Embedded-Linux

Wie komme ich zu einem Embedded-Linux-System?

Andreas Klinger
ak@it-klinger.de

IT - Klinger
http://www.it-klinger.de

Linux-Tag Berlin
22.05.2013

Teil I

Embedded-Linux-System

Embedded-Linux-System

Ist Embedded-Linux ein anderes Linux? I

Embedded- und Desktop-/Server-Linux haben gemeinsam:

- Bootloader für Initialisierungen und Ladevorgänge
- Linux-Kernel, das eigentliche Betriebssystem
- Root-Filesystem, eine Sammlung von Programmen und Tools
- Dämonen als Hintergrund-Prozesse

Ist Embedded-Linux ein anderes Linux? II

Unterschiede hinsichtlich:

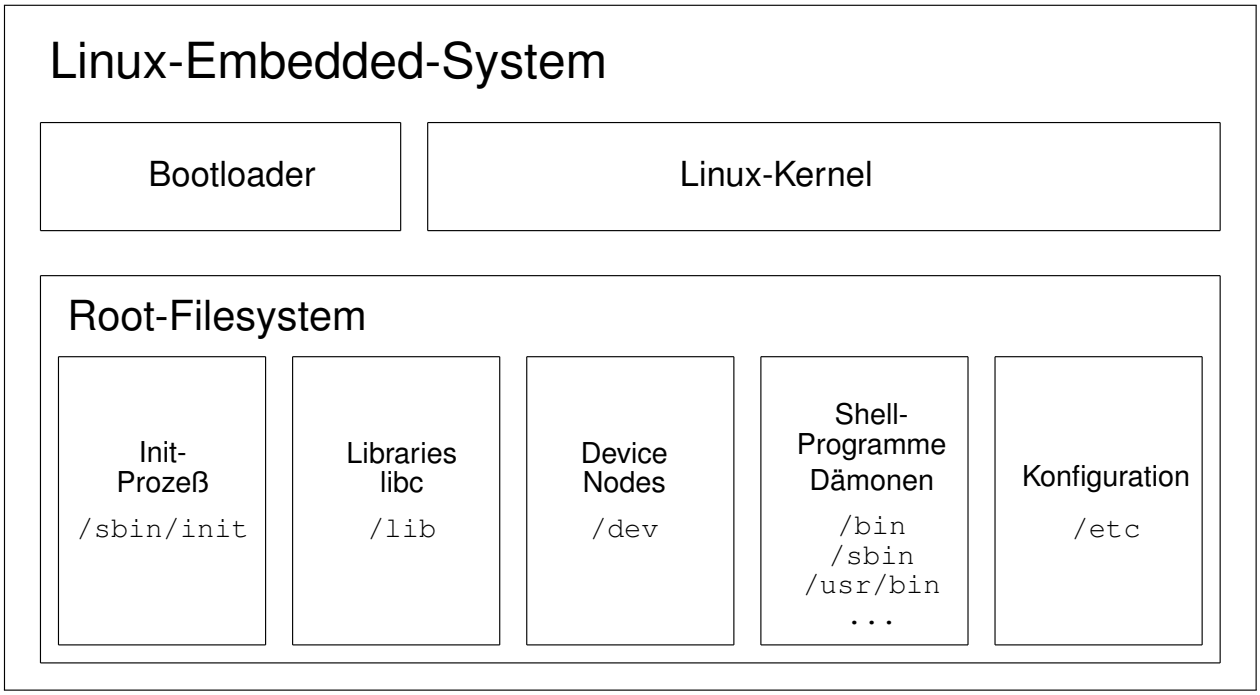
- Hardware-Architektur
- Resourcen-Limitierungen (Rechenleistung, Speicher, Peripherie, ...)
- Verfügbarkeit, auch im autonomen Betrieb
- Echtzeitanforderungen
- System-Update im Feld
- Reproduzierbarkeit des Komplettsystems
- Massenspeicher (managed / unmanaged Flash)

Ist Embedded-Linux ein anderes Linux? III

Deshalb:

- Embedded-Linux ist ein kleines, auf definierte Aufgaben reduziertes Linux
- Produkt wird verkauft
  Benutzer kennt eingesetztes Betriebssystem nicht
  $\Rightarrow$ kein User / Admin vorhanden
- Die eine Distribution für alle Embedded-Linux-Systeme nicht vorhanden

Komponenten eines Embedded-Linux-Systems



Embedded-Linux entwickeln — Vorgehensweise

Entwicklungsschritte für ein Board ohne Bootloader und Linux

1. Cross-Development-Toolchain (gcc, binutils, gdb, libc, ...)
2. Bootloader (aufspielen und debuggen mittels JTAG und OpenOCD)
3. laden von Linux-Kernel mit RAM-Disk durch Bootloader
4. schreibbares Root-Filesystem (UBI-FS, ext3, ...) anlegen und Kernel flashen

Übungsboard — Hardware

Beispiele im Vortrag beziehen sich auf nachfolgende Hardware

- Zielsystem ähnlich aber nicht identisch mit Sheevaplug
- Board von Wiesemann & Theiss: ARM 926ejs, Marvell Kirkwood, Feroceon-CPU - Typ 88F6180
- NAND-Flash 1 GB mit 128 k Erasesize und 2 k Pagesize, Samsung K9K8G08U0A
- 128 MB DDR2-RAM mit 64 Mib x 16 (MT47H64M16HR-3:E; D9HNZ)
- Console auf UART-1 (ttyS1), MPP-Pins 13 u. 14, Typ NC16550
- On-Chip-Debugging mit OpenOCD
- JTAG-Adapter: ARM-USB-TINY-H, FTDI-2232-Chip

Übungsboard — Flash-Layout

Start	Größe	Verwendung
0x00000000	0x000E0000	u-boot (896k) Bootloader
0x000E0000	0x00020000	u-boot-env (128k) Umgebungsvariablen vom Bootloader
0x00100000	0x02000000	kernel (32M) Linux-Kernel
0x02100000	0x08000000	rootfs (128M) Root-Filesystem
0x0A100000	0x35F00000	data (951M) Anwendungsdaten

2 Toolchain

Cross-Development-Toolchain

- Entwicklungswerkzeuge auf dem Host-System erstellen Bootloader, Kernel und Root-Filesystem des Target
- produzieren und verarbeiten Instruktionen des Ziel-Systems

  $\Rightarrow$ Cross-Development-Toolchain
- Open-Source-Tools für die Generierung der Toolchain
- die Erstellung einer Toolchain „From-The-Scratch“ kann erheblichen Aufwand bedeuten
- auf passende Version hinsichtlich Kernel und Target achten

