Betriebssystemtechnik

Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz

XII. Spezialfälle: Virtuell nichtflüchtiger Hauptspeicher

Wolfgang Schröder-Preikschat / Volkmar Sieh

12. Juli 2023

Gliederung

Einleitung

Grundlagen
- Datenkonsistenz
- Ausfalltoleranz
- Zugriffslatenz

Fallstudien
- Rauscharmes System
- Kaschierendes System
- Resilientes System

Zusammenfassung

Nichtflüchtiger (*non-volatile*) RAM

- Art von **Hauptspeicher**, der die gespeicherte Information auch nach Abschalten der Versorgungsspannung nicht verliert[1]
  - byteadressierbarer nichtflüchtiger Speicher (*non-volatile memory*, NVM)
  - anders als ein Halbleiterlaufwerk wie SSD, das blockorientiert arbeitet

Auslaufmodell DRAM, es kommt wohl „Kernspeicher“ zurück — [10]:

- Hochskalieren der Speicherkapazität auf DRAM-Basis kann sowohl hinsichtlich Leistung als auch Kosten unerschwinglich teuer sein
  - DRAM-Auffrischleistung skaliert proportional mit der Speicherkapazität
  - außerdem ist weiteres Herunterskalieren der Kondensatorgröße schwierig
- seine hohe Dichte, geringe Standby-Leistung und niedrige Kosten pro Bit machen NVM zur vielversprechenden Alternative zu DRAM
  - gleichwohl kann die Zugriffslatenz 3- bis 20-fach höher als bei DRAM sein
  - zudem niedrigere Bandbreite und asymmetrische Lese-/Schreibleistung

↪ Punkte, die einer Eignung als primärer Hauptspeicher noch widersprechen

[1] Nicht zu verwechseln mit ∗ROM (*read-only memory*).

Disruptive Hauptspeichertechnologie

- hinter „disruptive Technologie“ stehen „bahnbrechende Innovationen“

  [. . .] die zunächst nicht den Bedürfnissen der Mainstream-Kunden entsprechen und nur kleine oder aufstrebende Märkte ansprechen; solche, die zumindest am Anfang von Bestandskunden nicht geschätzt werden; technologische Veränderungen, die etablierten Unternehmen schaden. [2]
  [. . .] die etablierte Technologien obsolet machen und daher den Wert der Investitionen zerstören, die etablierte Unternehmen in diese Technologien getätigt haben. [3]

- für den technischen Bereich bedeutet „disruptiv“ (Duden):

  (ein Gleichgewicht, System o. Ä.) zerstörend

- bahnbrechend und zugleich zerstörend in Bezug auf Hauptspeicher
  - große Kapazität, geringe Bereitschaftsleistung, . . . , **persistent**
  - nicht abwärtskompatibel für Altsoftware, die „*NVM-only*“ laufen muss
    - sollte DRAM vollständig durch NVRAM ersetzt werden

Gliederung

Einleitung

Grundlagen
- Datenkonsistenz
- Ausfalltoleranz
- Zugriffslatenz

Fallstudien
- Rauscharmes System
- Kaschierendes System
- Resilientes System

Zusammenfassung

Intermittierend betriebene Geräte

Stromausfälle in Kombination mit NVM zum Schutz des Rechenzustands bewirken Kontrollflüsse, die einen sequentiellen Prozess unerwartet in einen nichtsequentiellen Prozess verwandeln können.

- ein Programm muss sich mit seinem eigenen Zustand aus früheren unterbrochenen Läufen auseinandersetzen [11]

```
1 typedef struct date {
2     unsigned char day;
3     unsigned char month;
4     unsigned short year;
5 } date_t;
```

```
6 extern date_t retire;
7
7 retire.day = 30;
8 retire.month = 9;
9 retire.year = 2023;
```

- angenommen, das Programm kommt direkt im NVRAM zur Ausführung
- weiter angenommen, im Zeilenbereich $[7, 9]$ kommt es zum Stromausfall[2]
  - was lässt sich dann zur **Konsistenz** der Variablen `retire` festhalten?
  - was wäre der Unterschied, sollte `retire` keine **persistente Variable** sein?

[2] . . . und der gcc macht daraus kein „`movl $132581662, retire`“ ☺

Prozesssynchrone Unterbrechungen

- sei auch folgender Kode für den „*NVM-only*“ Betrieb vorgesehen:

```
1  typedef struct chain {
2      struct chain *link;
3  } chain_t;

4  typedef struct queue {
5      chain_t  head;
6      chain_t *tail;
7  } queue_t; /* init: head = NULL; tail = &head */

8  void enqueue(queue_t *this, chain_t *item) {
9      item->link = 0;
10     this->tail->link = item;
11     this->tail = item;
12 }
```

?

- angenommen, im Zeilenbereich $[9, 11]$ wird der Prozess abgefangen (*trap*)
  - weil einer der Zeiger (`this`, `item`, `tail`) ungültig ist (*access violation*)
  - weil die betreffende Seite ausgelagert ist (*page fault*) — und der Faden, der `enqueue()` ausführt, von einem „befreundeten“ Faden terminiert wird

Unterbrochene, hypothetische Zukunft. . .

