

DRAM Speicherfehler im Betriebssystem Problem und Gegenmaßnahmen

Vortrag im Rahmen des Masterseminars „Fehlertolerante Systeme“

Robert de Temple

Erlangen, 11.11.2014



Inhalte



Motivation

Ein PC heute



© Intel

- 4 Kerne + GPU
- ~ 2 Mrd. Transistoren



© Samsung

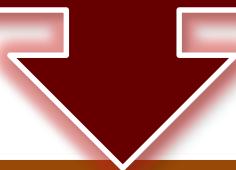
- 16 GiB
- > 17,2 Mrd. Transistoren
+ 17,2 Mrd. Kondensatoren

Motivation

- Speicherfehler gehören zu den drei häufigsten Fehlern in modernen Rechensystemen
- Speicherfehler haben eine besonders hohe Chance für SDC (silent data corruption)
- Das Betriebssystem ist besonders anfällig
 - ▶ hier oft Systemversagen

Speicherfehler

Heute + in Zukunft



Gegenmaßnahmen

Stand der Technik



Neue Ansätze

Software + Hardware

Speicherfehler

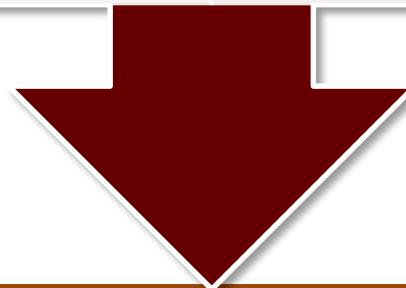
Heute + in Zukunft

Heute

- DRAM -

Zukunft

- PCM-RAM -



Gegenmaßnahmen



Neue Ansätze

DRAM – Einführung

Ladung = Information

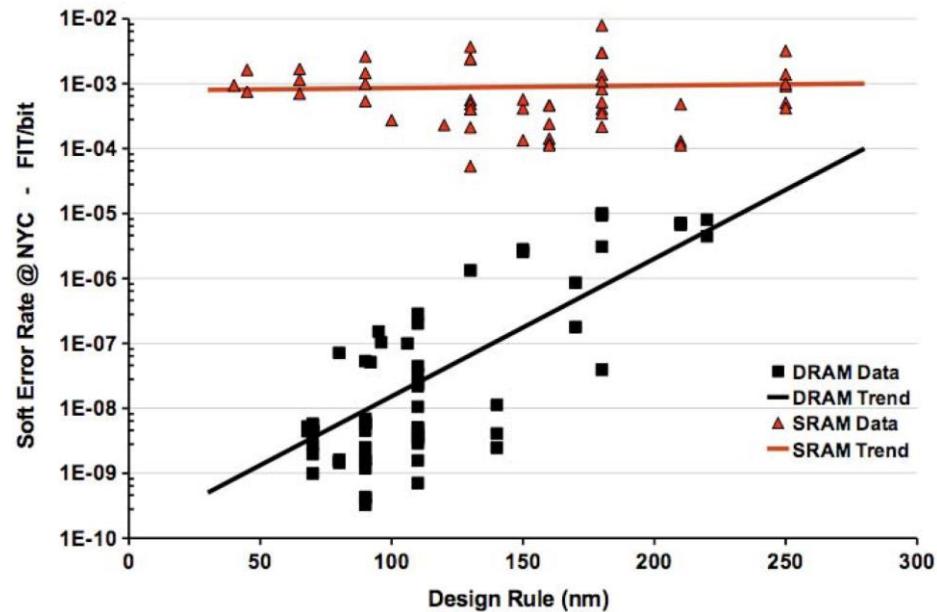
(Ziegler et al. 1979)

Fehlerquellen

- Alphastrahlung
- Neutronenstrahlung

Fehlermodell

- Transiente Fehler



Slayman et al., CSME 11'

„Soft errors in modern memory technology“

- FIT/Bit nimmt mit Fertigungsgröße ab
- Wahrscheinlichkeit für Multi-Bit-Fehler nimmt dabei zu
- FIT/Chip nimmt mit Fertigungsgröße auch ab

DRAM – Einführung

Gründe

- Kapazität des Kondensators skaliert kaum
 - ▶ Q_{krit} fast konstant geblieben
- Kondensatoren immer tiefer, dabei dichter gepackt
- Steuerungselektronik ist kleiner, dichter



© weSRCH.com



DRAM – Schroeder et al.

Schroeder et al. (2009)
University of Toronto

- Untersuchung von Speicherfehlern in Großrechnern (BlueGene, Google-Server, SciNet)

Ergebnisse

- Ø 8% aller RAM-Riegel / Jahr von Fehlern betroffen
- 60 – 80% eindeutig permanente Defekte
- Meist komplexes, sporadisches Verhalten
 - ▶ schwer zu reproduzieren
- Fehler ungleichmäßig im Speicher verteilt
 - ▶ Vom BS genutzter Speicher besonders häufig betroffen

DRAM – Nightingale et al.

Nightingale et al. (2011) Microsoft Research

- Windows Costumer Experience Improvement Program (**CEIP**)
► Ergebnisse für Consumer PCs
- Beobachtungszeitraum 8 Monate (Jahr 2008)
- Ca. 950.000 PCs
- CPU, RAM und HDD-Fehler