Buildroot — Toolchain und Root-FS

Entwicklungsrechner — buildroot

`http://www.buildroot.org` Version 2013.02

```
cd /home/linux/inst

tar -xzf buildroot-2013.02.tar.gz
cd buildroot-2013.02
make sheevaplug_defconfig

make menuconfig

make
```

⇒ Cross-Development-Toolchain (`/usr/arm-linux`)
⇒ Root-Filesystem (`output/images/rootfs.ext2`)

Cross-Development-Toolchain verwenden I

Installationspfad der Toolchain einstellen

```
Build options
→ Host dir
→ /usr/arm-linux
```

→ Toolchain dort verwenden, wo sie erstellt wurde (absoluter Pfad)
→ auf anderem Rechner im identischen Pfad verwendbar
→ ansonsten: Sysroot setzen

Cross-Development-Toolchain verwenden II

Source-Datei `armenv.sh` erstellen

```
export PATH=/usr/arm-linux/usr/bin:$PATH
export ARCH=arm
export CROSS_COMPILE=arm-linux-
```

Umgebungsvariablen sourcen

```
source armenv.sh
```

oder

```
. armenv.sh
```

⇒ Bootloader, Kernel, Anwendungen, ... damit kompilieren

Beispiel für eigenes Makefile

```
all:
   ${CROSS_COMPILE}gcc appl.c -o appl
```

TAG

3 JTAG und OpenOCD

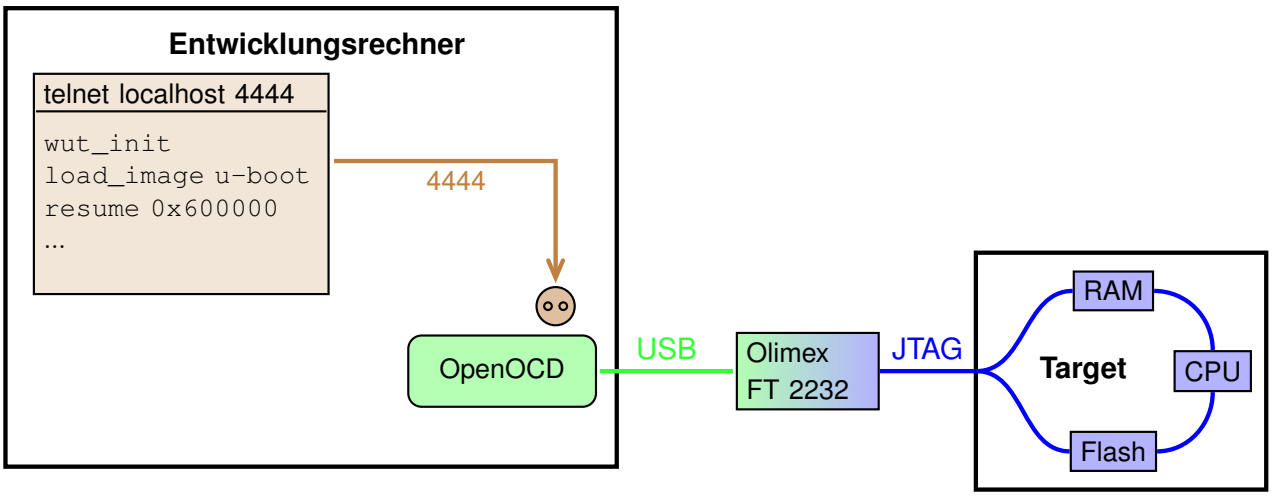
JTAG-Schnittstelle

- JTAG (Joint Test Action Group)
- ursprünglich zum Testen und Debuggen integrierter Schaltungen entwickelt (In-Circuit)
- bei vielen Boards als Hardware-Debugging und Flash-Programmier-Schnittstelle nutzbar
- Bsp: Aufspielen und Debuggen des Bootloaders
- Vorrausetzung: JTAG-Adapter zwischen Embedded-Board und Entwicklungsrechner sowie unterstützende Software zum Programmieren, Debuggen, ...
- neben kommerziellen Produkten auch Open-Source-Entwicklungen verfügbar

OpenOCD

- OpenOCD (Open On-Chip Debugger) wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH Augsburg entwickelt
- OpenOCD-Dämon kommuniziert mit JTAG-Adapter und liefert
  - Schnittstelle für Terminal-Verbindung (Port 4444)
  - Schnittstelle für gdb-Debugger (Port 3333)
- Konfigurationsskripte:
  - JTAG-Adapter
  - CPU-Kern
  - Board
- Vorraussetzung: JTAG-Verbindung zum Embedded-Board

JTAG-Verbindung — OpenOCD



OpenOCD installieren I

libftdi installieren

Download von `libftdi`:
http://www.intra2net.com/en/developer/libftdi/download.php

```
cd /home/linux/inst

tar -xzf libftdi-0.20.tar.gz
cd libftdi-0.20

./configure --prefix=/usr

make
make install
```

OpenOCD installieren II

OpenOCD installieren

```
cd /home/linux/inst

git clone git://openocd.git.sourceforge.net/        \
   gitroot/openocd/openocd

cd openocd
./bootstrap
./configure --enable-maintainer-mode                \
   --enable-ft2232_libftdi --prefix=/usr

make
make install
```

(installiert unter `/usr/share/openocd/`)

OpenOCD installieren III

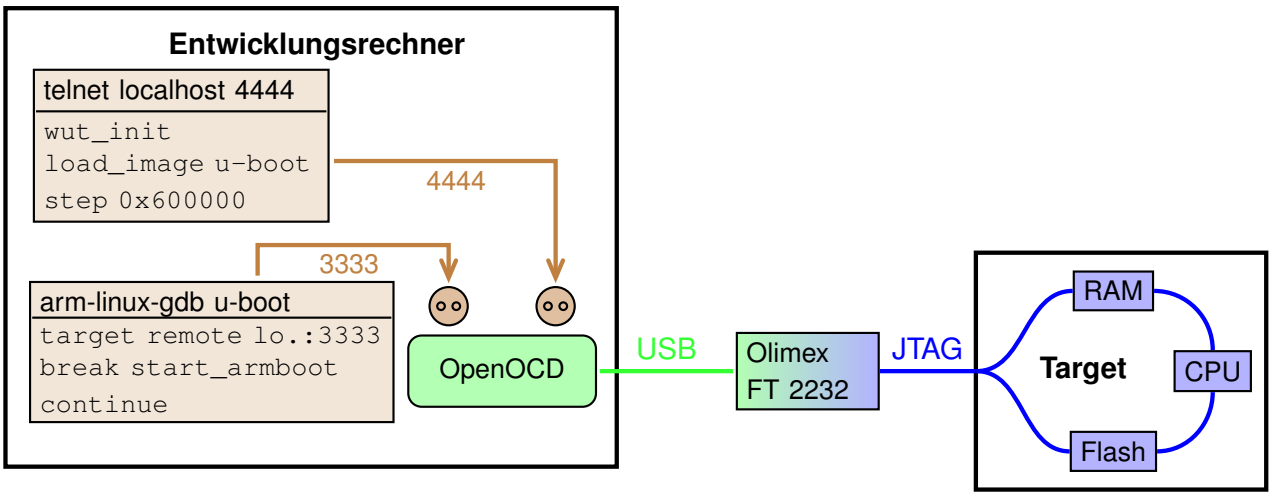
OpenOCD verwenden

```
cd /home/linux/inst

cp /usr/share/openocd/scripts/                    \
   board/sheevaplug.cfg ./openocd.cfg

openocd
```