- eine instantane Aktualisierung logisch zusammenhängender, mehrere Speicherworte umfassender Daten ist nicht garantiert
  - potentiell inkonsistente Daten können die Folge sein
    - ein Datenanteil ist bereits persistent, der andere Datenanteil ist verloren
    - letzterer fiele in die hypothetische Zukunft, die aber nicht stattfand
  - solche Aktualisierungen müssten daher eine **Transaktion**[3] bilden
- die **Konsistenzprobleme** stammen von Verletzungen der erwarteten Atomizität und Ordnungseigenschaften
  - nichtsequentielle Programme beugen gemeinhin solchen Problemen vor
    - durch **Synchronisation** der kritischen gleichzeitigen Prozesse
  - für gewöhnliche sequentielle Programme war dies bisher unnötig
    - da der betreffende Prozess beim Abbruch im RAM „spurlos“ bleibt
- um auch **Altsoftware** (*legacy code*) gegen NVM zu wappnen, ist es erforderlich, Prozesse idempotent geschehen zu lassen
  - unter allen Umständen den flüchtigen Zustand noch sichern können. . .

[3] Hinterlässt den Datenbestand nach fehlerfreier und vollständiger Ausführung einer Aktualisierung in einem konsistenten Zustand.

Begrenzte Widerstandsfähigkeit

- bei plötzlichem **Stromausfall** noch in der Lage sein, Maßnahmen zu ergreifen, um mögliche Dateninkonsistenzen abzuwenden
  - den **Übergangszustand** (*transient state*) der CPU in den NVM sichern
    - das heißt, die in den Registern und dem Cache enthaltenen Daten
  - wobei die **Restenergie** aus der Systemstromversorgung verwendet wird
    - „*flush on fail*“ [8] im **Restenergiefenster** von Standardnetzteilen
- die Ausfallsicherung ist begrenzt in Raum und Zeit, nämlich durch die Registeranzahl, Cachegröße und Breite des Restenergiefensters
  - sei der Umfang des Übergangszustands klein genug für das Zeitfenster
  - dann ist sicherzustellen, dass die **Sicherungsprozedur** rechtzeitig startet
    - beim „*power failure trap*“ sofort: ein Trap kann nicht gesperrt werden ☺
    - beim „*power failure interrupt*“ (PFI) verzögert: **Unterbrechungssperre** ☹
- Stand heutiger Technik bei den Prozessoren ist der PFI, angefordert durch eine **unterbrechungsfreie Stromversorgung** (USV)
  - für die Sicherung gilt: **Auslösezeit** + **WCET**[4] < **harter Termin**

↪ keine Maßnahme im Betriebssystem darf diese Bedingung verletzen!

[4] *worst case execution time*

Restenergiefenster

- Spezifikationen für die durch eine Stromversorgungseinheit mögliche „Fensterbreite“ (in Zeit) sind ausstattungsabhängig:
  - 10–400ms: Reserve bei Standardnetzteilen eines PC [8]
  - 25–30s: Reserve einer USV mit Schwungrad (*flywheel*, [1])
  - 30s–12min: Anlaufzeit eines Diesel-Notstromaggregats
  - Überbrückungszeit für batteriebasierte Ausfallprävention
- kann der Übergangszustand der CPU mit der bei Standardnetzteilen verfügbaren Reserve gesichert werden, ist das System sicher
  - die **Sicherungsprozedur** wird in endlicher Zeit durchlaufen können
    - Größe und Anzahl der zu sichernden Prozessorregister ist begrenzt
    - Größe und Anzahl der zu sichernden Cachezeilen ist begrenzt

    ↪ die **maximale Ausführungszeit** (WCET) ist bestimmbar: **statische Analyse**
  - kritisch ist ihre Auslösezeit und dass der PFI rechtzeitig behandelt wird
    - betrifft die **Unterbrechungspriorität** des PFI und **Unterbrechungssperren**
    - beides bestimmt die **Latenz**, die Verzögerungszeit der Zustandssicherung

    ↪ erstere muss die höchste Stufe sein, die WCET letzterer muss bekannt sein
- es ist sicherzustellen, dass Unterbrechungssperren im Betriebssystem die Sicherung des Übergangszustands der CPU nicht verhindern

Unterbrechungssperren

- Maßnahme, durch die ein **kritischer Abschnitt** vor Überlappung mit einer **Unterbrechungsbehandlungsroutine** bewahrt wird
  - obwohl nur CPU-lokal signifikant, auch für **Umlaufsperren** relevant
  - beispielsweise CFS (*completely fair scheduling*, `fair.c`) in Linux:

```
...
double_lock_irq()
    ↦ spin_lock_irq()
        ↦ ...
            ↦ local_irq_disable()
```

Solche Abschnitte sind zu lokalisieren, ihre jeweilige WCET ist zu bestimmen und gegebenenfalls ist der Kode umzustellen!

  - charakteristisches Muster, um möglichen Verklemmungen vorzubeugen
    - wenn die Unterbrechungsbehandlung dieselben Anweisungen ausführen muss
    - wegen präemptivem Prozessscheduling und blockierender Synchronisation
  - ein nichtblockierend synchronisiertes Betriebssystem ist unbehaftet damit
- eine sehr ähnliche Problematik zeigt sich im Zusammenhang mit dem Scheduling virtueller Maschinen: „*lock holder preemption*“ [13]
  - obgleich Sperren eines IRQ hier für gewöhnlich nicht die erste Wahl ist. . .

