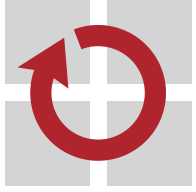
Praktikum angewandte Systemsoftwaretechnik (PASST)

Kernelmodule / Aufgabe 4

07. Dezember 2020

Dustin Nguyen, Tobias Langer, Jonas Rabenstein, Phillip Raffeck

Lehrstuhl für Informatik 4
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme

FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Rückblick

Rückblick

- Überblick über interne Funktionsweise von **Git**
  - Zusammenspiel von **Git** Objects
  - Umsetzung von Branches, Commit-Historie, ...
- Vorgeschrittene **Git-Konzepte**
  - Verwendung von ausgewählte Befehle

Motivation

Linux-Kernel = Kernkomponenten + Gerätetreiber

Kernkomponenten

- Verwaltung von Systemressourcen
- Unmittelbarer Teil des Kernels
- Notwendig für ein funktionales System
  - Prozessorzuteilung, Speicherverwaltung, ...

Gerätetreiber

- Schnittstelle zwischen Kernel und Geräten
- Implementieren gerätespezifische Aufgaben
  - Initialisierung & Ansteuerung von Geräten
- Bei Bedarf dynamisch ladbar als *Module*

On the shoulders of giants...

Entwickler können auf Infrastruktur zurückgreifen:

- Wiederverwendbare Komponenten & Werkzeuge
  - Helfermacros
  - Datenstrukturen
  - ...
- Designkonzepte
  - Schnittstellen in den Userspace
  - Verwaltung von Objektinstanzen
  - ...
- ...und jede Menge Dokumentation

Lernziele

Lernziele

Im Anschluss an diese Aufgabe solltet Ihr...

- die Funktionsweise von USB-Geräten erklären
- die Funktionsweise des `sysfs`-Dateisystems beschreiben
- mithilfe der Dokumentation die Funktionsweise von Linuxsubsysteme selbst recherchieren
- eigenständig ladbare Module für Linux entwickeln

...können.

Agenda

Agenda

Gerätetreiber unter Linux

Universal Serial Bus

USB-Temperatursensor

Hinweise zu QEMU und USB-Geräten

Debugging von Kernelmodulen

Zusammenfassung

Aufgabe 4

Gerätetreiber unter Linux

Gerätetreiber

Gerätetreiber

- Machen Geräte in System nutzbar
- Kommunikation zwischen Kernel und (virtuellen) Geräten
  - Gerätespezifische Kommunikation zum Gerät hin
  - Einheitliche Schnittstelle zum Kernel

Gerätetreiber unter Linux

- Gerätetreiber sind idR. Module
- Module sind dynamisch ladbar

Gerätetreiber unter Linux

Aufgaben des Treibermoduls

1. (De-)Registrierung des Treibermoduls im System
2. Verwaltung von Geräteinstanzen
3. Kommunikation mit dem Gerät
4. Optional: Bereitstellen von Userspaceschnittstellen
   - `sysfs`: Kommunikation via Strings
   - `ioctl`: Kommunikation via Binärdaten

(De-)Registrierung von Modulen (1/2)

Ein einfaches Kernelmodul

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h> /*printk*/

int __init simple_module_init(void)
{
  printk(KERN_INFO "module loaded\n");
  return 0;
}
void __exit simple_module_exit(void)
{
  printk(KERN_INFO "module unloaded\n");
}
module_init(simple_module_init);
module_exit(simple_module_exit);

MODULE_LICENSE("GPL");
```

(De-)Registrierung von Modulen (2/2)

- Makefile

```
obj-m += simple_module.o

all:
    make -C <KERNEL_SOURCE> M=$(pwd)