Default-Skript `openocd.cfg` anpassen:

- Interface richtig einstellen (`find interface/...`)
- JTAG-Geschwindigkeit (`jtag_khz 2000`)
- Prozedur `wut_init()` erstellen mit CPU-Register-Einstellungen (abgeleitet von `sheevaplug_init()`)

Debuggen mit JTAG-Verbindung — OpenOCD

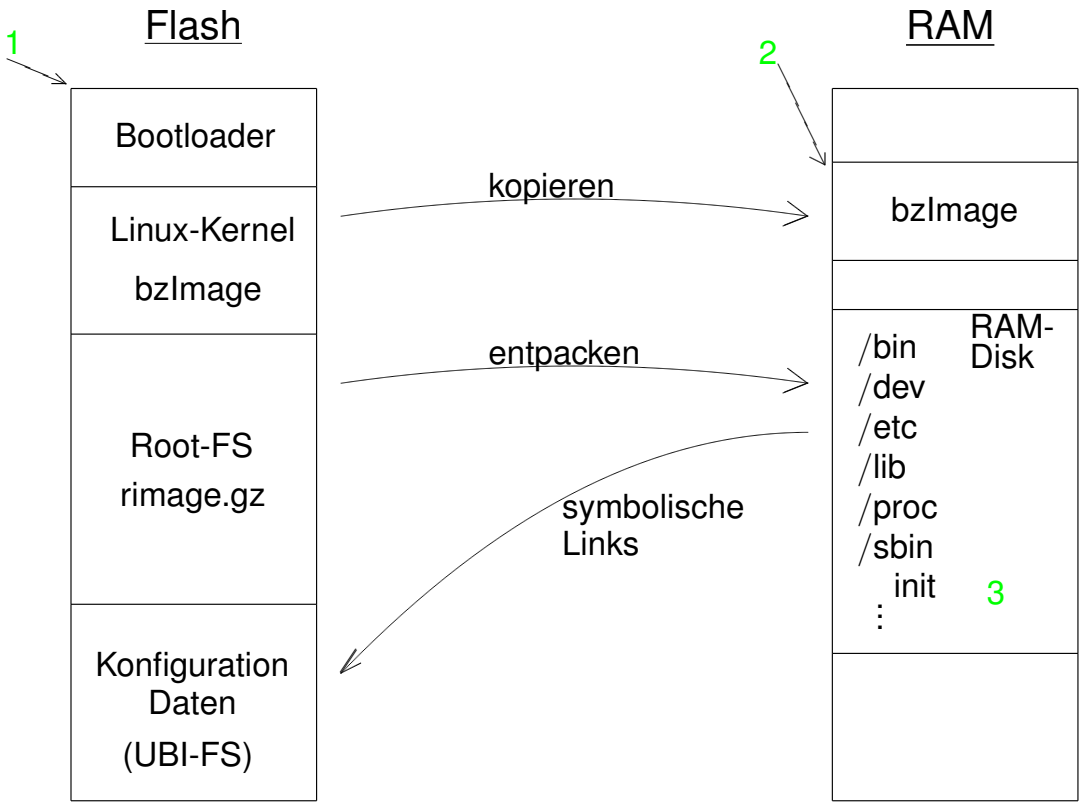


4 Linux-Kernel

Booten des Linux-Kernels

- öffnet Konsole
- entpackt sich selber (optional)
- initialisiert zentrale Einheiten, den „Kern des Kernels“: Memory-Management, Scheduling, Interprozess-Kommunikation
- initialisiert Geräte- und Dateisystemtreiber
- mountet das Root-Filesystem
- startet den init-Dämon `/sbin/init`