Wiederanlauf nach Stromausfall I

backup

- ein unterbrochener Prozess nimmt seinen Ablauf an der Stelle wieder auf, an der er aussetzen musste und den Prozessor abgab
  - das geschieht weitestgehend analog zum gewöhnlichen **Prozesswechsel**
    - den Prozess wiederaufnehmen (*resume*), wie es auch normalerweise geschieht
  - jedoch wechselt ein Prozess mit allem in die „Ohnmacht“ (*blackout*)
    - aus der er beim Neuanlauf (*restart*) des Systems wieder erwachen wird
- sei die letzte Maßnahme der Sicherungsprozedur, den Prozessorstatus des beim Stromausfall laufenden Prozesses in den NVM zu schreiben

```
1  goodbye:
2      movl    4(%esp), %eax
3      movl    %edi, 0(%eax)
4      movl    %esi, 4(%eax)
5      movl    %ebp, 8(%eax)
6      movl    %esp, 12(%eax)
7      movl    %ebx, 16(%eax)
8      movl    $welcome, 20(%eax)
9      hlt
```

  - der Prozess sichert seinen Zustand (3–7)
    - **nichtflüchtige Register** der CPU puffern
    - der Puffer liegt im NVRAM
    - die Pufferadresse ist aktueller Parameter
  - er hinterlässt seine Fortsetzungsadresse (8)
    - `welcome`, ebenfalls im NVRAM gepuffert
  - abschließend stoppt er seinen Prozessor (9) — fällt in „Ohnmacht“...

↪ **der Prozess muss innerhalb des Restenergiefensters `hlt` erreichen**

Wiederanlauf nach Stromausfall II

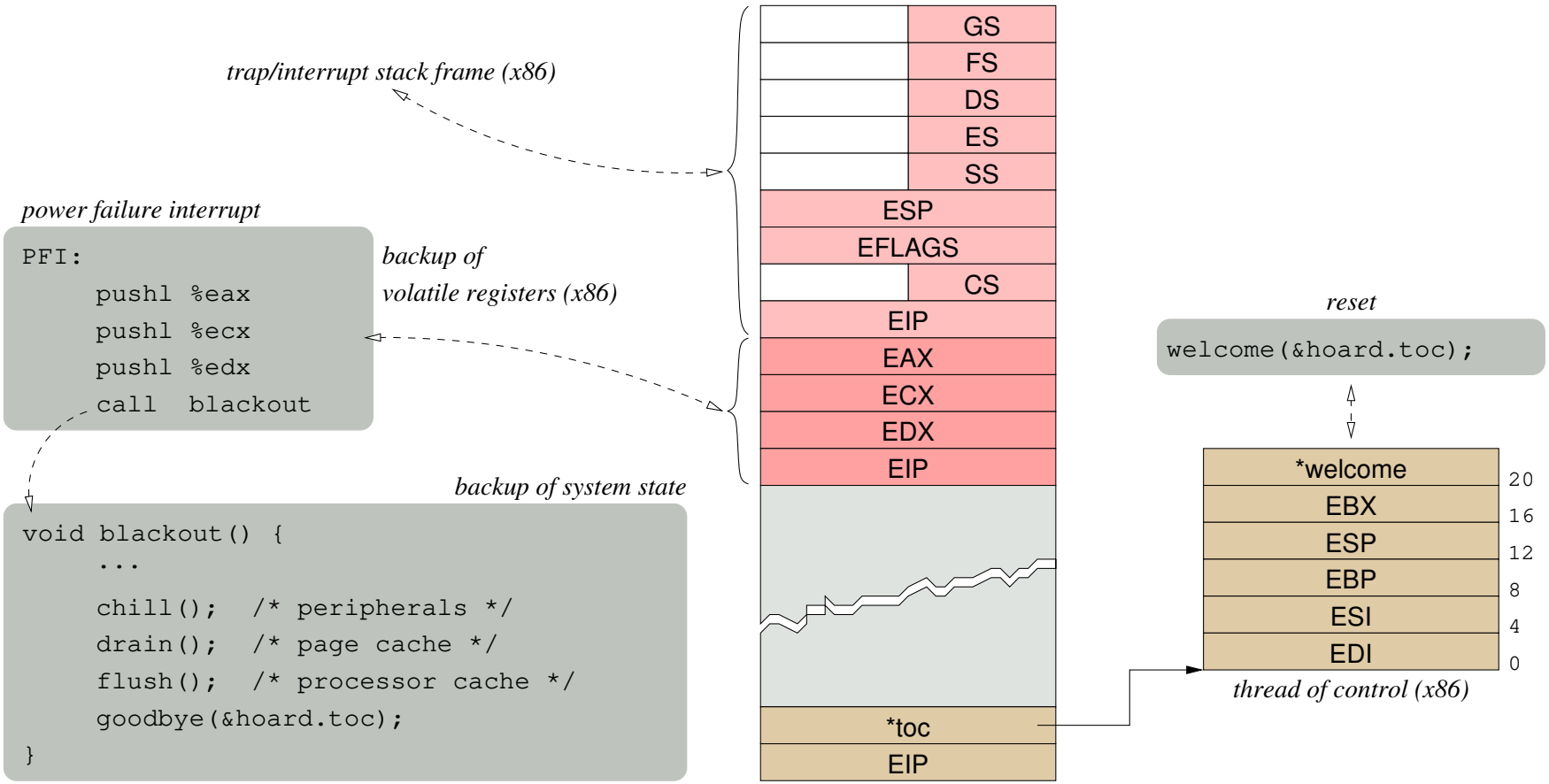
- der Neuanlauf des Systems beginnt in gewöhnlicher **Grundstellung** (*reset*) des Prozessors, mit fester **Einsprungadresse** (*reset vector*)
  - das dort befindliche Programm initialisiert das System, fährt es hoch
  - zusätzlich prüft es auf etwaige **Hinterlassenschaft** eines früheren Laufs
    - beispielsweise die Adresse des Sicherungspuffers der Sicherungsprozedur
    - die Zeigervariable dafür liegt selbst im NVM, wird nach Prüfung gelöscht
- im Falle eines vorangegangenen Stromausfalls werden, soweit nötig, Wiederherstellungsmaßnahmen für das System getroffen
  - zuletzt auch die **Wiederaufnahme** des vorher unterbrochenen Prozesses
    - an der im Sicherungspuffer hinterlassenen **Fortsetzungsadresse**
  - das heißt, `welcome` anspringen und den Prozess wieder in Gang setzen

```
1  welcome:
2      movl    4(%esp), %eax
3      movl    0(%eax), %edi
4      movl    4(%eax), %esi
5      movl    8(%eax), %ebp
6      movl    16(%eax), %ebx
7      movl    12(%eax), %esp
8      ret
```