DRAM – Microsoft Research

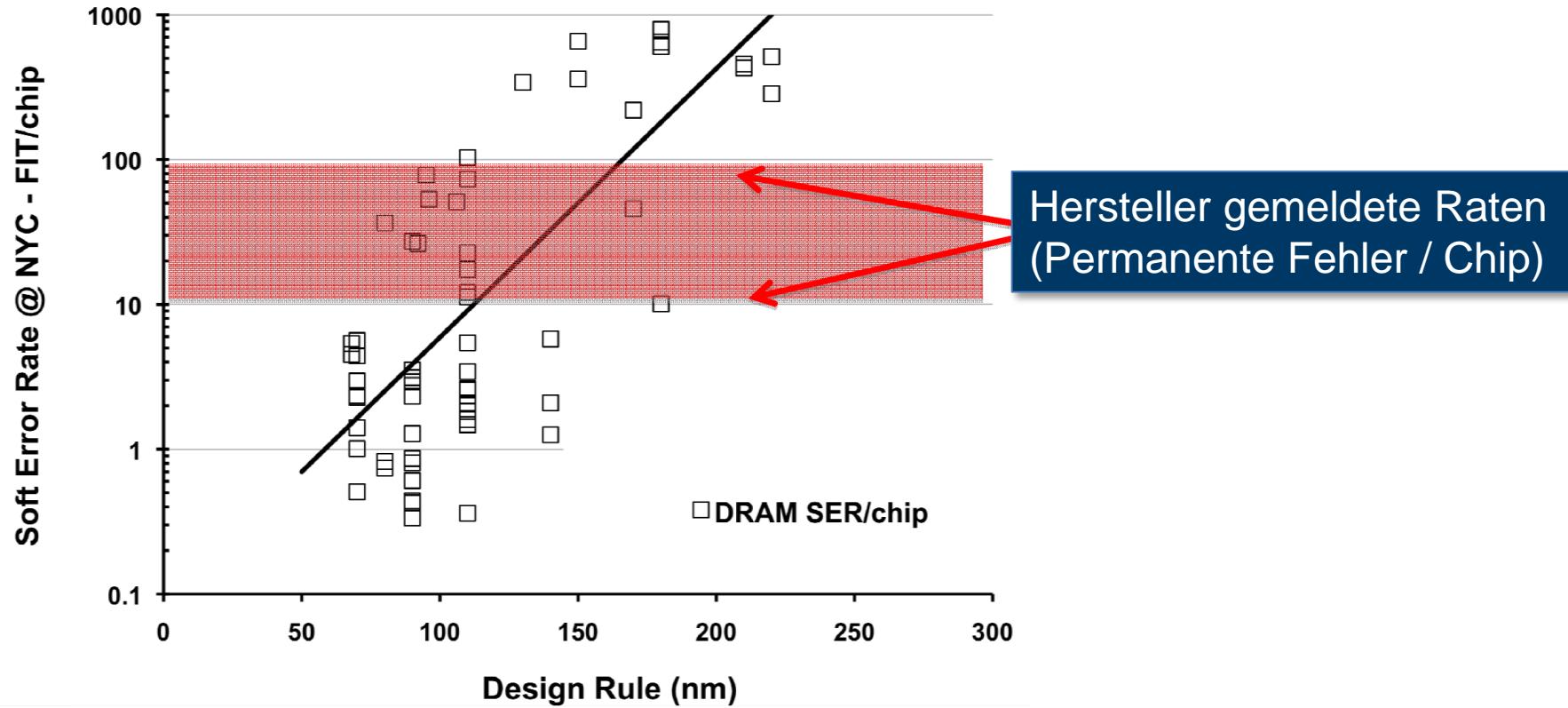
Einschränkungen

- Ausschließlich 30 MB Kernel Abbild des Betriebssystems (~1,5% des Ø-Speichers) ► hier Systemabsturz
- Ausschließlich 1-Bit Fehler

Ergebnisse

- Ergebnisse von Schroeder für „normale“ PCs größtenteils bestätigt
- Fehlerraten wieder viel höher als erwartet
- Ca. 15% - 19% aller Fehler traten wiederholt auf
► davon 79% an der exakt gleichen Speicherstelle
- **Außerdem:** Speicherfehler nicht unabhängig von CPU-Fehlern

DRAM – Industriekennzahlen



Slayman et al., CSME 11'
„Soft errors in modern memory technology“

Speicherfehler

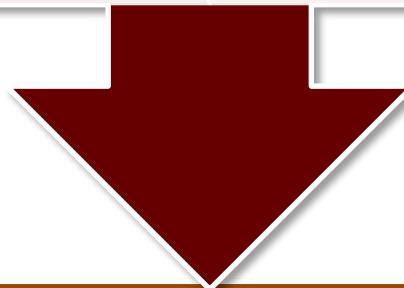
Heute + in Zukunft

Heute

- DRAM -

Zukunft

- PCM-RAM -



Gegenmaßnahmen



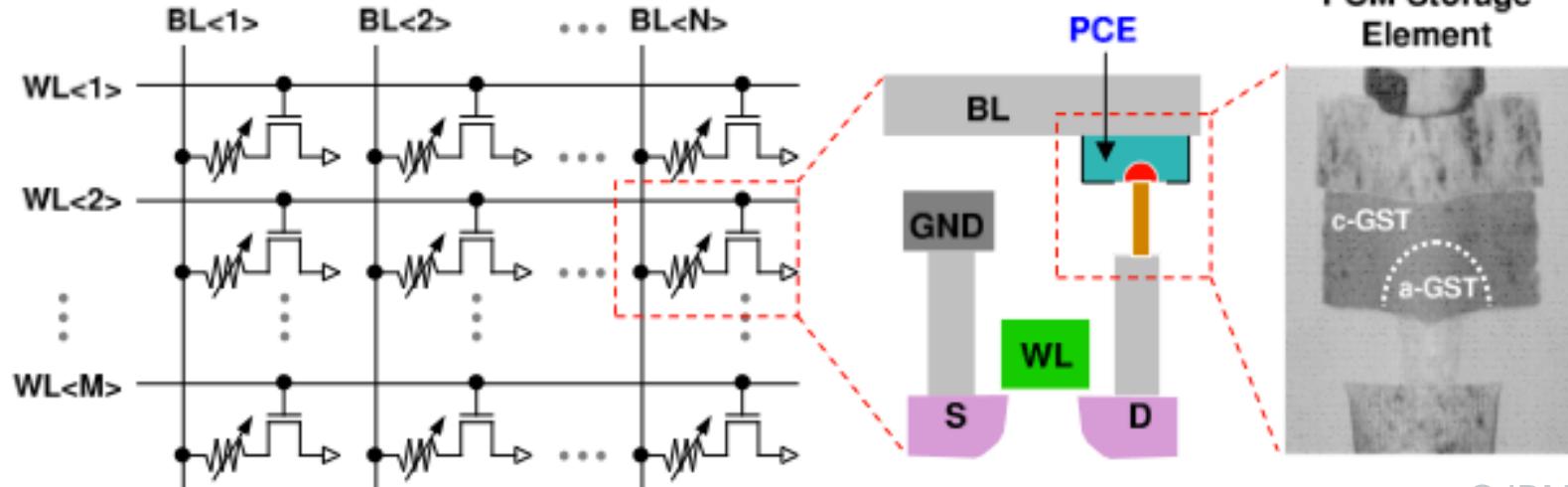
Neue Ansätze

PCM-RAM – Einführung

PCM = Phase Change Memory

- Aktuell bester Kandidat DRAM und Flash langfristig zu ersetzen
- Veränderung der kristallinen Struktur im Speicher durch Erhitzung/Abkühlung ► Widerstandsänderung des Material