clean:
    make -C <KERNEL_SOURCE> M=$(pwd) clean
```

- Kann man einfach laden

```
$ insmod simple_module.ko
```

- ... und entladen

```
$ rmmod simple_module
```

Verwaltung von Geräteinstanzen

- Geräte können mehrfach vorhanden sein
  - Dynamische Verwaltung von Geräteinstanzen notwendig
  - Allokation und Freigabe von Daten im Kernel
- Dynamische Speicherverwaltung - wie geht das im Kernel?
  - `malloc()`, `free()` funktionieren im Linux-Kernel nicht einfach so
  - Eigene API: `kmalloc()`, `kzalloc()`, `kfree()`

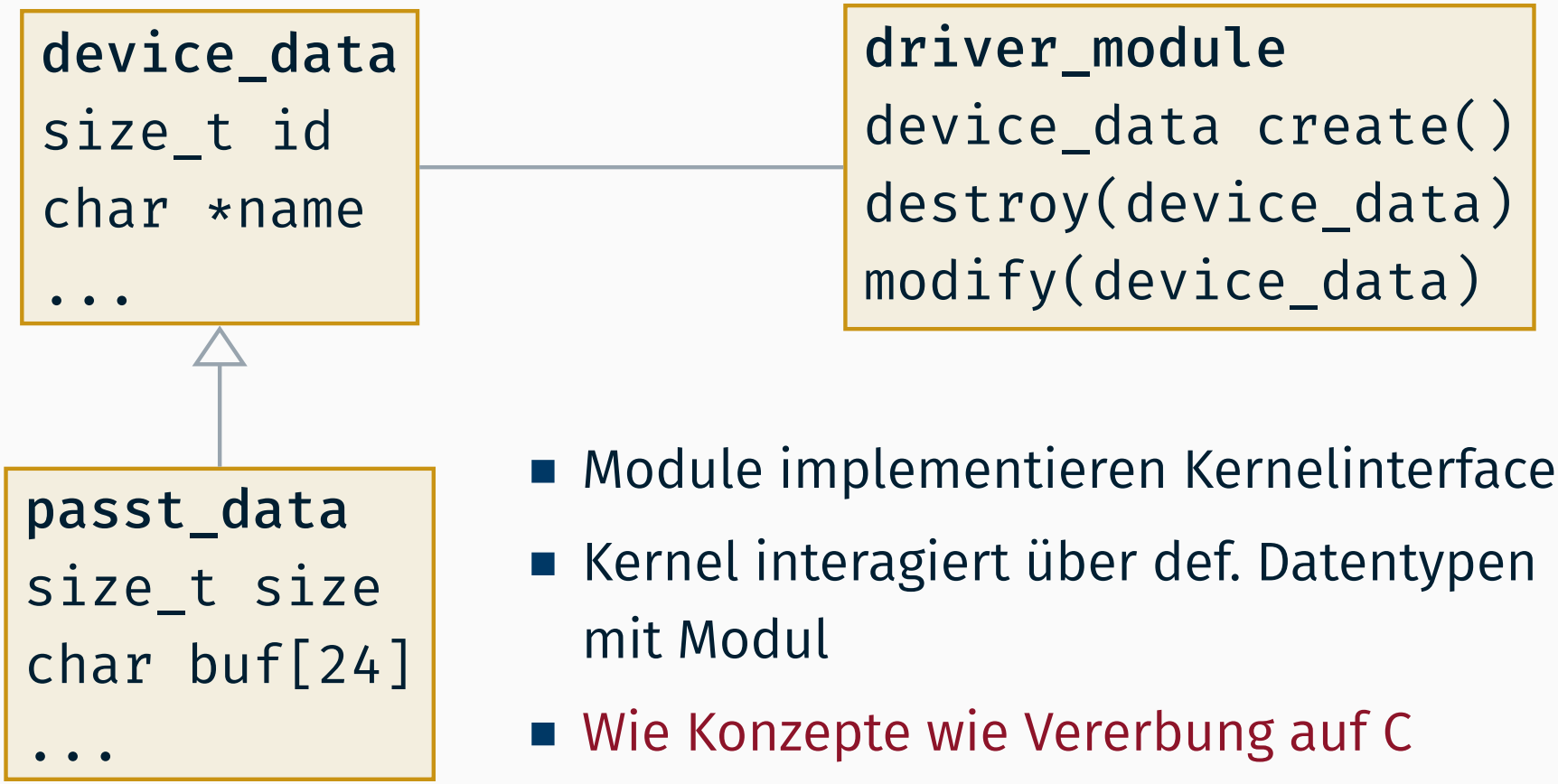
Userspaceschnittstelle mit `sysfs`

- Kernelobjekte (`kobjects`)
  - Große Teile des Kerns sind aus `kobjects` aufgebaut
- Virtuelles Dateisystem unter `/sys/`
  - Unix Philosophie: „*Everything is a file*“
  - Zugriff auf Kernelobjekte über FileIO
  - `sysfs`-Struktur spiegelt die Objektstruktur im Kernel wieder

`sysfs`-Treiberschnittstelle

- Repräsentation von Geräten als Verzeichnis unter `sys`
- Erzeugen von Dateien: `device_create_file(&dev, attr)`
- Löschen von Dateien: `device_remove_file(&dev, attr)`

Arbeit mit Kernelschnittstellen

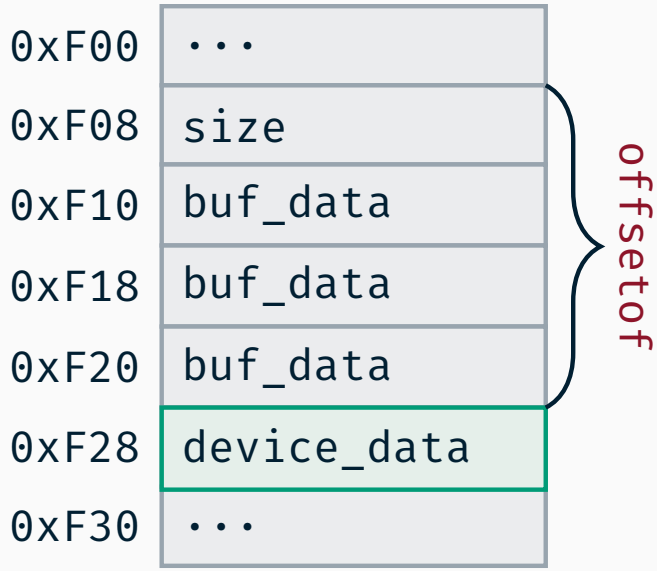


- Module implementieren Kernelinterface
- Kernel interagiert über def. Datentypen mit Modul
- Wie Konzepte wie Vererbung auf C übertragen?

Arbeit mit Kernelschnittstellen

- Abbildung auf Structs und Membership
  - Abgeleitete Struct enthält „Basisklasse“
  - Erweitert dieses somit um zusätzliche Member
- Schnittstellen verwendet Adresse der Basisinstanz