  - den Prozesszustand übernehmen (3–6)
    - **nichtflüchtige Register** der CPU definieren
    - die Werte dem Sicherungspuffer entnehmen
    - die Pufferadresse ist aktueller Parameter
  - den Laufzeitstapel umschalten (7) und zum Prozess zurückkehren (8)

↪ **der Prozess setzt genau dort fort, wo er sich verabschiedet hatte**

Hinterlassenschaft beim Stromausfall



- Ausschnitt des Prozessorstatus' (x86) nach Verabschiedung des durch den Stromausfall unterbrochenen Prozesses
  - der Übergangszustand des Systems wurde in NVRAM persistent gemacht

NVRAM mittels DRAM

- der Fall **„*NVM-only*“** soll bedeuten, dass die Maschinenprogramme und das Betriebssystem im NVRAM liegend ausgeführt werden
  - PFI-basierte Konsistenzwahrung kaschiert die Untiefen von NVM
  - lediglich die Sicherungsprozedur ist transaktional zu programmieren
- die damit erreichbare vollständige **Persistenz** aller Programme geht jedoch auf Kosten der **Performanz** der entsprechenden Prozesse
  - die Zugriffslatenz kann 3- bis 20-fach höher sein als bei DRAM
  - nur mit **Resilienz** als Maß aller Dinge könnte dies tolerierbar sein
- der Ansatz ist nun, den NVRAM zu virtualisieren und durch DRAM als schnelleren Zwischenspeicher die Zufgriffslatenz zu verkürzen
  - ein DRAM-basierter **Seitenpuffer** (*page cache*) für den NVRAM
  - wobei gepufferte Seiten den zu sichernden **Übergangszustand** erweitern
- darüber hinaus ist durch diesen Ansatz eine effiziente Skalierung der Speicherkapazität auf Betriebssystemebene möglich [7]
  - virtueller Speicher ergänzt um NVRAM als schnellen Hintergrundspeicher
  - Hochskalieren von Hauptspeicherkapazität ohne zusätzlichen DRAM

Seitenpuffer für den NVRAM

- die im DRAM gepufferten Seiten erweitern den Übergangszustand der Maschinenprogrammprozesse
  - nicht echt, aber echt erscheinend sind die Seiten im DRAM persistent
  - in Wirklichkeit sind diese während ihrer Lagerung im DRAM flüchtig

  ↪ **Konsistenz** der im DRAM gepufferten modifizierten Seiten des NVRAM
- die Größe dieses Puffers ist durch die Breite des Restenergiefensters bestimmt, nicht durch die Menge an DRAM im System
  - Analyse der Breite des verbleibenden Energiefensters beim Stromausfall
  - Analyse der Größe des zu sichernden volatilen Prozessorzustands
  - Analyse der Dauer der Sicherung eines Datums in den NVRAM

  ↪ kleinste Fensterbreite, größter Zustand und längste Sicherungsdauer
- letztlich ist der Puffer begrenzt durch die **Zeit**, die beim Stromausfall noch verfügbar ist, um Seiten in den NVRAM zurückzuschreiben
  - das Betriebssystem sollte Termine **strikt** einhalten, **echtzeitfähig** sein

  strikt
  - Terminüberschreitung kann zum Systemversagen führen
  - das Systemversagen kann eine „Katastrophe“ hervorufen

  ↪ **eine Terminverletzung der Sicherungsprozedur ist nicht tolerierbar**

Moment der Konsistenzwahrung

vgl. [12, S. 21]