Widerstand = Information



© IBM

PCM-RAM – Überblick

Vorteile

- Skaliert gut bei < 20nm
- Nicht flüchtig
- Geringer Energieverbrauch
- Hohe Lesegeschwindigkeit
- Sehr hohes Q_{krit} ► Fehler durch Strahlung fast ausgeschlossen

Nachteile

- Begrenzte Schreibgeschwindigkeit
- Begrenzte Anzahl von Schreibzyklen (momentan $\sim 10^8$ Zyklen)
► danach bleibt das letzte Bit „stecken“

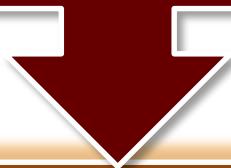
Zwischenstand

1. Fehlerhäufigkeit „in the field“ ist hoch
2. Es dominieren permanente Fehler
3. Fehler im Adressbereich des Betriebssystems häufig
4. Neue Technik wie PCM erzeugt fast ausschließlich permanente Fehler

Was kann man tun? ...

Speicherfehler

Heute + in Zukunft



Gegenmaßnahmen

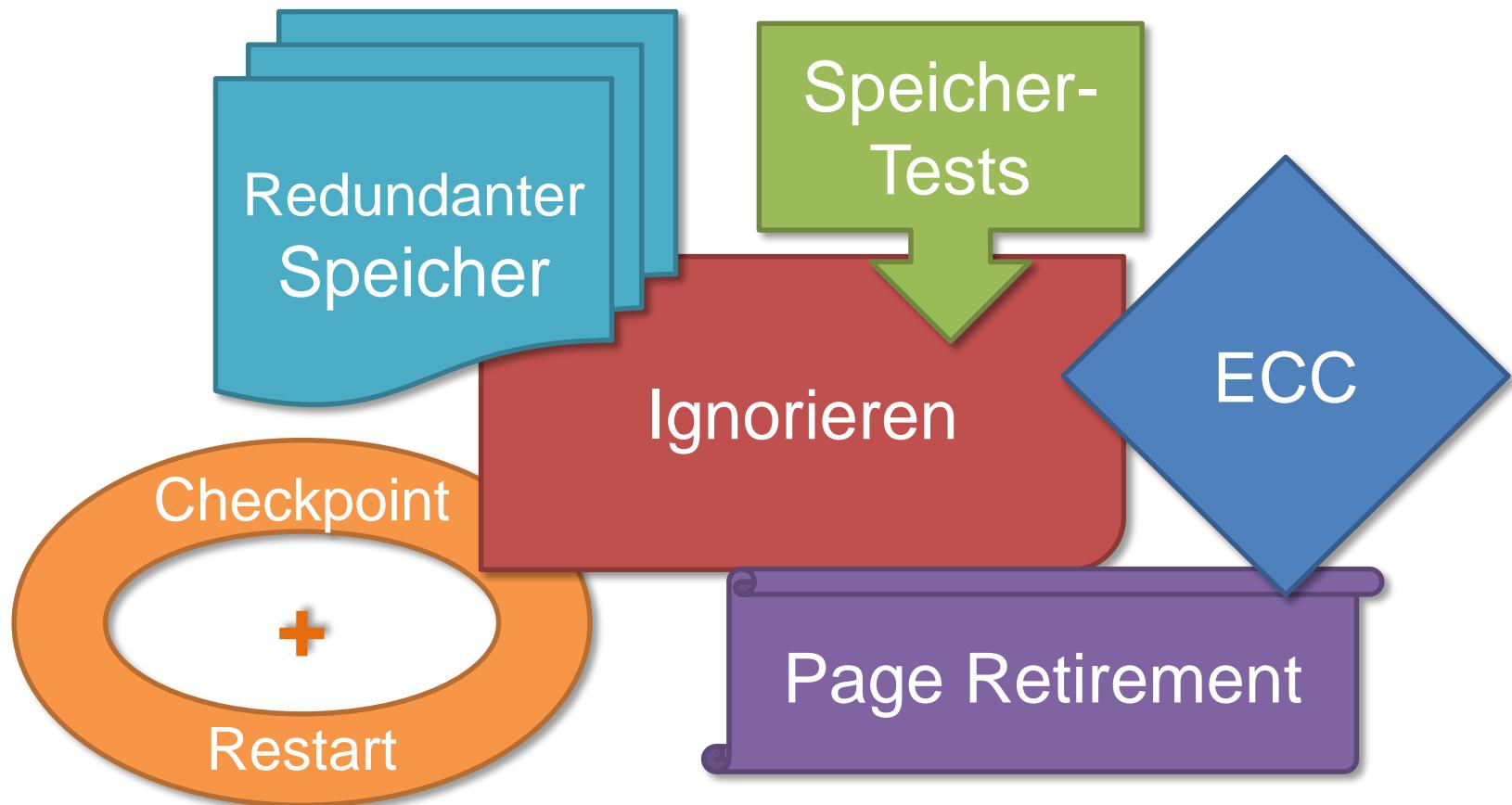
Stand der Technik



Neue Ansätze

Software + Hardware

Gegenmaßnahmen – Überblick



Speicherfehler



Gegenmaßnahmen

Stand der Technik

Betriebssystem

- Speichertest -

Hardware

- ECC -



Neue Ansätze

Stand der Technik – Speichertests

Speichertests

- RAM wird durch Tool mit Bitmustern beschrieben...
- ... danach ausgelesen
- Bekanntester Vertreter: **Memtest86+**

Vorteile...