```
struct passt_data {
  size_t size;
  char buf[24];
  struct device_data;
};
```




```
#define container_of(ptr, type, member) ({\
  void *__mptr = (void *)(ptr);\
  ((type *)(__mptr - offsetof(type, member))); })
```

Arbeit mit Kernelschnittstellen

```
struct device_data *create() {
  struct passt_data *passt_data = kmalloc(sizeof(*passt_data));
  return &passt_data->device_data;
}

void modify(struct device_data *data) {
  struct passt_data *passt_data;
  passt_data = container_of(data, struct passt_data, device_data);
  ...
}

void destroy(struct device_data *data) {
  struct passt_data *passt_data;
  passt_data = container_of(data, struct passt_data, device_data);
  kfree(passt_data);
}
```

Die Kerneldokumentation

- `Documentation/`
  - Anleitungen, Erklärungen und Beschreibung
  - ...insbesondere für die Konzepte des Linux-Kernels
- `Documentation/output/`
  - Generierte Kernel-API Beschreibung (Sphinx)

```
$ cd <KERNEL_SOURCES>
$ make htmldocs
```

Die Kerneldokumentation

- `Documentation/`
  - Anleitungen, Erklärungen und Beschreibung
  - ...insbesondere für die Konzepte des Linux-Kernels
- `Documentation/output/`
  - Generierte Kernel-API Beschreibung (Sphinx)