- Konsistenz einer Seite im DRAM mit ihrem Original im NVRAM ist sicherzustellen, wann immer sie aus den Puffer entfernt wird:
  - implizit
    - als Folge der **Ersetzungsstrategie** (*replacement policy*)
      - wenn die Seite wegen Überbelegung verdrängt werden soll
    - beim **Stromausfall** oder einer anderen **Ausnahmesituation**
  - explizit
    - auf Veranlassung des Prozesses selbst, einer **Freigabeoperation**
      - auf der Seite liegen Daten, die zu kommunizieren sind
      - auf der Seite liegen gemeinsame Daten, die zu synchronisieren sind
    - das heißt, wenn **kooperierende Prozesse** dieselbe Seite nutzen
  - jede **modifizierte Seite** muss in den NVRAM „ausgespült“ werden
- die **Zeitdauer** der Maßnahmen zur Sicherung des Übergangszustands des Systems ist bekannt, nicht jedoch der **Zeitpunkt**
  - erstere ist das Resultat einer (statischen/dynamischen) **Systemanalyse**
  - letzterer ist bedingt durch dynamisches **Systemverhalten**
    - ein Stromausfall ist ein seltenes Ereignis, dessen Eintritt unberechenbar ist
    - die Seitenersetzung ist ein Ereignis, das die Prozesse unbewusst hervorrufen
    - ↪ indem sich die **Arbeitsmenge** (*working set* [4, S. 326]) eines Prozesses ändert

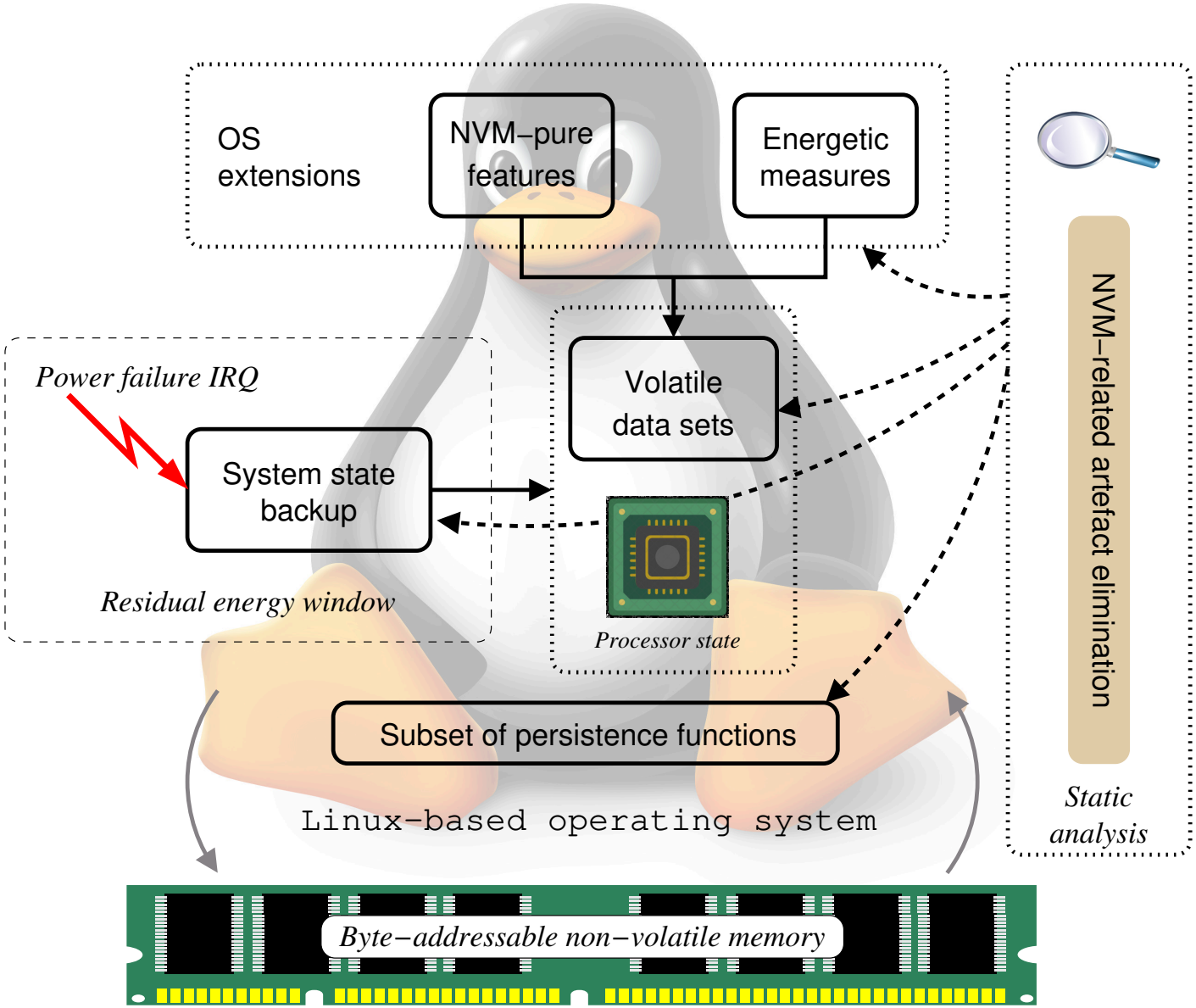
Gliederung

Einleitung

Grundlagen
- Datenkonsistenz
- Ausfalltoleranz
- Zugriffslatenz

Fallstudien
- Rauscharmes System
- Kaschierendes System
- Resilientes System

Zusammenfassung


OS extensions
NVM–pure features
Energetic measures
NVM–related artefact elimination
Power failure IRQ
Volatile data sets
System state backup
Residual energy window
Processor state
Subset of persistence functions
Linux–based operating system
Static analysis
Byte–addressable non–volatile memory