- Test des gesamten Speichers
- Gut darin permanente/sporadische Fehler zu entdecken

Memtest86+ v4.00										
WallTime		Cached	RsvdMem	MemMap	Cache	ECC	Test	Pass	Errors	ECC Errs
Tst	Pass	Failing Address		Good	Bad	Err-Bits	Count	Chan		
2	0	0004a1393e0	-	1185.2MB	00000000	00000400	00000400		1	
4	0	0004a1393f0	-	1185.2MB	45a2d44d	45a2d04d	00000400		2	
6	0	0004a1393e0	-	1185.2MB	01000000	01000400	00000400		23	
6	0	0004a1393f0	-	1185.2MB	00000400	00000000	00000400		24	
6	0	0004a1393e0	-	1185.2MB	00000100	00000500	00000400		26	
7	0	0004a1393f0	-	1185.2MB	76d15652	76d15252	00000400		29	
7	0	0004a1393e0	-	1185.2MB	e32b9b2e	e32b9f2e	00000400		31	
7	0	0004a1393f0	-	1185.2MB	d1e9dc46	d1e9db46	00000400		33	

CC Wikimedia.org

...Aber

- System während Test blockiert
- Nicht alle permanenten/sporadischen Fehler sicher erkennbar
- Transiente Fehler prinzipiell nicht abgedeckt

Stand der Technik – ECC

ECC = Error-Correcting Code

- Nutzung von Informationsredundanz
 - ▶ zusätzliche ECC-Bits zur Erkennung und Korrektur von Fehlern
- Häufig: **DEDSEC** = Double Error Detection Single Error Correction
- Im Wachstum: Erweitertes **ECC** (*Chipkill, enhanced ECC, ...*)

Vorteile

- Oft einfach / flexibel einsetzbar
- Schutz transparent während des Betriebs
- Wichtiges Tool für erweiterte Maßnahmen



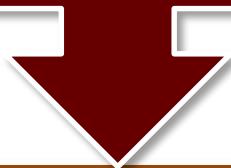
© Samsung

Nachteile

- Spezielle Hardware nötig
- Zusätzlicher Overhead
- Sehr gut für transiente Fehler, schlechter für permanente Fehler

Speicherfehler

Heute + in Zukunft



Gegenmaßnahmen

Stand der Technik



Neue Ansätze

Software + Hardware

Speicherfehler

Gegenmaßnahmen

Neue Ansätze

Software + Hardware

Betriebssystem

- RAMpage -
- Kitten -

Hardware

- DRM -

Linux RAMpage

Schirmeier et al. (2013), TU Dortmund

Ziele

- Kontinuierliche, automatische Speichertests in Linux
 - ▶ Test im Hintergrund
- Automatisches Poisoning / Page Retirement

Herausforderung

- Speicherabdeckung
 - Test von Speicherteilen, die aktuell von Programmen oder Betriebssystem belegt werden
 - Testen beliebiger *physischer* Speicherbereiche
- ▶ In Linux so nicht vorgesehen

