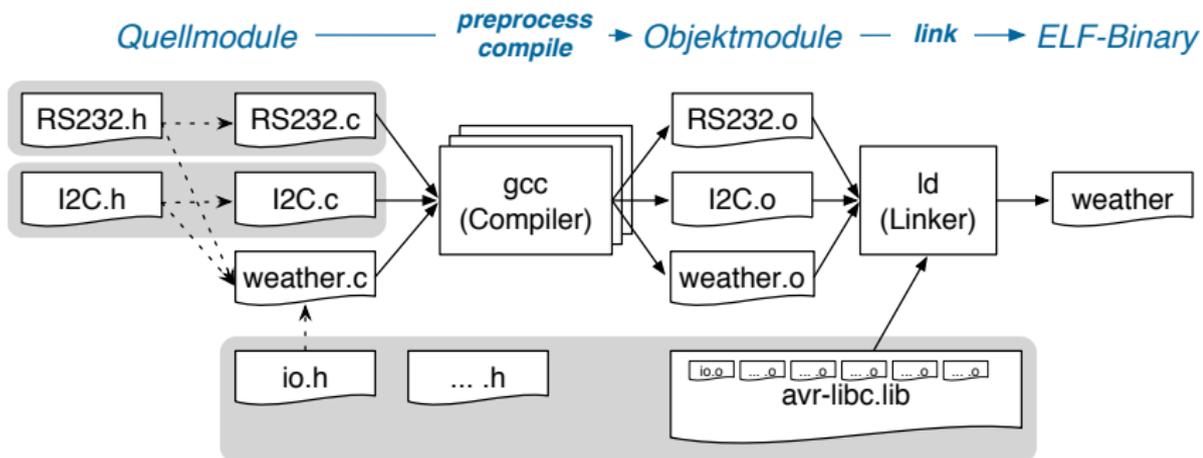
# Zurück zum Beispiel: Wetterstation



- Jedes Modul besteht aus Header- und Implementierungsdatei(en)
  - .h-Datei definiert die Schnittstelle
  - .c-Datei implementiert die Schnittstelle, inkludiert .h-Datei, um sicherzustellen, dass Deklaration und Definition übereinstimmen
- Modulverwendung durch Inkludieren der modulspezifischen .h-Datei



# Zurück zum Beispiel: Wetterstation



- Jedes Modul besteht aus Header- und Implementierungsdatei(en)
  - .h-Datei definiert die Schnittstelle
  - .c-Datei implementiert die Schnittstelle, inkludiert .h-Datei, um sicherzustellen, dass Deklaration und Definition übereinstimmen
- Modulverwendung durch Inkludieren der modulspezifischen .h-Datei
- Das Ganze funktioniert entsprechend bei Bibliotheken



# Zusammenfassung

- Prinzip der Trennung der Belange  $\rightsquigarrow$  Modularisierung
  - Wiederverwendung und Austausch wohldefinierter Komponenten
  - Verbergen von Implementierungsdetails
- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, sondern **idiomatisch** durch Konventionen realisiert
  - Modulschnittstelle  $\mapsto$  .h-Datei (enthält Deklarationen)
  - Modulimplementierung  $\mapsto$  .c-Datei (enthält Definitionen)
  - Modulverwendung  $\mapsto$  `#include <Modul.h>`
  - **private** Symbole  $\mapsto$  als `static` definieren
- Die eigentliche Zusammenfügung erfolgt durch den **Linker**
  - Auflösung erfolgt ausschließlich über Symbolnamen
    - $\rightsquigarrow$  **Linken ist nicht typsicher!**
  - Typsicherheit muss beim Übersetzen sichergestellt werden
    - $\rightsquigarrow$  durch gemeinsame Header-Datei