NEON

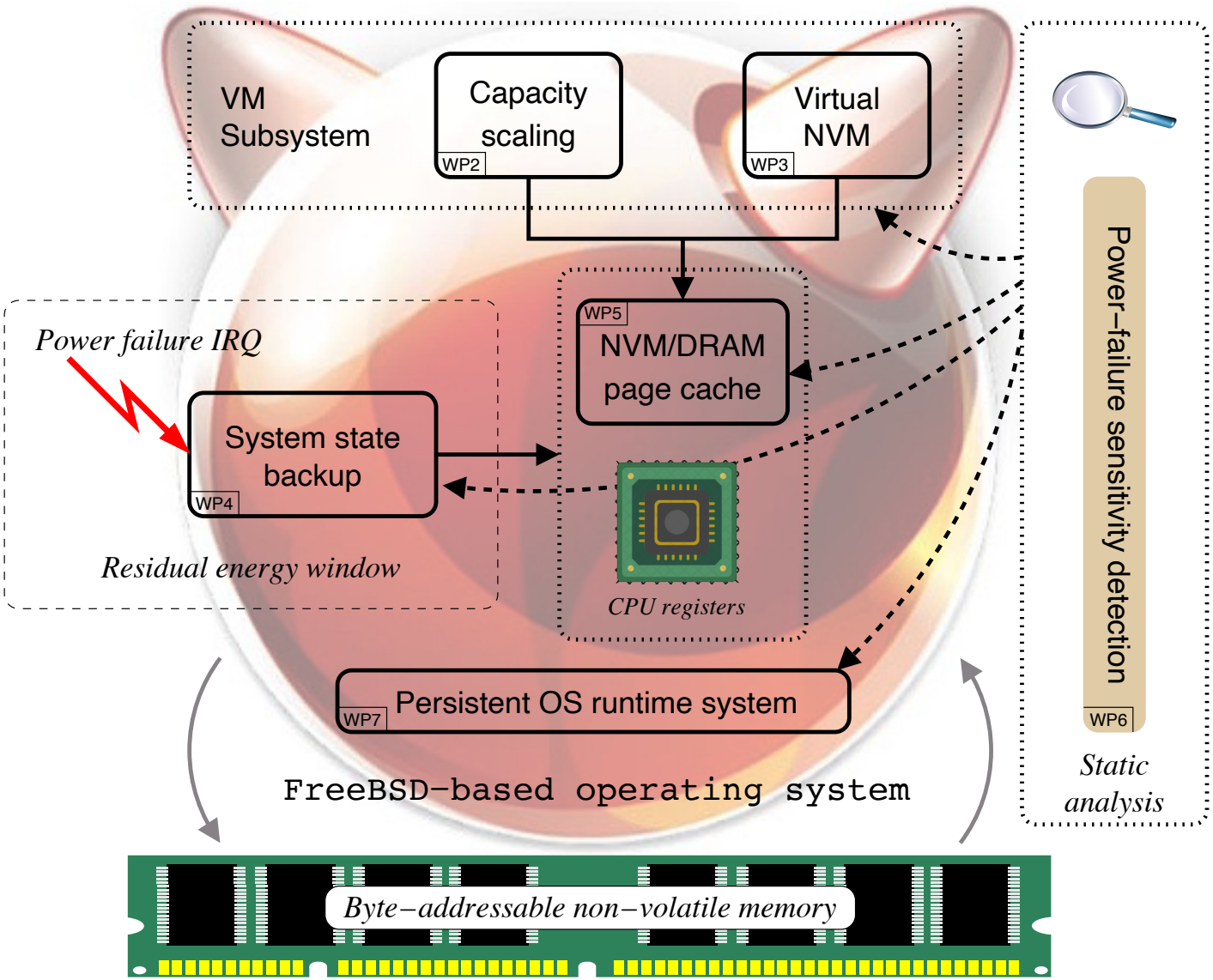
(gr.) „das Neue“

Ein Betriebssystem, das NVM insbesondere auch für eigene Zwecke nutzt, kann auf viele, wenn nicht sämtliche, für gewöhnlich sonst zu realisierende Persistenzmaßnahmen verzichten und dadurch sein Maß an Hintergrundrauschen (background noise) verringern. [6]

- nichtfunktionale Eigenschaften von Rechensystemen verbessern:
  - BO
    - energetische Maßnahmen
      - ↪ Energieffizienzsteigerungen durch „Sekundenschlaf“ mit NVM
      - ↪ dynamische Maßnahmen für Energieeinsparungen zur Laufzeit
      - ↪ Energie betreffende Speicherzugriffskosten
  - ER
    - fixpunktorientierte Quelltextaufbereitung
      - ↪ Beseitigung der persistenzbezogenen Betriebssystemartefakte
      - ↪ Beseitigung/Begrenzung von Unterbrechungslatenzen
      - ↪ Rekonstruktion sensitiver Betriebssystemstrukturen
  - BO/ER
    - hardware-orientierte Betriebssystempersistenz
      - ↪ Fixpunktmechanismus zur Tolerierung von Stromausfall
      - ↪ Universalbetriebssystem *in situ* NVM
      - ↪ transaktionale nichtblockierende Betriebssystemstrukturen

PAVE

Power-fail aware byte-addressable virtual non-volatile memory [9]