Linux RAMpage – Übersicht

2-Teilige Struktur

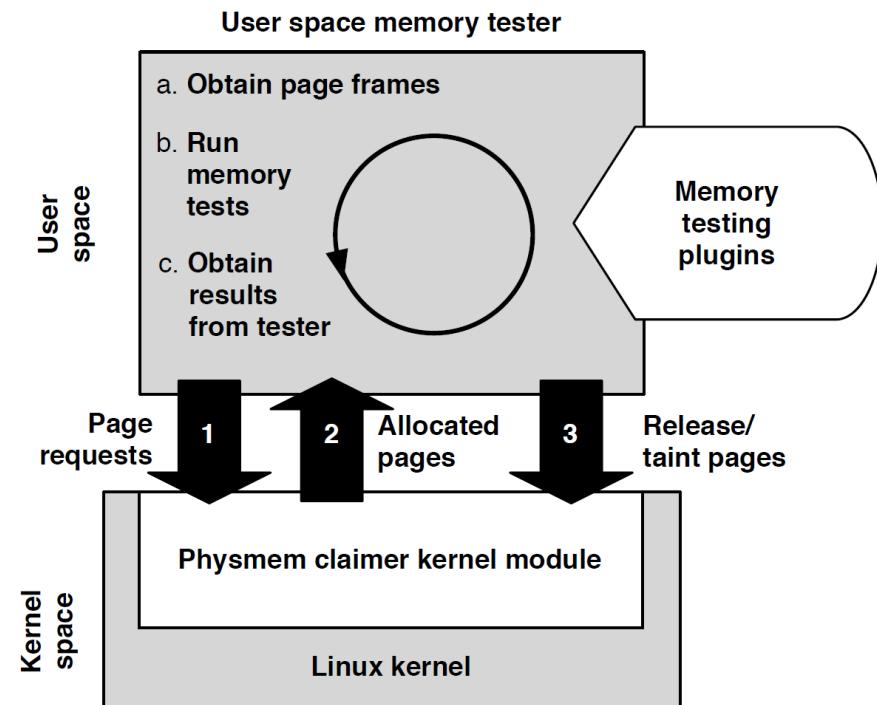
1. *User Space Memory Tester*

Hauptmodul, macht Tests

2. *Physmem Claimer Module*

„erschleicht“ belegten Speicher

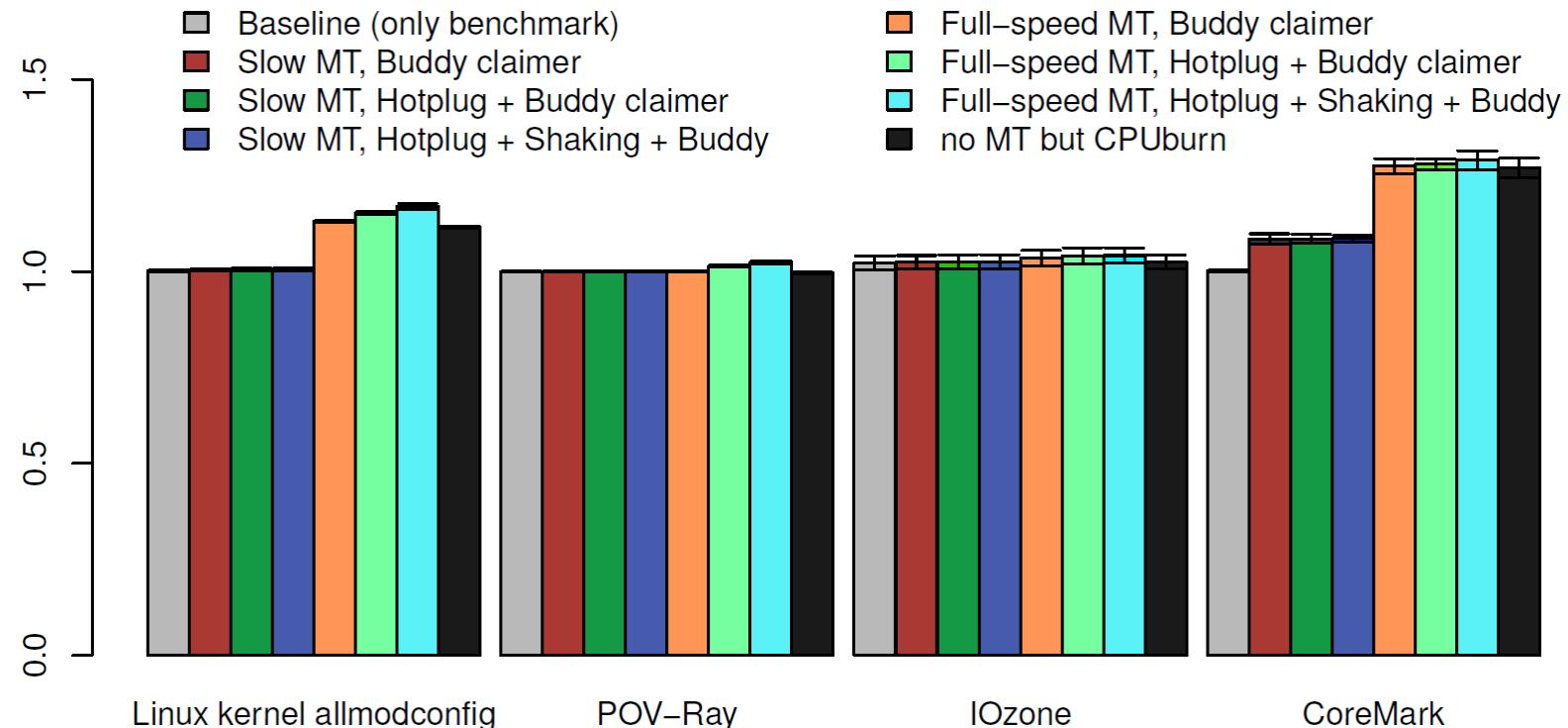
- Linux page allocator (*buddy allocator*)
- memory hotplugging
- hwpoison (*shaking*)



Schirmeier et al. 2013 „Efficient Online Error Assessment and Circumvention for Linux with RAMpage“

Linux RAMpage – Leistung

Rechenzeiten bei kontinuierlichem Speichertest



Schirmeier et al. 2013 „Efficient Online Error Assessment
 and Circumvention for Linux with RAMpage“

Linux RAMpage – Ergebnisse

Ergebnisse

- Kontinuierlicher Test (fast) des gesamten Speichers
- Komplettes Testset von Memtest86+
- Kaum Leistungsminderung
- Markierung defekter Speicherstellen
 - ▶ „graceful degradation“
- **Aber:** Kernel-Speicher kann nicht getestet werden
 - ▶ **~95% aller Speicherfehler werden erkannt**

Speicherfehler

Gegenmaßnahmen

Neue Ansätze

Software + Hardware

Betriebssystem

- RAMpage -
- Kitten -

Hardware

- DRM -

Fehlerharte Betriebssysteme

Zur Erinnerung

- Betriebssystemspeicher ist besonders häufig von Speicherfehlern betroffen
- Fehler hier häufig fatal, da durch Anwendung nicht schützbar

Kann ein Betriebssystem Speicherfehlern ein besonders schlechtes Ziel bieten?

Kitten

Untersuchung der HPC-Betriebssysteme „Kitten“ und „Cray Linux Environment“

Ferreia et al. (2012)

Sandia National Laboratories

Hervorzuheben: „Kitten“

- Leichtgewichtiges Betriebssystem
- Linux-Kompatibel
- Open Source
- Durch „Gast-Betriebssysteme“ erweiterbar



© LG-design.com

Kitten vs. CLE



© LG-design.com



© vicvapor.com

Kitten	CLE (Linux)
30K SLOC	350K SLOC
max. 64MB Kernelspeicher	900 MB+ Kernelspeicher

Kitten – Ergebnisse

Die Ziele von Kitten...

- Klein
- Geringe Komplexität
- Determinismus
- Nur die nötigsten Funktionen Teil des „kritischen“ Kernel
- ✓ Kleiner Overhead, geringe Latenz

...harmonieren gut mit Fehlertoleranz

- Geringer Speicherbedarf
- Einfache, stark deterministische Datenstrukturen
- ✓ ECC-Schutz der wichtigsten Kerneldaten:
Speicherverwaltung, Rücksprungadressen... gut umsetzbar

Speicherfehler

Gegenmaßnahmen

Neue Ansätze

Software + Hardware

Betriebssystem

- RAMpage -
- Kitten -

Hardware

- DRM -

DRM

DRM – Dynamisch Replizierter Speicher

Univ. Rochester / Microsoft Research

Ipek et al. (2010)

Ziele

- PCM-RAM realistisch nutzbar machen
- Wenig Overhead
- Wenig Speicherverlust
- Transparenz
- DDR-Standard kompatibel