Bootvorgang eines Embedded-Linux mit RAM-Disk



Kernel konfigurieren und erstellen

Entwicklungsrechner — Kernel erstellen

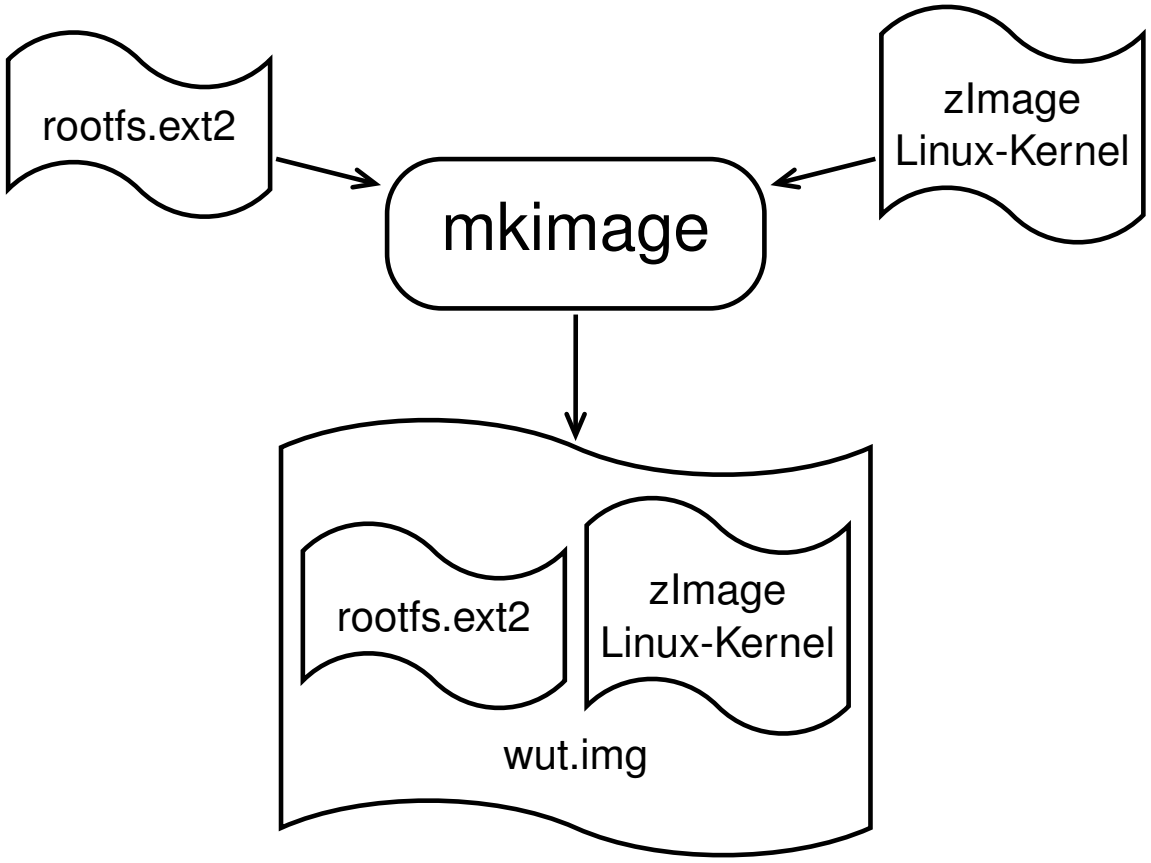
`http://ftp.kernel.org` linux-3.6.1-rt1

Kernel entpacken, RT-Patch einspielen

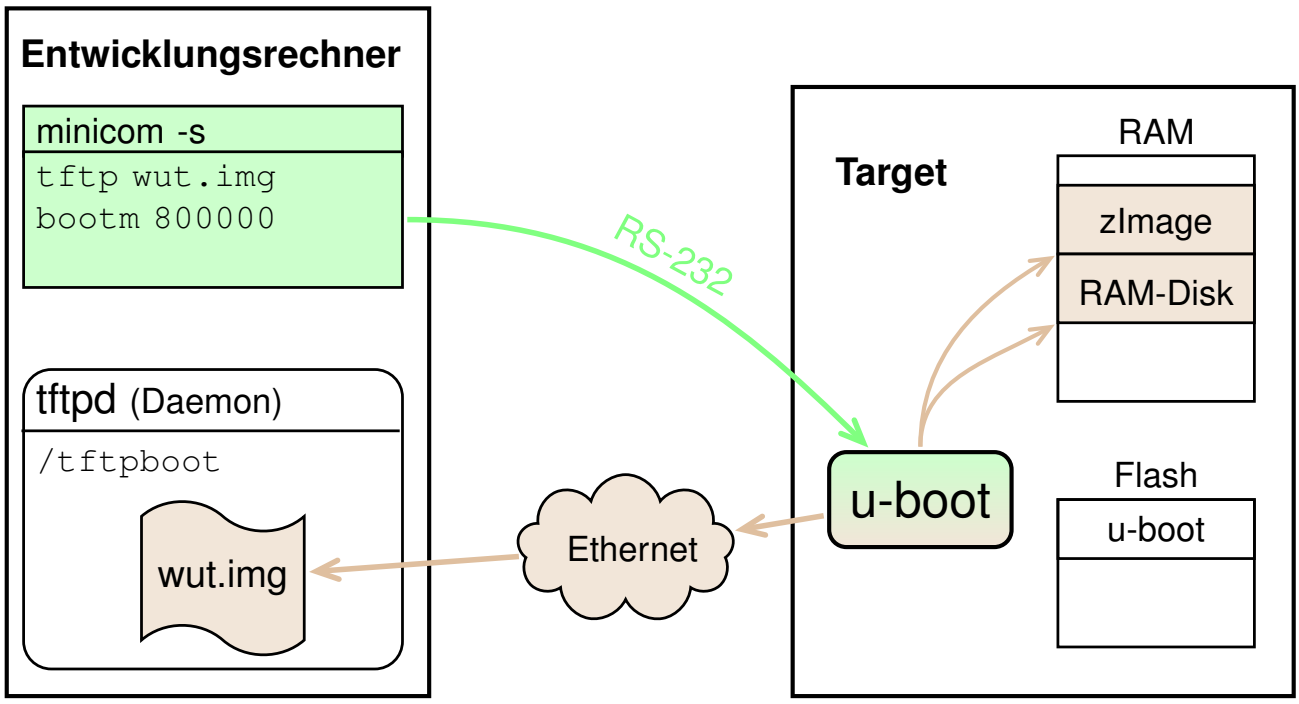
```
source armenv.sh

make kirkwood_defconfig
make menuconfig

make
```

Kernel-Image

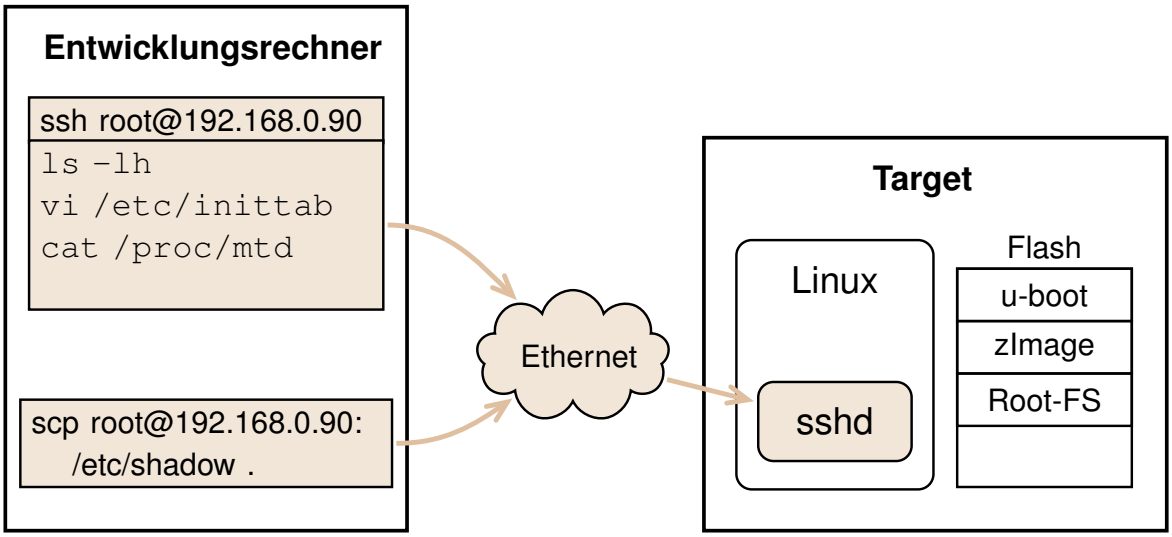
U-Boot-Image generieren



Bootloader-Verbindung



Linux-Target mit RAM-Disk



5 Root-Filesystem
- Aufbau vom Root-FS
- buildroot
- Root-FS flashen

init-Dämon — `/sbin/init`

- Konfigurationsdatei: `/etc/inittab`
- nimmt Systemeinstellungen vor (IP-Adresse, ...)
- mountet weitere Dateisysteme (`/proc`, `/sys`, ...)
- startet Dämonen entsprechend dem Runlevel (syslogd, sshd, ...)
- respawned Terminals (Login-Shells)
- **Aufwand:**