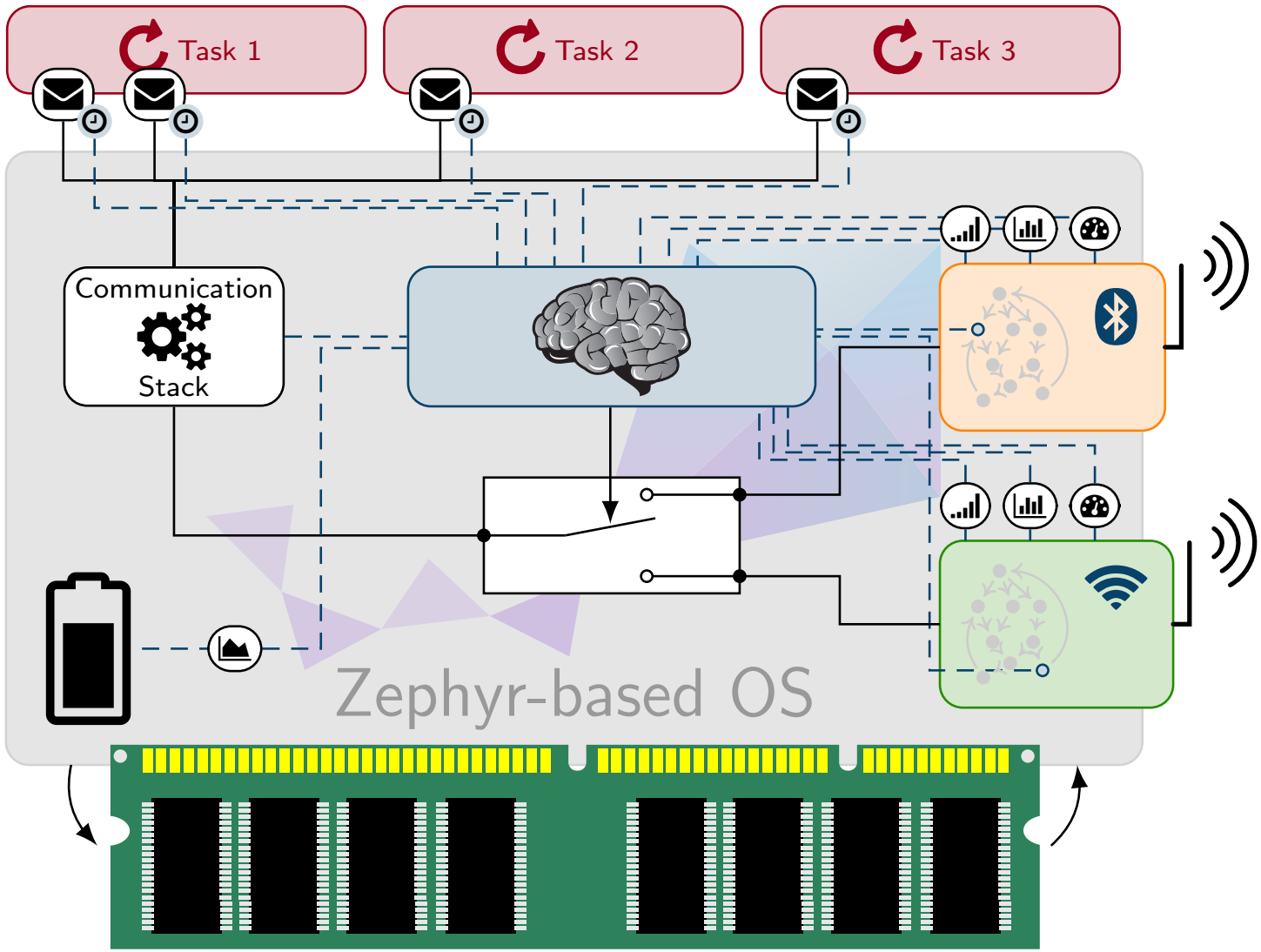


PAVE

Ein Betriebssystem, das NVM als integralen Bestandteil des virtuellen Speichers behandelt, ermöglicht die kosteneffiziente Skalierung der Hauptspeicherkapazität, kompensiert die höheren Zugriffszeiten im Vergleich zu herkömmlichen Hauptspeicher und verhindert implizit in Ausnahmefällen potentielle persistente inkonsistente Zustände. [9]

- Altsoftware unverändert und effizient in NVM ausführen können:
  - CB
    - NVRAM-basierte Skalierung der Hauptspeicherkapazität
    - betriebssystemtaugliches persistentes Laufzeitsystem
  - ER
    - reaktive Sicherung des flüchtigen Systemzustands
    - Empfindlichkeitserkennung von Software betreffs Stromausfall
  - CB/ER
    - virtueller nichtflüchtiger Hauptspeicher
    - zum Restenergiefenster konforme Seitenpufferverwaltung

ResPECT *Resilient power-constrained embedded communication terminals* [5]



Transactional Persistence in **N**on-**V**olatile **M**emory

ResPECT

Ein Betriebs- und Kommunikationssystem, das byteadressierbaren NVM als primären Hauptspeicher begreift und dem Paradigma der transaktionalen Programmierung folgt, macht diese Verbindung zum robusten Bestandteil einer Software, wie sie für „Resilienz in vernetzten Welten“ erforderlich ist. [5]

- Ausfälle, Überlastung, Angriffe und das Unerwartete meistern:

SB
- transaktionale Netzwerke
- NVM-basierte Kommunikationsprotokollstapel
- Transportresilienz, „*multi-homing*“[5] und „*multi-sourcing*“[6]

ER
- reaktive Sicherung des flüchtigen Systemzustands
- NVM-basierter scheinbar nichtflüchtiger Haldenspeicher
- zeit- und energiebewusste Operationen des Betriebssystemkerns

[5] Ein Gerät verfügt über mehrere Netzwerkadressen.
[6] Netzbetrieb und -infrastruktur leisten mehrere Anbieter.