DRM

Motivation

1. Begrenzte Schreibfestigkeit der Speicherzellen
2. Starke Streuung der individuellen Schreibfestigkeiten
3. Etablierte Systeme für SSDs ungeeignet für RAM

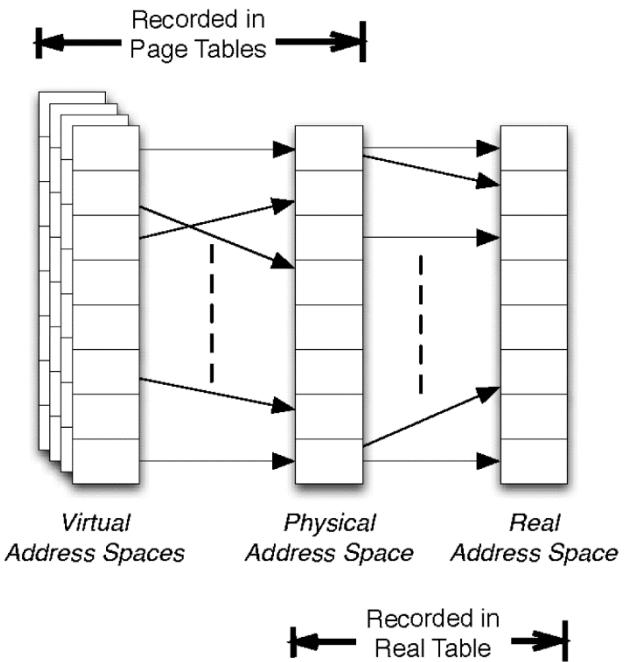
Bisherige Ansätze

- **Wear-Leveling** ► Grundvoraussetzung, aber unzureichend
- **Multibit ECC** ► zu aufwändig, zu langsam
- **ECC + Page Retirement** ► zu grob

DRM – Ansatz

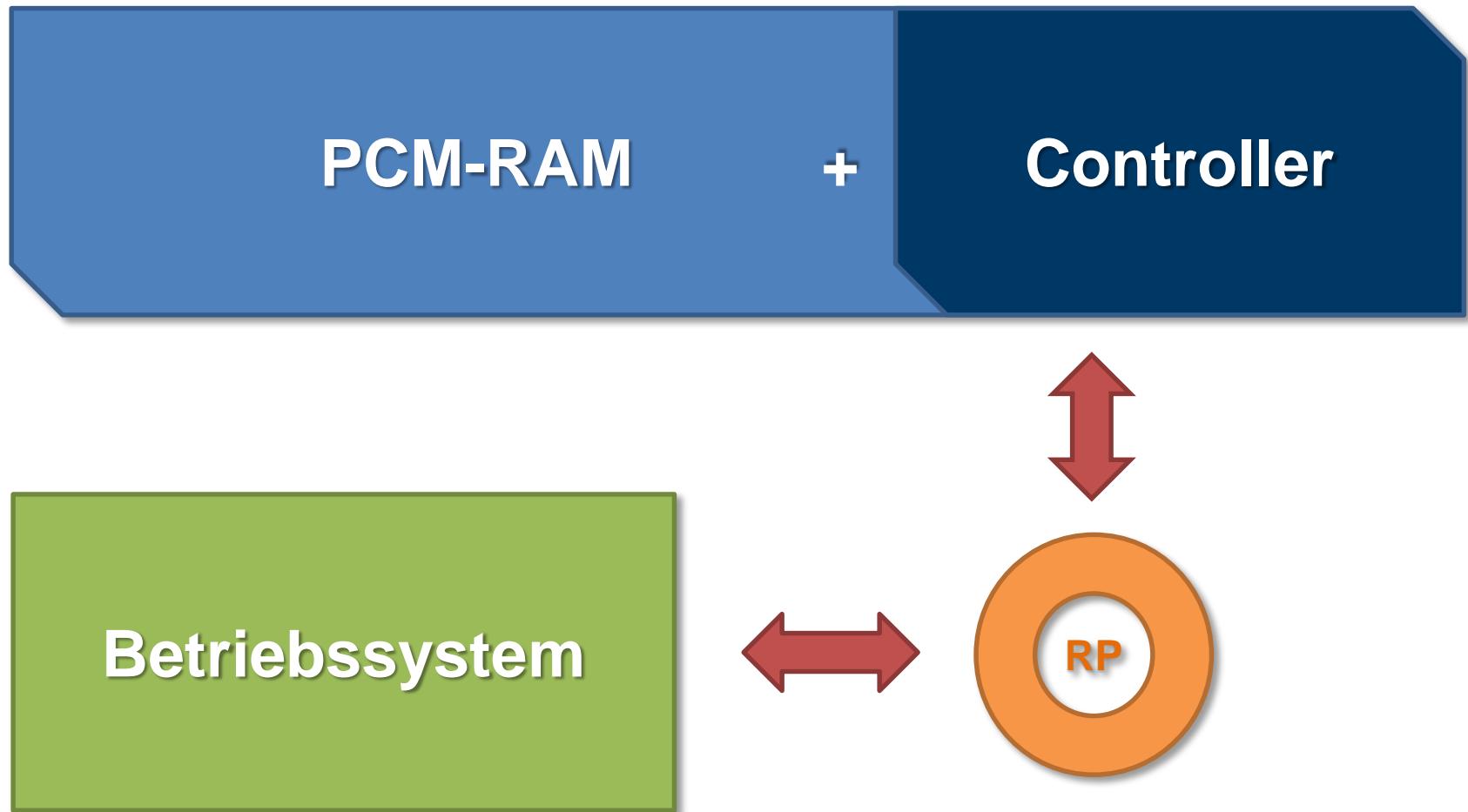
Lösungsansatz

- ✓ **Dynamische Replizierung von Speicherseiten im Fehlerfall**
 - Gruppierung von beschädigten aber kompatiblen Seiten
 - Zuordnung transparent für das Betriebssystem
 - Sanfter Teilausfall der Speicherleistung / Kapazität („graceful degradation“)