  Konfiguration vornehmen

ext2-Filesystem-Image erstellen

- leere Datei mit gewünschter Zielgröße anlegen
  ```
  dd if=/dev/zero of=rimage bs=1k count=8192
  ```
- Dateisystem in Datei anlegen (kein reservierter Bereich, 512 I-Nodes, 128 Bytes / I-Node)
  ```
  mkfs.ext2 -m0 -v -N 512 -I 128 -F rimage
  ```
- Datei als Dateisystem mittels Loopback-Device mounten
  ```
  mkdir mnt
  mount -o loop [-t ext2] rimage mnt
  ```
- Root-FS in gemountete Datei kopieren, unmounten und komprimieren
  ```
  cp -av /my_rootfs/* mnt/
  umount mnt
  gzip -9 < rimage > rimage.gz
  ```


Root-Filesystem ohne Installation testen

- Mounten des Root-FS im Target:
  ```
  mkdir my_rootfs
  mount -o loop rootfs.ext2 my_rootfs
  ```
- Shell mit Wurzelverzeichnis `/` auf gemountetes Root-FS ausführen:
  ```
  chroot my_rootfs /bin/sh
  ```
- Beendigung mit `exit`

busybox — Programme und Dämonen

- Implementierung von Shell-Programmen und Dämonen speziell für Embedded Systeme
- Programme wurden in ihrer Funktionalität auf das Wesentliche beschränkt (80:20-Regel)
- nur ein einziges Executable, welches über Soft-Links aufgerufen wird

  $\Rightarrow$ spart Entry- und Exit-Codesequenzen
- Funktionsumfang konfigurierbar

  $\rightarrow$ `make menuconfig` - Skripte

μ**CLibc** — schlanke Bibliotheken I

- libc-Implementierung; jedoch erheblich kleiner als glibc
- Konfigurierbar (locale-Support, IPV6, ...)
- Optimierung auf minimalen Footprint
- kein Support anderer Betriebssysteme wie MS-DOS
- Verzicht auf Debugging- und Tracing-Features (z. B. `backtrace()`)
- alle wichtigen Funktionalitäten sind enthalten

μ**CLibc** — schlanke Bibliotheken II

- Implementierung neuer Features mit zeitlichem Versatz (z. B. NPTL-Support)
- keine API-Kompatibilität zwischen Versionen oder Konfigurationen
  $\Rightarrow$ Anwendungen immer gegen die im Target verwendete μClibc erstellen

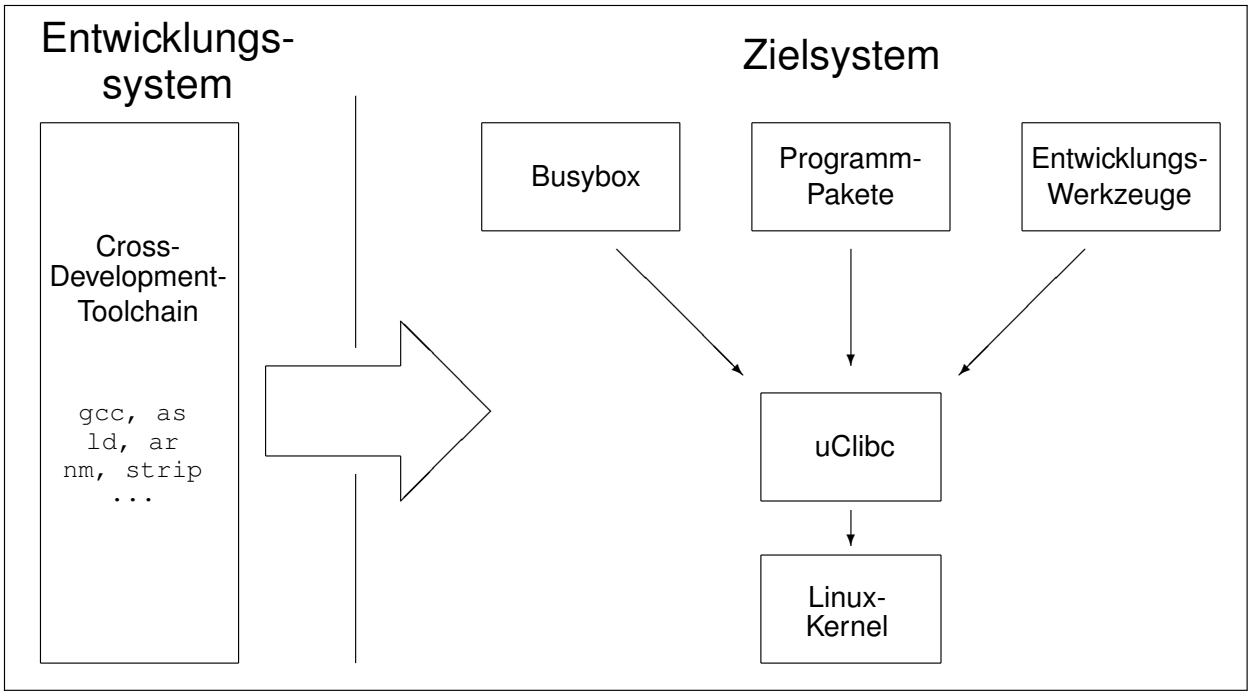
  $\Rightarrow$ einer erstellt Toolchain inkl. μClibc und verteilt diese im Entwicklungsteam, z. B.:

```
tar -czf unsere-toolchain.tgz /usr/arm-linux
```


eglibc — reduzierte glibc

- für Embedded Linux reduzierte glibc
- Abwärtskompatibilität
- Ziel: Binärkompatibel mit glibc
- neue Features zusammen mit glibc