```
$ cd <KERNEL_SOURCES>
$ make htmldocs
```

- Allerdings: Take with a grain of salt

  Linux hat keine stabile API innerhalb des Kerns
  - Dokumentation kann veralten
  - sich auf eine alte Version des Interfaces beziehen
  - oder schlichtweg falsch sein
- Im Zweifelsfall: Code von anderen als Referenz

Einstiegspunkte in die Kerneldokumentation

`Documentation/output/kernel-hacking/index.html`

- Guter Einstieg in die Kernel-Entwicklung
- Übersicht über Besonderheiten des Kernelcodes

`Documentation/output/core-api/kernel-api.html`

- Interfacebeschreibung für
  - ...viele Kernkomponenten
  - ...Bibliotheken (u.a. ein Subset der C-Bibliothek)

Einstiegspunkte `sysfs` und `kobject`

`Documentation/filesystems/sysfs.txt`

- Interfacebeschreibung für `sysfs`
  - Erzeugung von Verzeichnissen im Dateisystem
  - Erzeugung von Attributen im Dateisystem

`Documentation/kobject.txt`

- Abstrakte Objektorientierung im Linuxkernel
- Konzept- und Interfacebeschreibung zu `kobjects`

Universal Serial Bus

Aufbau und Funktionsweise von USB-Geräten

Asymmetrischer Bus (Baum)

- Ein Host (PC) (Wurzelknoten) und viele Functions (angeschlossene Geräte, Blätter)
- Kommunikation wird ausschließlich vom Host initiiert
- Keine autonome Kommunikation von Geräte

Geschwindigkeitsstufen

- Low-Speed (1,5 Mbit/s), USB 1.0
- Full-Speed (12 Mbit/s), USB 1.0
- High-Speed (480 Mbit/s), USB 2.0
- SuperSpeed (5 Gbit/s), USB 3.0
- SuperSpeed+ (10 Gbit/s), USB 3.1 Gen 2
- SuperSpeed USB 20Gbps (20 Gbit/s), USB 3.2 Gen 2x2

Kommunikation mit USB-Geräten

Vier unterschiedliche Kommunikationsmechanismen:

- **Control Transfers**: Unregelmäßige Anfragen vom PC an das Gerät

  z.B. Enumeration Sequence
- **Interrupt Transfers**: Periodische Kommunikation; begrenzte Antwortzeit

  z.B. Maus, Tastatur
- **Bulk Transfers**: Aperiodisch; für große Pakete ohne zeitliche Garantien

  z.B. USB-Storage-Device
- **Isochronous Transfers**: Periodische, kontinuierliche Datenströme

  z.B. Webcam

USB-Dokumentation

Weiterführende Informationen

- USB-Spezifikation
  - Spezifikation für USB 2.0 unter `/proj/i4passt/doc`
- Beyond Logic
  - `www.beyondlogic.org/usbnutshell/usb1.shtml`

USB-Gerätetreiber unter Linux

Linux-Kernel implementiert Host-Controller-Treiber (HCD)

- Grundlagen des USB-Protokolls
- Direkte Verwendung der USB-Transferarten möglich
- „Herstellerspezifische“ Treiber bauen darauf auf
- `<linux/usb.h>`

Linux Kommunikationsprimitiven für USB

- **U**SB **R**equest **B**locks (URB)
- Endpoints
- Pipes
- Control Transfers

Kommunikation mit dem USB-Gerät

- USB-Geräte bieten Endpunkte (Endpoints) an
  - Art und Anzahl sind gerätespezifisch
  - …mindestens jedoch Endpunkt 0
- Host spricht mit Gerät über Kanäle (Pipe)
  - Kanäle sind mit Endpunkten verbunden
- Control Transfers finden über Endpunkt 0 statt

Entwicklung eines USB-Gerätetreibers

1. (De-)Registrierung des Treibermoduls im System
2. Verwaltung von USB-Geräteinstanzen
3. Kommunikation mit dem USB-Gerät
   - Asynchrone USB-Transfers per URB
   - Synchrone USB-Transfers für die Aufgabe ausreichend
4. Bereitstellen von Userspaceschnittstellen

Doku zur Entwicklung von USB-Treibern

`Documentation/output/driver-api/usb/writing_usb_driver.html`

USB-Temperatursensor

USB-Temperatursensor

- Bauanleitung und Quellen
  - Firmware & Userspacetreiber: `https://gitlab.cs.fau.de/i4/passt/ds1820tousb`
  - Original-Firmware: `http://www.poempelfox.de/ds1820tousb/`
  - neues Layout: `https://gitlab.cs.fau.de/i4/passt/passtboard-v2`
- Steuert mehrere Temperatursensoren über 1-Wire-Bus an
- Steuerung vom PC aus per USB Control Transfers möglich
  - Auslesen der Temperatur- und Statusinformationen der Sensoren
  - Rescan der angeschlossenen Temperatursensoren
  - Reset des kompletten Gerätes

USB Control Transfers

Control Transfers

- **Festverdrahtete** (Konfiguration etc.) und **gerätespezifische** Befehle
- Abwicklung über Endpunkt 0 (muss vorhanden sein)
- Bidirektional: Ein Transfer erlaubt Senden und Empfangen

Parameter für Control Transfers[1]

Parameter	Größe	Beschreibung
request type	1 Byte	Charakteristik der Anfrage
request	1 Byte	Nummer der Anfrage
value	2 Byte	1. Parameter für die Anfrage
index	2 Byte	2. Parameter für die Anfrage
length	2 Byte	Länge des Datenpaketes

[1] vgl. USB 2.0 Spec. Abschnitt 9.3

Befehle für den Temperatursensor

Der **Request-Type** für die Befehle ist immer gleich[2]

- Datentransferrichtung ist vom Gerät zum PC
- Anfragen sind vendor-spezifisch
- Ziel der Anfrage ist das Gerät

