

System-Programmierung

3: File In-/Output

CC BY-SA 4.0, T. Amberg, FHNW
(Soweit nicht anders vermerkt)

Slides: tmb.gr/syspr-3

Überblick

Diese Lektion behandelt *File Input und Output*.

Wie man Files öffnet, liest und schreibt.

Datenstrukturen im Filesystem.

File I/O

Alle System Calls für I/O beziehen sich auf einen File Deskriptor *fd*, ein (kleiner) positiver Integer Wert.

File Deskriptoren beziehen sich auf Dateien, sowie auf Pipes, FIFOs, Sockets, Devices und Terminals.

Jeder Prozess hat sein eigenes Set an Deskriptoren, per Konvention mindestens *stdin*, *stdout* und *stderr*, von der Shell geöffnet und an den Prozess vererbt.

Standard File Deskriptoren

File Deskriptor Nummer

0 // standard input

1 // standard output

2 // standard error

POSIX Konstante

```
#include <unistd.h>
```

```
STDIN_FILENO, STDOUT_FILENO, STDERR_FILENO
```

File I/O System Calls

open() öffnet das File *pathname*, ergibt Deskriptor *fd*:

```
fd = open(pathname, flags, mode); // -1: error
```

read() liest $r \leq n$ bytes aus File *fd* in den Buffer *buf*:

```
r = read(fd, buf, n); // r = 0: EOF, -1: error
```

write() schreibt $w \leq n$ bytes aus Buffer *buf* ins File *fd*:

```
w = write(fd, buf, n); // w = -1: error
```

close() schliesst das File *fd*: `result = close(fd);`

File *open()* System Call

open.c

Deklaration:

```
int open(const char *pathname, int flags, ...  
/* mode_t mode */); // nur mit O_CREAT
```

Access, creation & status *flags* werden mit | verodert:

```
O_RDONLY, O_WRONLY, O_RDWR // access mode  
O_CREAT, ... // creation, O_APPEND, ... // status
```

Falls *O_CREAT* in *flags*, setzt *mode* Zugriffsrechte:

```
S_IRUSR, S_IWUSR, ... // mit | kombinierbar
```

File *open()* Beispiele

Existierende Datei namens *my.txt* zum Lesen öffnen:

```
int fd = open("my.txt", O_RDONLY);
```

Existierende Datei öffnen, oder neue Datei kreieren, zum Schreiben, Read/Write Permissions* für User:

```
int fd = open("my.txt", O_WRONLY|O_CREAT,  
    S_IRUSR|S_IWUSR);
```

*File-Zugriffsrechte, falls die Datei neu erstellt wird.

File *open()* Flags

O_RDONLY

Öffnen zum Lesen

O_WRONLY

Öffnen zum Schreiben

O_RDWR

Öffnen zum Lesen und Schreiben

O_CLOEXEC

Das *close-on-exec* Flag setzen

O_CREAT

File erstellen, falls es nicht bereits existiert

O_DIRECTORY

Fehler, falls *pathname* kein Directory ist

O_EXCL

Mit *O_CREAT*: File exklusiv erstellen

O_LARGEFILE

Auf 32-bit Systemen um grosse Files zu öffnen

O_NOCTTY

Pathname kann nicht kontroll. Terminal sein

O_NOFOLLOW

Symbolische Links nicht dereferenzieren

O_TRUNC

Existierendes File auf Länge 0 kürzen

O_APPEND

Write wird am Ende des Files angehängt

O_ASYNC

Signal generieren, wenn I/O möglich wird

O_DIRECT

File I/O umgeht Buffer Cache

O_DSYNC

Datenintegrität für synchronisierten I/O

O_NOATIME

Bei *read* last access time nicht updaten

O_NONBLOCK

Im "nonblocking" Modus öffnen

O_SYNC

Macht *write* synchron

File *open()* Modes

S_ISUID	Set-user-ID
S_ISGID	Set-group-ID
S_ISVTX	Sticky
S_IRUSR	User-read
S_IWUSR	User-write
S_IXUSR	User-execute
S_IRGRP	Group-read
S_IWGRP	Group-write
S_IXGRP	Group-execute