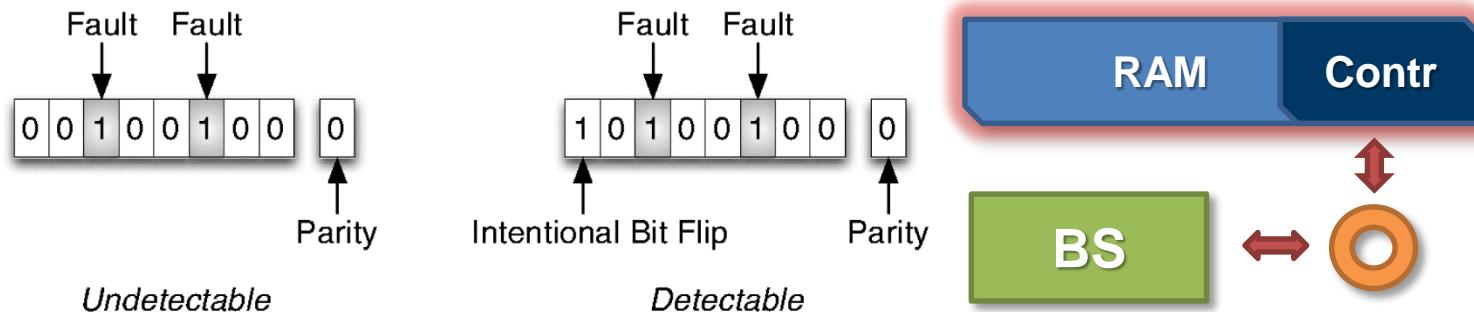


Ipek et al. ASPLOS 2010,
„Dynamically Replicated Memory“

DRM – Überblick



DRM – Daten schreiben



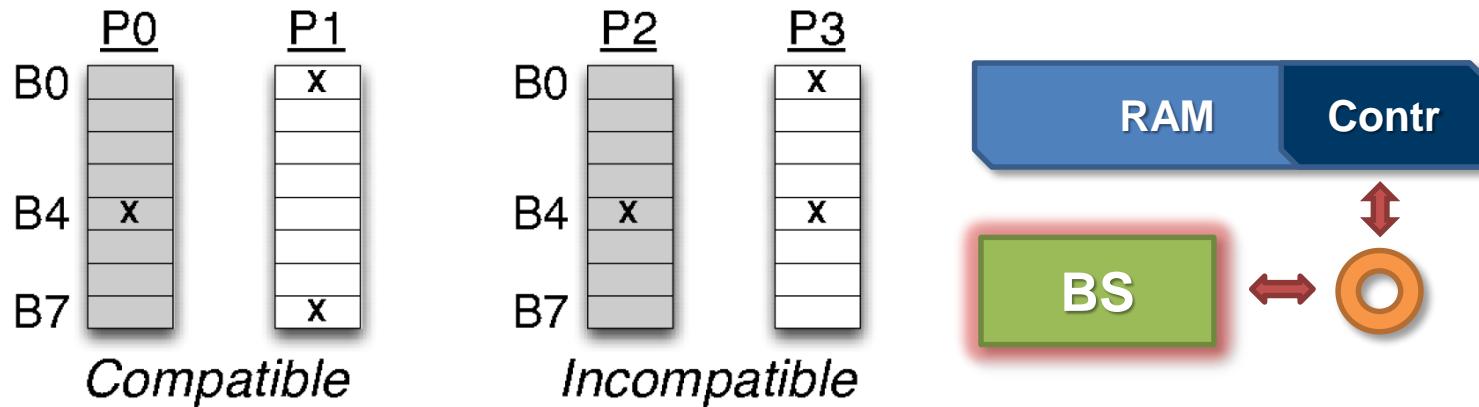
Speicher

1. Byte wird geschrieben
2. Schreibvorgang wird überprüft ► Fehler
3. Markierung des Beschädigten Blocks (Parity)
4. Meldung des Blocks an Betriebssystem über **Ringpuffer**
5. Migration der Daten auf neues Seitenpaar aus **Ringpuffer**

DRM – Daten schreiben

Betriebssystem

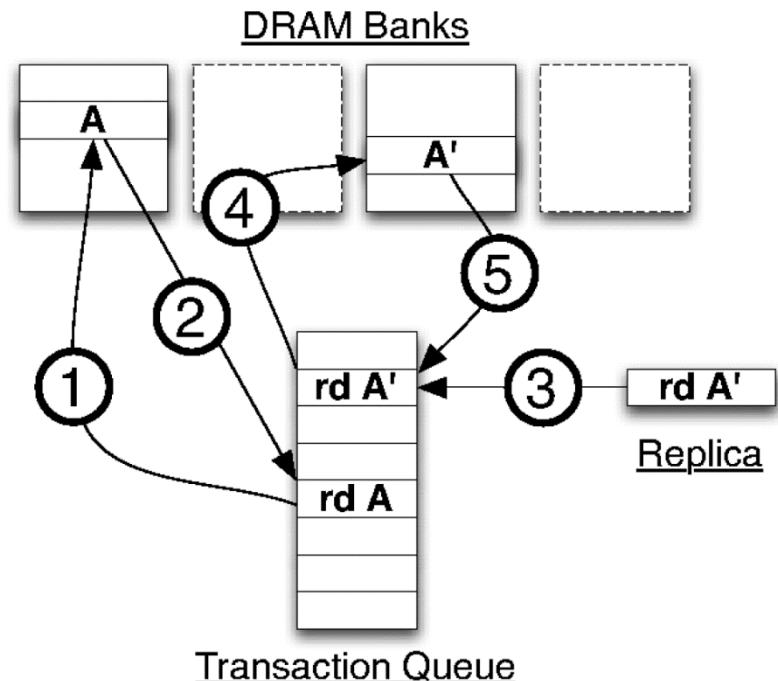
1. Gruppierung beschädigter Seiten
2. Bereitstellung von Replikat-Paaren über **Ringpuffer**