Gliederung

Einleitung

Grundlagen
- Datenkonsistenz
- Ausfalltoleranz
- Zugriffslatenz

Fallstudien
- Rauscharmes System
- Kaschierendes System
- Resilientes System

Zusammenfassung

Resümee

- **NVRAM** — Hauptspeicher, der die gespeicherte Information auch nach Abschalten der Versorgungsspannung nicht verliert
  - byteadressierbarer nichtflüchtiger Speicher (*non-volatile memory*, NVM)
  - Ersatz von oder Ergänzung zu DRAM, aber auch **disruptive Technologie**
- **Stromausfälle** können dann Abläufe bewirken, die einen sequentiellen Prozess wie einen nichtsequentiellen Prozess erscheinen lassen
  - nämlich wenn das Programm direkt im NVRAM zur Ausführung kommt
  - unerwartet inkonsistente nichtflüchtig gespeicherte Daten sind möglich
- in dem jeweils gegebenen **Restenergiefenster** der Stromversorgung den **Übergangszustand** der CPU in den NVM sichern
  - ausgelöst durch einen „*power failure interrupt*“ (PFI)
  - wobei keine **Unterbrechungssperre** diese Maßnahme verhindern darf
- DRAM würde nur benötigt, um die bei NVRAM noch vorhandenen höheren **Zugriffszeiten/Latenzen** zu kaschieren
  - Skalierung der Hauptspeicherkapazität durch Virtualisierung des NVRAM
  - DRAM-basierter Seitenpuffer für NVRAM $\rightsquigarrow$ Übergangszustand des BS

Literaturverzeichnis I

[1] Active Power, Inc.:
15 Seconds versus 15 Minutes: Designing for High Availability.
2007 (107). –
White Paper

[2] Bower, J. L. ; Christensen, C. M.:
Distruptive Technologies: Catching the Wave.
In: *Harvard Business Review* 73 (1995), Jan.-Febr., Nr. 1, S. 43–53

[3] Danneels, E. :
Disruptive Technology Reconsidered: A Critique and Research Agenda.
In: *The Journal of Product Innovation Management* 21 (2004), Jul., Nr. 4, S. 246–258

[4] Denning, P. J.:
The Working Set Model for Program Behavior.
In: *Communications of the ACM* 11 (1968), Mai, Nr. 5, S. 323–333

[5] Herfet, T. ; Schröder-Preikschat, W. :
Resilient Power-Constrained Embedded Communication Terminals (ResPECT) / Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).
2022 (*TBA* (HE 2584/7 and SCHR 603/19)). –
Research Grant within Priority Programme 2378

Literaturverzeichnis II

[6] Hönig, T. ; Schröder-Preikschat, W. :
Nichtflüchtigkeit in energiebewussten Betriebssystemen (NEON) / Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).
2021 (465958100 (HO 6277/1 and SCHR 603/16)). – Einzelförderung

[7] Kannan, S. ; Gavrilovska, A. ; Schwan, K. :
pVM: Persistent Virtual Memory for Efficient Capacity Scaling and Object Storage.
In: *Proceedings of the Eleventh European Conference on Computer Systems*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2016 (EuroSys '16). – ISBN 9781450342407, S. 13:1–13:16

[8] Narayanan, D. ; Hodson, O. :
Whole-system persistence.
In: *Proceedings of the seventeenth international conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS'12)*, 2012, S. 401–410

[9] Nolte, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Power-Fail Aware Byte-Addressable Virtual Non-Volatile Memory (PAVE) / Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).
2022 (501993201 (NO 625/15 and SCHR 603/18)). – Research Grant within Priority Programme 2377

Literaturverzeichnis III

[10] Peng, I. B. ; Gokhale, M. B. ; Green, E. W.:
System Evaluation of the Intel Optane Byte-Addressable NVM.
In: *Proceedings of the International Symposium on Memory Systems*.
New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2019 (MEMSYS '19). –
ISBN 9781450372060, S. 304–315

[11] Ransford, B. ; Lucia, B. :
Nonvolatile Memory is a Broken Time Machine.
In: *Proceedings of the Workshop on Memory Systems Performance and Correctness*.
New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2014 (MSPC '14). –
ISBN 9781450329170, S. 5:1–5:3

[12] Schröder-Preikschat, W. :
Virtuell gemeinsamer Speicher.
In: Lehrstuhl Informatik 4 (Hrsg.): *Betriebssystemtechnik — Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz*.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2022 (Vorlesungsfolien), Kapitel 11

Literaturverzeichnis IV

[13] Uhlig, V. ; LeVasseur, J. ; Skoglund, E. ; Dannowski, U. :
Towards Scalable Multiprocessor Virtual Machines.
In: *Proceedings of the 3rd Conference on Virtual Machine Research And Technology Symposium*.
USA : USENIX Association, 2004 (VM'04), S. 4:1–4:14