S_IROTH	Other-read
S_IWOTH	Other-write
S_IXOTH	Other-execute

```
// z.B. rw-rw-rw- =>
mode_t mode =
    S_IRUSR | S_IWUSR |
    S_IRGRP | S_IWGRP |
    S_IROTH | S_IWOTH;
```

File *open()* Errors

Bei Fehlern liefert *open()* den Wert *-1* und setzt *errno*:

```
int fd = open(pathname, flags, mode);  
if (fd == -1) { printf("%d\n", errno); ... }
```

Eine Auswahl an möglichen Fehler-Werten:

EACCES	Ungenügende Permissions	ENOENT	Ein Teil des File-Pfads existiert nicht, oder O_CREAT fehlt
EISDIR	Das File ist ein Directory, Schreiben ist nicht möglich	EROFS	Das File ist auf einem read-only File-System, Schreiben geht nicht
EMFILE	Zu viele offene Files im Prozess, RLIMIT_NOFILE ist erreicht	ETXTBSY	File ist ein laufendes Executable, muss zuerst terminiert werden
ENFILE	Zu viele offene Files im System		

File *read()* System Call

read.c

Deklaration:

```
ssize_t read(int fd, void *buf, size_t n);
```

Resultat: $r \leq n$ Bytes gelesen aus File *fd* in Buffer *buf*, falls $r = 0$, wurde *End of File* (EOF) erreicht.

z.B. Bytes aus ASCII File lesen, auf *stdout* ausgeben:

```
char buf[32]; int fd = open("my.txt", ...);  
ssize_t r = read(fd, buf, 32);  
write(STDOUT_FILENO, buf, r);
```

File *read()* Errors

Bei Fehlern liefert *read()* den Wert *-1* und setzt *errno*:

```
ssize_t r = read(fd, buf, n);  
if (r == -1) { printf("%d\n", errno); ... }
```

Eine Auswahl an möglichen Fehler-Werten:

EAGAIN

Lese-Operation würde ein als non-blocking geöffnetes File blockieren

EBADF

File Descriptor ungültig oder nicht zum Lesen geöffnet

EFAULT

Der Buffer *buf* ist ausserhalb des dem Caller zugänglichen Speichers

EINTR

Der Call wurde von einem Signal unterbrochen, vor dem Lesen

EINVAL

File Descriptor zeigt auf Objekt das nicht gelesen werden kann

EIO

I/O Fehler bei low-level I/O, oder weil Call aus Hintergrundprozess

EISDIR

File Descriptor zeigt auf Directory

File *write()* System Call

write.c

Deklaration:

```
ssize_t write(int fd, const void *buf, size_t n);
```

Resultat: $w \leq n$ Bytes geschrieben aus Buffer *buf* in *fd*, falls $w < n$ gab es zu wenig Diskplatz, oder ein Signal.

z.B. Bytes eines Strings in ein ASCII File schreiben:

```
int fd = open("my.txt", O_WRONLY);
```

```
char buf[] = "hello";
```

```
ssize_t w = write(fd, buf, 5); // ohne '\0'
```

File *write()* Errors

Bei Fehlern liefert *write()* den Wert *-1* und setzt *errno*:

```
ssize_t w = write(fd, buf, n);  
if (w == -1) { printf("%d\n", errno); ... }
```

Eine Auswahl an möglichen Fehler-Werten:

EAGAIN

Schreib-Op. würde ein als non-blocking geöffnetes File blockieren

EBADF

File Descriptor ungültig oder nicht zum Schreiben geöffnet

EDQUOT

User Quota an Blocks auf der von *fd* referenzierten Disk ist erschöpft

EFAULT

Der Buffer *buf* ist ausserhalb des dem Caller zugänglichen Speichers

EINTR

Der Call wurde von einem Signal unterbrochen, vor dem Schreiben

EINVAL

File Descriptor zeigt auf Objekt das nicht beschreibbar ist

EIO

I/O Fehler bei low-level I/O, oder weil Call aus Hintergrundprozess

ENOSPC

Das von *fd* referenzierte Device hat keinen Speicherplatz mehr

Hands-on, 20': File I/O

copy.c^{TLPI}

Schreiben Sie ein Programm *my_copy.c*, das eine beliebig grosse, existierende Datei *source* liest und in eine neue Datei *dest* kopiert, wie das *cp* Kommando:

```
$ ./my_copy source dest
```

Verwenden Sie System Calls: *open()*, *read()*, *write()*.

Fertig? Bauen Sie Fehlerbehandlung ein.

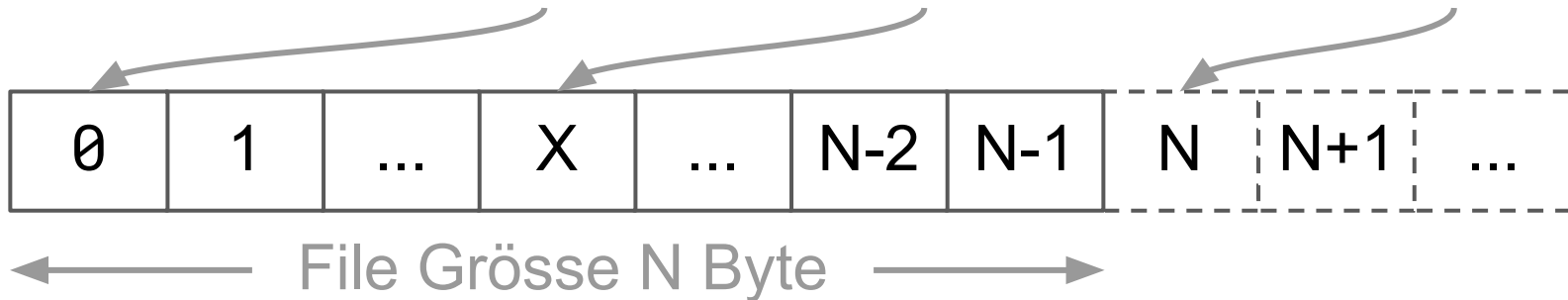
File Offset

`lseek.c` | `seek_io.c`^{TLPI}

Für jedes offene File hält der Kernel einen *File Offset*, die Stelle wo das nächste *read()* oder *write()* beginnt.

lseek() erlaubt, den *offset* zu setzen, gezählt ab *from*:

```
off_t lseek(int fd, off_t offset, int from);  
// from = SEEK_SET, SEEK_CUR oder SEEK_END
```



Naives Append

append.c

Bytes sollen ans Ende eines Files angehängt werden.

Wir suchen also zuerst das Ende und schreiben dann:

```
lseek(fd, 0, SEEK_END); // move to end of file  
write(fd, buf, len); // append len bytes there
```

Suchen und Schreiben geschehen hier *nicht atomar*.

Durch die ungünstige zeitliche Verzahnung von Teiloperationen können *Race Conditions* entstehen.

Race Condition

Eine ungünstige Abfolge, wenn *append* parallel läuft:

```
A1: lseek(fd, 0, SEEK_END); // move to end
B1: lseek(fd, 0, SEEK_END); // move too early
A2: write(fd, buf, len); // append len to end
B2: write(fd, buf, len); // overwrite bytes !
```

Das zweite *write()* geht von falschen Tatsachen aus: es stimmt zum Zeitpunkt *B2* nicht mehr, dass der Offset im Prozess *B* am Ende des (einzigen) Files *fd* steht.