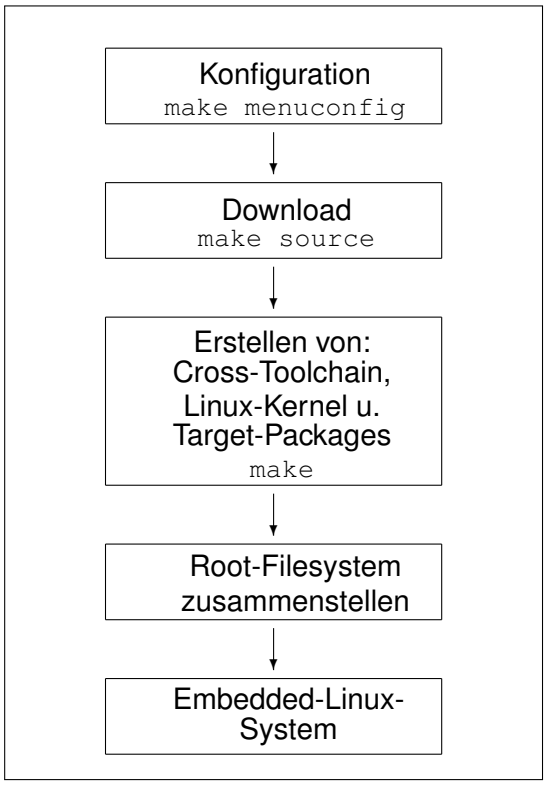
Erstellungsprozeß eines Embedded Linux Systems



buildroot — automatisierter Target-Buildprozess

- Erstellung des Target-Images weitestgehend automatisiert mittels Makefiles
- konfigurierbar, adaptierbar und erweiterbar
- verfügbar für viele Architekturen
- downloaded, patched und erstellt automatisch aus den Sourcen
- komplett Open-Source-Software
- Root-Filesystem inklusive Konfigurationsdateien und Device-Nodes

Ablaufsequenz bei Verwendung von buildroot



Was beinhaltet buildroot?

- Cross-Development-Toolchain für Hostsystem
- native Entwicklungs- und Debugging-Werkzeuge für das Target
- busybox und μClibc
- viele zusätzliche Open-Source-Softwarepakete
- Bootloader für unterschiedliche Architekturen und Anwendungsfälle
- Linux-Kernel

buildroot — Anpassungen I

Konfiguration

- busybox anpassen:
  `make busybox-menuconfig`
- μClibc anpassen:
  `make uclibc-menuconfig`
- zusätzliche Pakete im buildroot auswählen

buildroot — Anpassungen II

Root-FS anpassen

- Login-Konsole setzen:
  `/etc/inittab` → `ttyS1`
- Passwort vergeben für ssh-Login:
  `passwd`
  → `/etc/shadow`
- IP-Adresse einstellen:
  `/etc/network/interface`
  `/etc/init.d/rcS/S40network restart`
- dropbear-Keys weiter verwenden:
  `/etc/dropbear`

buildroot — Anpassungen III

Anpassungen im Root-FS integrieren

- vom Target Dateien und Verzeichnisse in Root-FS übernehmen:
  `passwd`, `shadow`, `dropbear`, ...
  siehe Unterverzeichnis: `fs/skeleton`
- Datei-Rechtevergabe:
  `target/generic/device_table.txt`
- generierte Device-Nodes:
  `target/generic/device_table_dev.txt`

Anwendungen in Buildprozeß integrieren

Anwendung kopieren nach: `package/customize/source`
und Option `customize` in Konfiguration aktivieren

native virtualisiert entwickeln — elbe

- QEMU emuliert Zielsystem auf Entwicklungsrechner
- Nutzung von vorkompilierten Debian-Paketen für das Zielsystem
- Definition des Zielsystems in XML-Datei
- Architekturen: x86, amd64, arm, powerpc
- Open-Source-Tool „elbe“ automatisiert diese Schritte
  → Ansatz für Debian-basierte Embedded-Linux-Distribution

Root-FS auf Flash mit JFFS2 kopieren I

Entwicklungsrechner

`rootfs.ext2` wird von buildroot erstellt

```
scp rootfs.ext2 root@192.168.0.90:/tmp/
```


Root-FS auf Flash mit JFFS2 kopieren II

Erasen und Kopieren — Zielsystem

Zielsystem mit Kernel und RAM-Disk booten

```
flash_erase /dev/mtd3 0 0
mount -t jffs2 /dev/mtdblock3 /mnt

mkdir /mnt2
mount -o loop /tmp/rootfs.ext2 /mnt2

cp -av /mnt2/* /mnt/
umount /mnt2
umount /mnt
```

Vorteil: Kernel-Treiber erstellt Filesystem das er später nutzt

Beispiel: Kernel für JFFS2-Root-FS flashen I

Entwicklungsrechner — U-Boot-Kernel-Image generieren

Erstellung eines U-Boot-Images, welches zum Booten eines JFFS2-Dateisystems geeignet ist und nur den Linux-Kernel enthält:

```
mkimage -A arm -O linux -T kernel -C none
  -a 0x00008000 -e 0x00008000
  -n Linux-Kernel-Image -d zImage wut.kernel

cp wut.kernel /tftpboot
```


Beispiel: Kernel für JFFS2-Root-FS flashen II

U-Boot

```
U-Boot> tftp wut.kernel

U-Boot> nand erase 100000 2000000
U-Boot> nand write 800000 100000 2000000

U-Boot> setenv bootargs 'console=ttyS1,115200
   root=/dev/mtdblock3 rw rootfstype=jffs2'

U-Boot> setenv bootcmd
   'nand read 800000 100000 2000000;
   bootm 800000'

U-Boot> saveenv
U-Boot> boot
```

Zielsystem

6 Dateisysteme
- Dateisysteme-Übersicht
- unmanaged Flash (Raw-Flash)
- managed Flash (FTL-Flash)

Dateisysteme - Übersicht

Anwendungsfall	Dateisystem	Beispiele
NAND- / NOR-Flash	jffs2 ubifs	Root-FS auf Flash; schreibbare Konfiguration
Flash mit Controller	ext2, ext3 fat	Root-FS auf CF-/SD-Card, ... Massenspeicher
„flüchtige“ Daten	tmpfs ramfs	`/tmp, /var, ...` InitRD beim Booten
rein lesbare Daten, komprimiert	squashfs	Archiv-Daten
Netzwerk	nfs, cifs	Unix-Netzwerk heterogenes Netz (Samba)
Pseudo-Dateisysteme	procfs, sysfs debugfs	Systeminformationen Debugging u. Tracing