```
request type 0xc0
```

[2] vgl. USB Spec. 248

Kurze Statusabfrage

Abfrage nach Status & Zahl der unterstützten Sensoren

Aufrufparameter

request	1
value	0
index	0

Antwort

```
struct short_status {
  uint8_t  version_high;
  uint8_t  version_low;
  uint32_t timestamp;
  uint8_t  supported_probes;
  uint8_t  padding;
}__packed;
```

Zahl der Probes bleibt über Lebenzeit konstant!

Lange Statusabfrage

Abfrage von Status/Temperatur aller unterstützter Sensoren

Aufrufparameter

request	3
value	0
index	0

Antwort

```
struct probe_status {
  uint8_t  serial[6];
  uint8_t  type;
  uint8_t  flags;
  uint8_t  temperature[2];
  uint32_t timestamp;
  uint8_t  padding[2];
}__packed;
struct probe_status answer[supported_probes];
```

- Flags: `0x01`: Sensor vorhanden. Sonst: Slot unbenutzt
- Mehrere Bytes umfassende Werte sind little-endian
- Temperatur: 12-bit 2er-Komplement, in sechzehntel Grad[3]

[3] Für `ds18b20` mit `type == 0x28`

Rescan der Sensoren am 1-Wire-Bus

Fragt die angeschlossenen Sensoren erneut ab

Aufrufparameter

request	2
value	0
index	0

Antwort

```
struct rescan_reply {
  uint8_t  answer;
};
```

- Im Erfolgsfall zwei Antworten möglich
  - 23 Neuerkennung wird gestartet
  - 42 Neuerkennung wird schon durchgeführt

Rescan der Sensoren am 1-Wire-Bus

Fragt die angeschlossenen Sensoren erneut ab

Aufrufparameter

`request`	`2`
`value`	`0`
`index`	`0`

Antwort

```
struct rescan_reply {
  uint8_t  answer;
};
```

- Im Erfolgsfall zwei Antworten möglich
  - `23` Neuerkennung wird gestartet
  - `42` Neuerkennung wird schon durchgeführt
- Mit `value = 0x01` kann Fortschritt abgefragt werden
  - `23` Neuerkennung abgeschlossen
  - `42` Neuerkennung wird noch durchgeführt

Reset des Temperatursensors

Setzt den Temperatursensor zurück

Aufrufparameter	
`request`	`4`
`value`	`0`
`index`	`0`

- Das Geräte sollte keine Antwort schicken

Reset des Temperatursensors

Setzt den Temperatursensor zurück

Aufrufparameter	
`request`	`4`
`value`	`0`
`index`	`0`

- Das Geräte sollte keine Antwort schicken
- Bereitstellen eines Puffers schadet trotzdem nicht

Hinweise zu QEMU und USB-Geräten

Verbinden von USB-Geräten mit KVM (1/2)

Reale USB-Geräte an eine KVM weiterleiten:

- Aktivieren des USB-Treibers

  `-usb`

- Ein bestimmtes Gerät

  `-device usb-host,hostbus=<bus>,hostaddr=<id>`

  Somit können mehrere Temperatursensor *gezielt* weitergereicht werden

- Ganze Geräteklassen

  `-device usb-host,vendorid=<vid>,productid=<pid>`

  Für unsere Temperatursensoren ist das `16c0:05dc`

  `-device usb-host,vendorid=0x16c0,productid=0x05dc`

Verbinden von USB-Geräten mit KVM (2/2)

- *Problem:* **KVM** benötigt Lese- und Schreibrechte fürs Gerät

  Lösung: **udev**