Atomares Append

append_v2.c

O_APPEND macht das Anfügen mit *write()* atomar:

```
open(..., ...|O_APPEND, ...); // if this is set  
write(...); // move to EOF happens in write
```

Ein Test zum Vergleich von *lseek()* und *O_APPEND*:

```
$ ./append f1 1000 & ./append f1 1000  
$ ./append_v2 f2 1000 & ./append_v2 f2 1000  
$ ls -al f* # expected size 2 * 10 * 1000 Bytes
```

Mit dem Ansatz *_v2* gehen keine Bytes verloren.

File exklusiv erstellen

Wenn `O_EXCL` zusammen mit `O_CREAT` verwendet wird, gibt es einen Fehler, falls das File schon existiert.

Prüfen und Erstellen geschieht dann in einem Schritt; bei Erfolg wurde das File garantiert "von uns" erstellt.

```
int fd = open(pathname, O_CREAT | O_EXCL | O_RDWR,  
S_IRUSR | S_IWUSR);
```

File *ftruncate()* System Call truncate.c

ftruncate() kürzt die Länge des Files auf *length* Bytes:

```
int ftruncate(int fd, off_t length); // 0 or -1
```

Feature Test Makro für *glibc*, aus der Doku:

```
_XOPEN_SOURCE >= 500
```

```
|| _POSIX_C_SOURCE >= 200112L // seit 2.3.5
```

```
|| _BSD_SOURCE // glibc Version <= 2.19
```

Compiler Flag bei *gcc*, falls z.B. *-std=c99*:

```
-D_XOPEN_SOURCE=500
```

Einschub: Feature Test Makros

Mit **Feature Test Macros** kann die *glibc* Library prüfen, welche Definitionen der aufrufende Code erwartet:

```
// features.h, z.B. via unistd.h
... if defined _XOPEN_SOURCE && ...
```

Das zugehörige *define* muss vor dem 1. *include* stehen:

```
// my_code.c
#define _XOPEN_SOURCE 500
#include <unistd.h> ...
```

```
// od. als gcc Flag
-D_XOPEN_SOURCE=500
// d.h. POSIX.1, POSIX.2, X/Open (XPG4) Definitions,
// und SUSv2 (UNIX 98 & XPG5) Extensions
```

Kernel-Datenstrukturen für Files

Der Kernel hat eine File Deskriptor Tabelle / Prozess, mit dem *close-on-exec* Flag und einem File Pointer.

Dazu führt er eine systemweite Tabelle offener Files, mit Status Flags, Access Mode und *i-node* Pointer.

Für das Filesystem gibt es eine Tabelle mit *i-nodes* die den File Typ (regulär, Socket, FIFO), Permissions und einen Zeiger auf eine Liste von Locks enthält.

Der Kernel führt eine Tabelle mit *fd* pro Prozess, mit offenen Files im System & mit *i-nodes* im Filesystem:

FDs/Proc.

0:	Descr. Flags	
1:		
0:		
1:		
2:		

Open Files/OS

0:	File Offset	Status Flags	
23:	5	w	
41:	64	r	
42:	0	r	

i-nodes/Filesys.

66:	File Type	File Locks	...
98:			
99:			
8192:	dir		

File Status Lesen

fcntl() liest oder ändert Zugriff, Status offener Files:

```
int flags = fcntl(fd, F_GETFL); // Flags lesen
if (flags & O_SYNC) { ... } // Flags prüfen
int mode = flags & O_ACCMODE; // Zugriff lesen
if (mode == O_RDONLY) { ... } // Zugriff prüfen

flags |= O_APPEND; // Flags modifizieren
fcntl(fd, F_SETFL, flags); // Flags schreiben
```

Nützlich, wenn man ein File schon offen bekommt.