unmanaged Flash (Raw-Flash) I

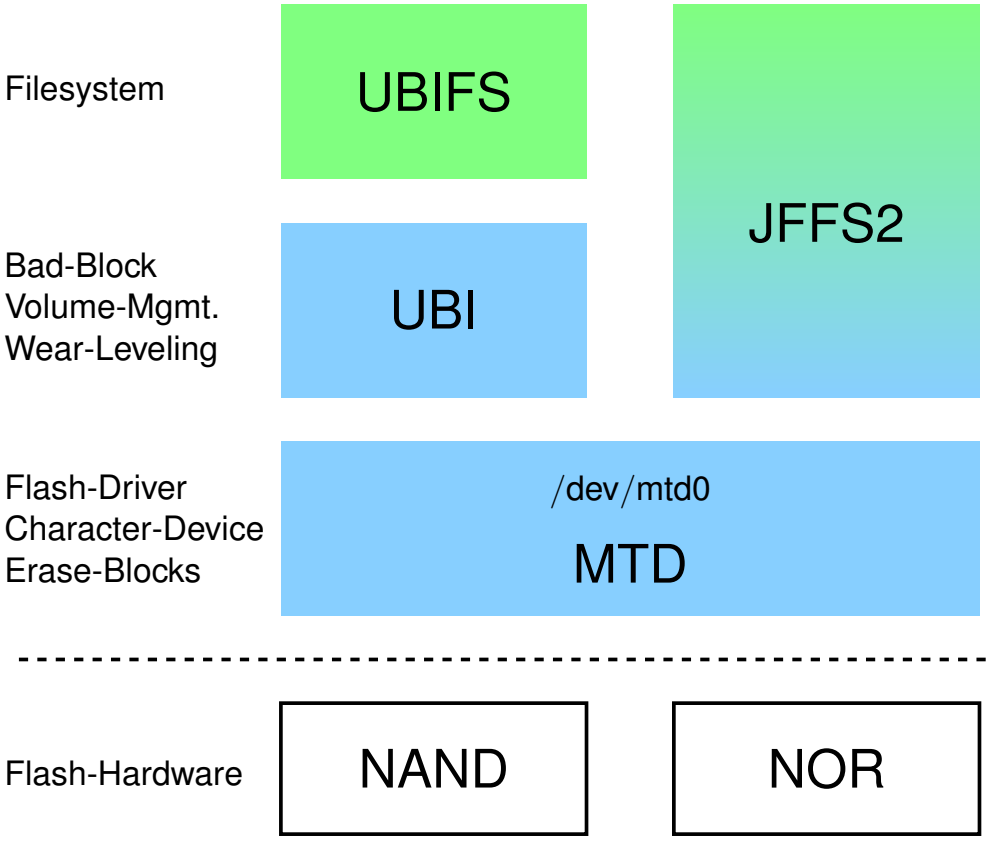
- kein FTL-Controller für Schreib-Lese-Zyklen-Optimierung
- Erase-Block als kleinster löschbarer Bereich; z. B. 128 kB
- Page- bzw. Sub-Page als kleinste schreibbare Datenmenge; z. B. 2 kB bei NAND; bei NOR bis zu 1 Byte
- Schreib-Lese-Zyklus besteht aus:
  einem Löschvorgang (Erase) plus
  einem Schreibvorgang (Write) plus
  beliebig vielen Lesevorgängen (Read)
- Anzahl an Schreib-Lese-Zyklen bezieht sich auf Erase-Block und ist technologisch begrenzt; z. B. 100.000

unmanaged Flash (Raw-Flash) II

Anforderungen

- Kommunikation mit Flash
  → Treiber für unterschiedliche Flash-Technologien (MTD-Schicht: Memory Technology Devices)
- Dateisystem muß Erase-Write-Read-Zyklen unterstützen
  → spezielle Flash-Filesysteme (jffs2, ubifs, yaffs, logfs)
- Anwendungsdesign
  → Schreiboperationen minimieren bzw. auslagern in RAM-basiertes Filesystem
  Beispiel: `/var/log` und `/tmp` im Hauptspeicher als tmpfs

Raw-Flash-Support



UBI-FS benutzen I

UBI-FS (I)

```
flash_erase /dev/mtd4 0 0
ubiformat /dev/mtd4 -s 512
ubinfo
...
UBI control device major/minor: 10:62

mknod /dev/ubictl c 10 62
ubiattach /dev/ubictl -m 4
```

Zielsystem

nur in Entwicklung

UBI-FS benutzen II

UBI-FS (II)

Zielsystem

```
cat /sys/class/ubi/ubi0/dev
253:0
mknod /dev/ubi0 c 253 0

ubimkvol /dev/ubi0 -N mydaten -m

mount -t ubifs ubi0:mydaten /mnt
```

UBI-FS als Root-FS

Zielsystem

Kernel-Kommandozeile:

```
ubi.mtd=data root=ubi0:mydaten rootfstype=ubifs
```

`ubi.mtd=data` — Name der MTD-Partition (`/proc/mtd`)
`root=ubi0:mydaten` — 1. UBI-Device und Volume-Name

UBI-FS benutzen III

UBI-FS löschen

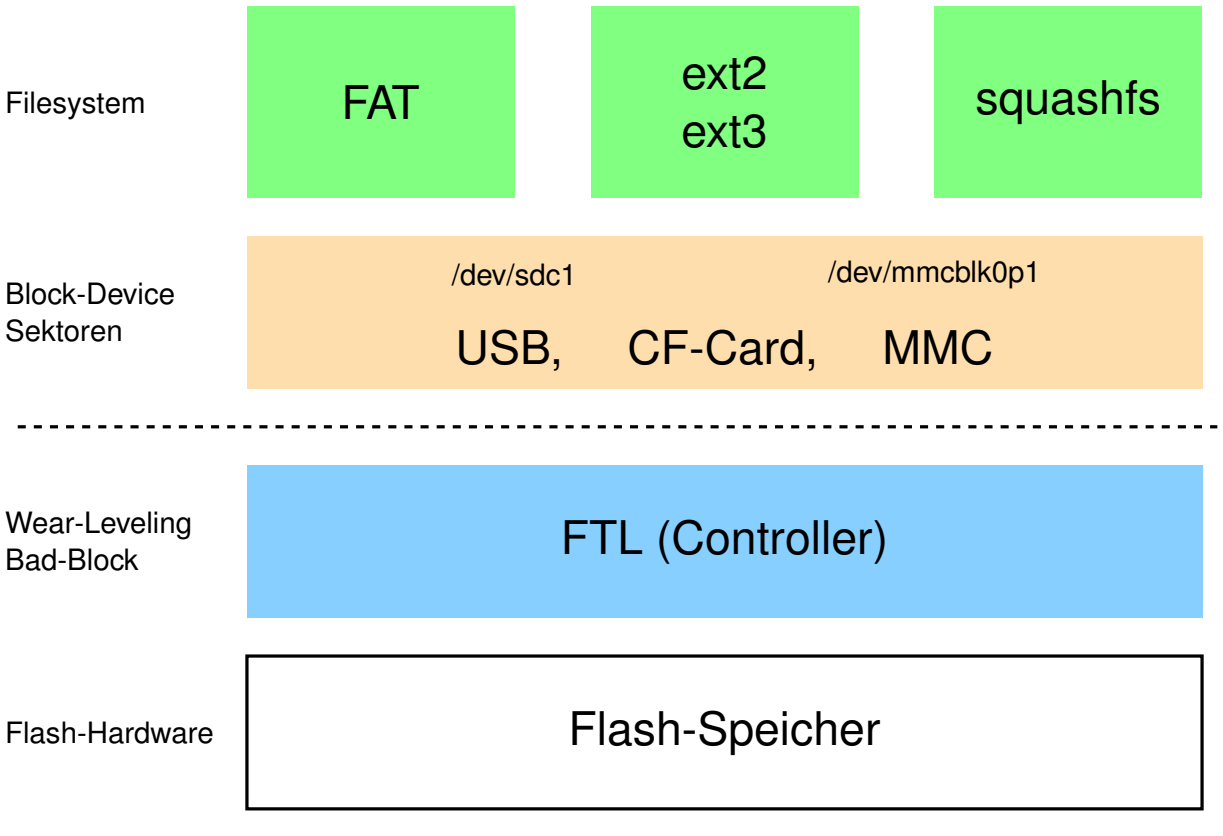
Zielsystem

```
umount /mnt

ubirmvol /dev/ubi0 -N data
ubidetach /dev/ubictl4 -m 4
```