```
ATTRS{idVendor}=="16c0", ATTRS{idProduct}=="05dc", MODE="666"
```
/etc/udev/rules.d/99-usbtemp.rules

Debugging von Kernelmodulen

Debugging von Kernelmodulen

- Problem: Woher kommen Debug-Informationen von dynamisch-ladbaren Modulen?
- Lösung: Linux-Kernel stellt spezielle **GDB-Hilfsskripte** zur Verfügung
- Hilfsskripte müssen als *explizit ladbar* in GDB markiert werden

Debugging von Kernelmodulen

- Problem: Woher kommen Debug-Informationen von dynamisch-ladbaren Modulen?
- Lösung: Linux-Kernel stellt spezielle **GDB-Hilfsskripte** zur Verfügung
- Hilfsskripte müssen als *explizit ladbar* in GDB markiert werden

ACHTUNG: Generell sollten nur *vertrauenswürdige* Skripte automatisch geladen werden

GDB und Hilfsskripte des Kernels

- Unterstützung von User-Hilfskripten in GDB:

```
$ echo "add-auto-load-safe-path /path/to/kernel" >> ~/.gdbinit
```

- Laden von Kernel-/Modulesymbolen:

```
(gdb) lx-symbols
```

- Anzeigen von neuen Hilfsbefehlen:

```
(gdb) apropos lx
function lx_current -- Return current task
function lx_per_cpu -- Return per-cpu variable
lx-dmesg -- Print Linux kernel log buffer
lx-lsmod -- List currently loaded modules
...
```

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Gerätetreiber unter Linux

- Entwicklung als ladbare Module
- Zugriff auf Kernelobjekte per `sysfs`
- Verwendung von Kernel-API

Universal Serial Bus

- Eigentlich kein richtiger Bus
- Verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten
- Abstraktion unter Linux als Endpoints & Pipes

Aufgabe 4

USB-Temperatursensor

- Einarbeiten in die benötigten APIs im Linux-Kernel
  - Dokumentation
  - Codebeispiele
- Programmieren des Gerätetreibers
  - Ordentliche Speicherverwaltung
  - Linux Coding Style beachten
- Programmieren einer Userspace-Anwendung

Abgabe: Bis 11. Januar 2021 durch Vorführung in einer Rechnerübung

sysfs - Temperatursensoren

- sysfs-Einträge für USB-Temperatursensor
- Dateieintrag zur Temperaturabfrage für jeden Sensor

```
$ ls /sys/bus/usb/devices/4-1.5:1.0/
bInterfaceNumber bNumEndpoints modalias power ...
temp0 temp1 temp2 rescan reset
$ cat /sys/.../temp1
23.43
```

- Rescan des 1-Wire-Bus

  „Hotplug“ von Sensoren auf der Platine

```
$ echo 1 > rescan
```

- Reset des USB-Temperatursensors

```
$ echo 1 > reset
```

Userspace-Anwendung zur Darstellung der Messdaten

- Temperaturen periodisch aus `/sys` auslesen
- zeitlichen Verlauf aller Sensoren in Graphen ausgeben
- Graph soll „live“ aktualisiert werden
- mögliche Werkzeuge u.A.:
  - GNUPLOT
  - MATPLOTLIB (Python)
  - RRDTOOL
  - R
  - ROOT (`root.cern.ch`)

Fragen?