File I/O Buffering

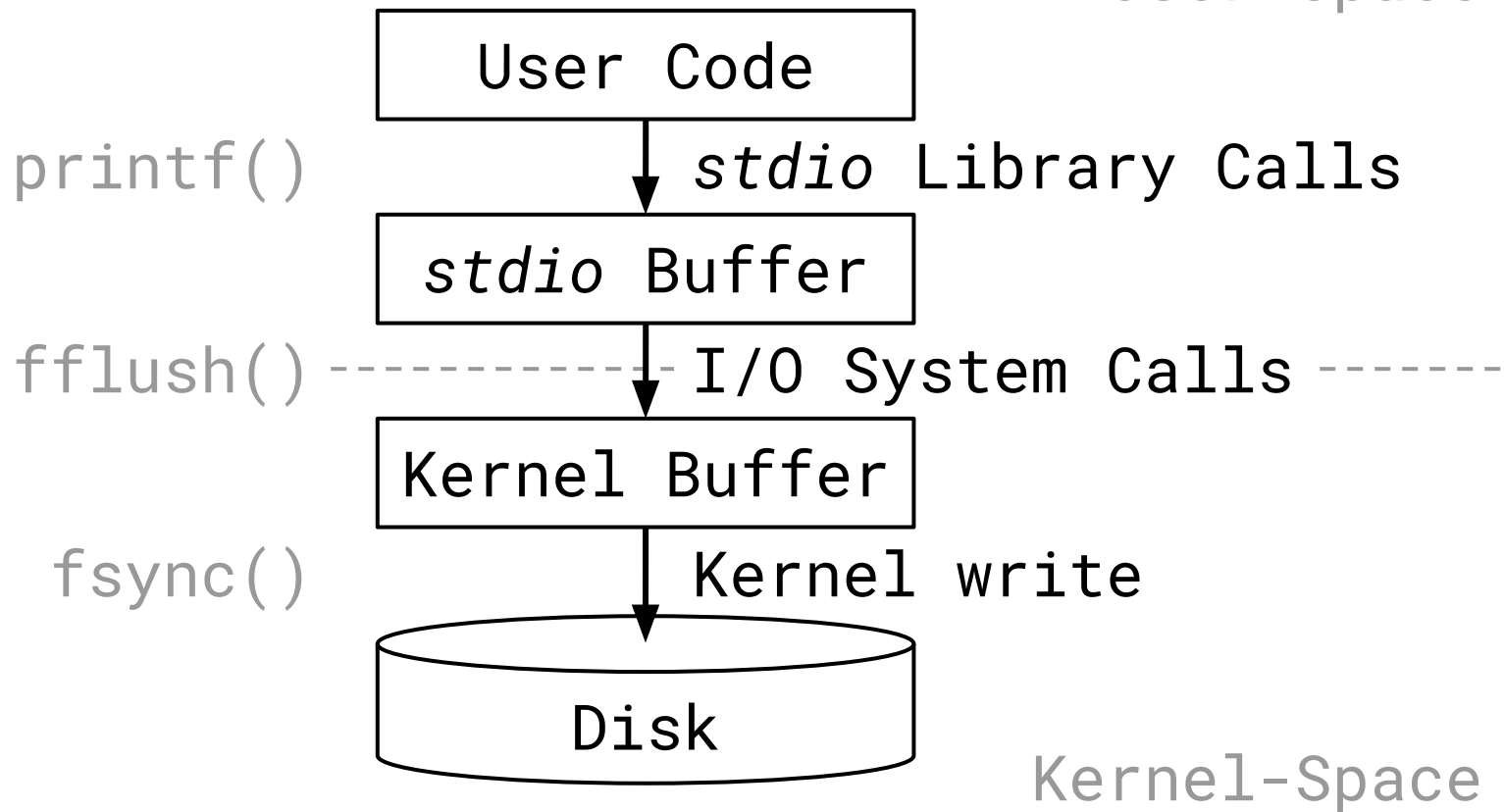
Bei regulären Files sind *read/write()* Calls gebuffert, der Kernel flushed seinen Buffer später auf die Disk.

Wenn nach *write()*, aber vor dem flushen ein *read()* kommt, retourniert der Kernel Bytes aus dem Buffer.