FTL-Flash mit eigenem Controller

- Beispiele: USB-Stick, CF-Card, ...
- kein spezielles Flash-Filesystem notwendig
- handhabbar wie gewöhnliche Festplatte; frei partitionierbar
- „normale“ Dateisysteme verwendbar (ext2, ext3, fat)
  → diese optimal konfigurieren
  ⇒ häufiges und zyklisches Schreiben vermeiden
- Controller optimiert Schreib-/Lese-Zyklen-Beschränkung
  → Spezifikation und Grenzen des Flash beachten
  → große Qualitätsunterschiede
- keinen Swap-Space anlegen

FTL-Flash-Support



7 Ausblick

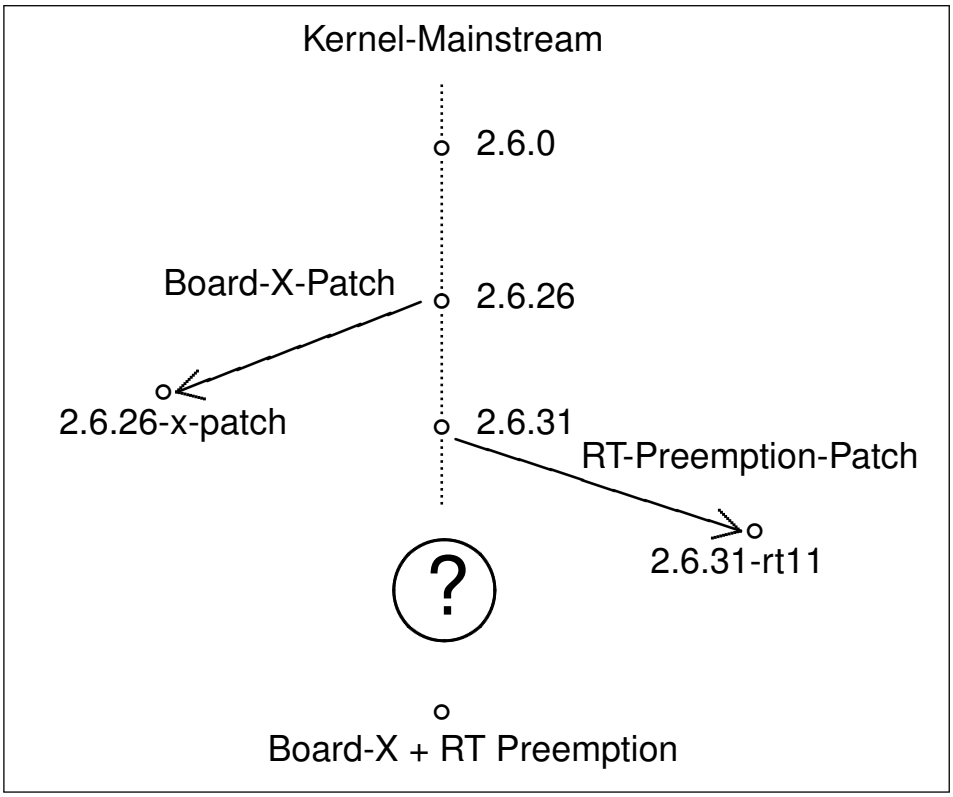
Erstellvorgang reproduzierbar machen

- bei der Installation zusätzlicher Pakete auf einem Linux-System ändert sich ggf. der Erstellvorgang
- Erstellung der Toolchain und aller Hilfsprogramme in einem eigenen Unterverzeichnis
- Kopieren oder Verlinken der Sourcecodes in das Toolchain-Verzeichnis
- Wechsel in dieses Unterverzeichnis mittels z. B.
  `chroot /usr/arm-linux /bin/bash`
- Erstellvorgang starten
- Change-Root-Umgebung verlassen:
  `exit`

Welchen Kernel soll ich verwenden?

- mit Mainstream-Kernel kommt man in den Genuß zukünftiger Verbesserungen und Entwicklungen
- gegebenenfalls sind Patches notwendig:
  - Hardware-Architektur
  - Echtzeitfähigkeit (RT-Preemption-Patch)

Linux-Kernel-Patches



Tipps für ein erfolgreiches Embedded-Linux I

- Eigenschaften der notwendigen Komponenten können im Vorfeld abgeklärt werden
- Buildprozess vor der Auswahl des Targets testen

  ⇒ Unverträglichkeiten und Probleme treten zutage

  ⇒ Abschätzung, ob Feature X den Aufwand Y wert ist

  ⇒ Eckdaten des Zielsystems werden messbar
- Zusammenspiel von Komponenten testen

Tipps für ein erfolgreiches Embedded-Linux II

- es existieren viele gut funktionierende Buildumgebung

  ⇒ an Problemen dranbleiben und sich Hilfe holen
- Start mit minimaler Default-Konfiguration beginnen und darauf sukzessive aufbauen

  ⇒ die zu lösenden Probleme sind kleiner und handlicher
- Verfügbarkeit der Quellcodes für alle verwendeten Komponenten sicherstellen

  ⇒ minimiert ungewollte Abhängigkeiten von Dritten

Tipps für ein erfolgreiches Embedded-Linux III

- funktionierende Kombinationen wählen hinsichtlich:
  - Hostsystem
  - Targetsystem
  - Kernel u. notwendigen Patches (Architektur + Echtzeit)
  - Toolchain (binutils, gcc, Debugging-Werkzeuge)
  - Bibliotheken (μClibc, glibc, dietlibc)
- in der riesigen Auswahl an Optionen und verfügbarer Software das Ziel immer im Auge behalten

Inhaltsverzeichnis I

Embedded-Linux-System