Damit sind *read()* und *write()* schnell genug, auch wenn der Zugriff auf die Disk relativ langsam ist.

File I/O Buffering

User-Space



Flushen von *stdio* Buffers

`stdio_buf.c`

Die *fflush()* Funktion entleert den Buffer mit *write()*:

```
int fflush(FILE *stream); // 0 od. EOF, errno
```

Falls *stream = NULL* ist, werden alle Buffer in *stdio* "gespült", die zu Output Streams gehören.

Beim Flushen von Input Streams wird der gebufferte Input verworfen; Buffer bleibt leer bis wieder *read()*.

Bei *close()* auf Streams wird *fflush()* aufgerufen.

Flushen von Kernel Buffers

Der *fsync()* Call schreibt den File Buffer auf die Disk, bzw. erstellt den "file integrity completion" Zustand:

```
int fsync(int fd); // 0 oder -1, errno
```

Denselben Effekt erreicht man mit dem O_SYNC Flag, welches nachfolgende *write()* Calls "synchron" macht:

```
int fd = open(f, O_SYNC|...); // write does fsync
```

Der Call *sync()* flushed alle File Buffer im System.

Hands-on, 10': Buffering `write_bytes.c`^{TLPI}

Kompilieren Sie das Programm *write_bytes* zuerst mit und dann ohne die Compiler Option *-DUSE_O_SYNC*.

Messen Sie die Laufzeit (*real, sys*) der Binaries, je mit *num-bytes* = 100000 und *buf-size* = 1 / 256 / 4096:

```
$ time write_bytes my_file num-bytes buf-size
```

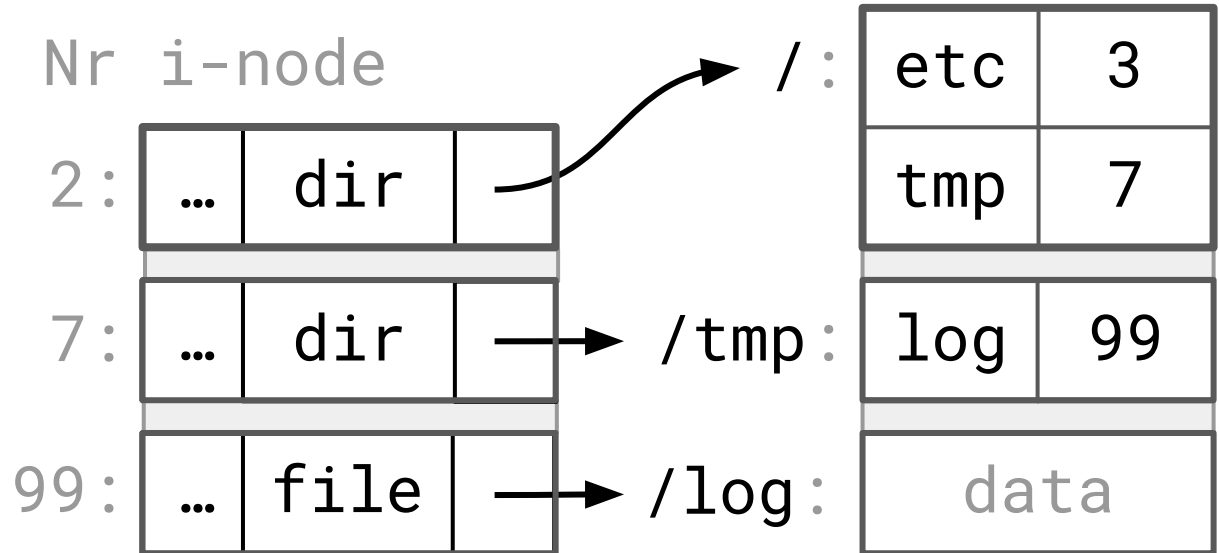
Welchen Einfluss hat die Buffergrösse? Und *O_SYNC*?

Wann/wozu ist Synchronisieren überhaupt nötig?

Directories

Directories sind im Filesystem wie Files gespeichert, aber mit einem anderen File Typ im i-node Eintrag.

Directory "Files" sind als Tabelle von File-Namen und i-node Nr. organisiert.



Directory Operationen

dir.c

Directory mit Pfad *pathname* erstellen, mit *mkdir()*:

```
int mkdir(const char *pathname, mode_t mode);
```

File von Pfad *old* zu *new* umbenennen mit *rename()*:

```
int rename(const char *old, const char *new);
```

File oder Directory löschen mit *remove()*:

```
int remove(const char *pathname);
```

File in Directory öffnen: siehe *open()* weiter oben.

File oder Directory Löschen

Die *remove()* Funktion löscht ein File / Directory:

```
int remove(const char *pathname);
```

remove() ruft entweder *unlink()* oder *rmdir()* auf:

```
int rmdir(const char *pathname); // für Dir's
```

```
int unlink(const char *pathname); // für Files
```

Falls kein anderer Prozess mehr das File offen hat,
wird es gelöscht und der Speicherplatz freigegeben.

Selbststudium: C Tipps und Geschichte

Für Tipps zur Entwicklung grösserer C Programme, schauen Sie [How I program C](#), mit Eskil Steenberg. Notieren Sie sich drei Tipps, die neu sind für Sie.

Zu Ursprung und Einfluss der Sprache C, schauen Sie: [C Programming Language](#), mit Brian Kernighan und [Why C is so Influential](#), mit David Brailsford.

Ist C eine high- oder low-level Sprache?

Feedback oder Fragen?

Gerne in Teams, oder per Email an

thomas.amberg@fhnw.ch

Danke für Ihre Zeit.

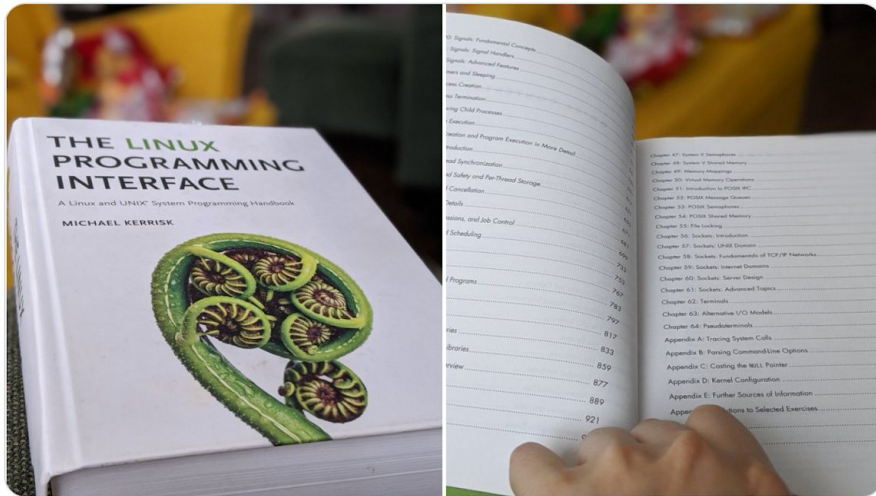


Julia Evans
@b0rk



hanging out with my favourite Linux book this morning.

I love that the chapters are so short (usually less than 20 pages) and I always learn something interesting by picking a chapter and reading it.



3:56 PM · Jan 12, 2020 · Twitter for Android

Search Twitter

Relevant people



Julia Evans
@b0rk

Following

programming and exclamation marks.
she/her. zines at wizardzines.com.

Worldwide trends



1 · Hobbies and interests · Trending

恵方巻き

195K Tweets

2 · Politics · Trending

#idlip

13.9K Tweets

3 · K-Pop · Trending

#EVERGLOW_DUN_DUN

58.5K Tweets

4 · K-Pop · Trending

#GFRIENDhasARRIVED

126K Tweets