Ipek et al. ASPLOS 2010,
„Dynamically Replicated Memory“

DRM – Daten lesen

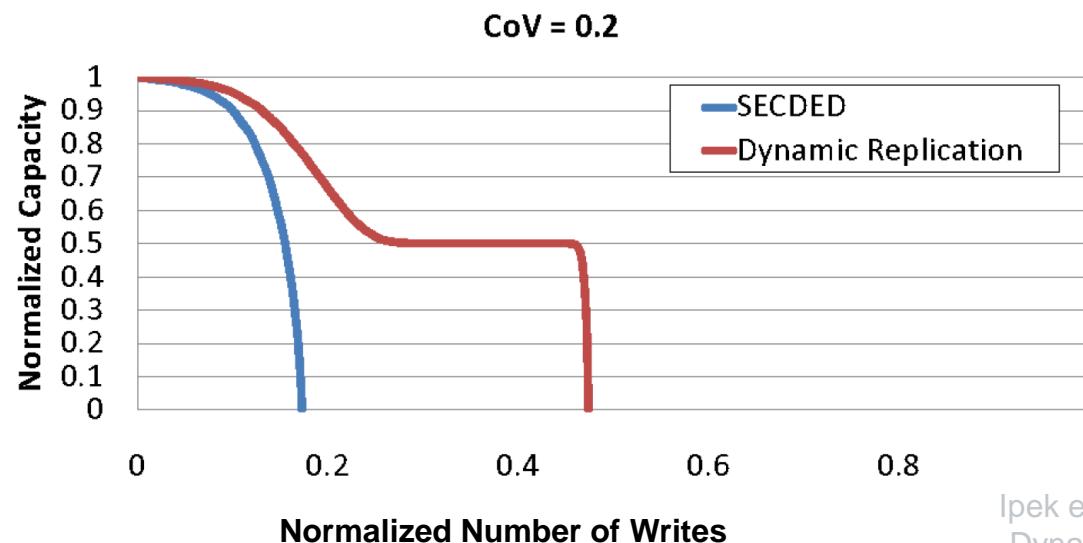
1. Anfrage der Daten beim Hauptreplikat
2. Überprüfung ob Block markiert
► ja
3. Planung neuer Anfrage an Replikat
4. Anfrage wird ausgeführt
5. Ausgabe der Daten



DRM – Ergebnisse

Ergebnisse

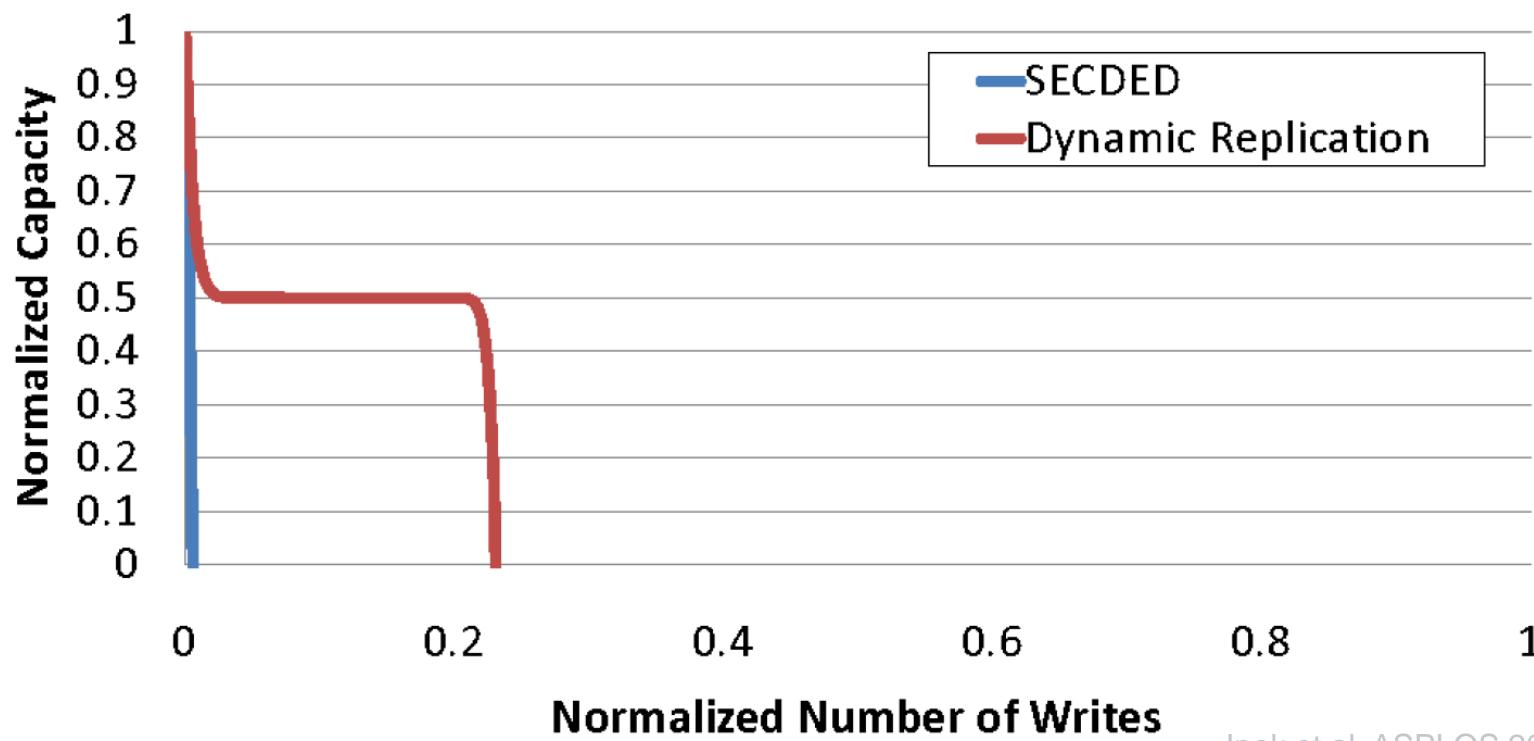
- Deutlich besseres Ausfallverhalten gegenüber Page Retirement mit SECDED-ECC
- Speicherseiten mit bis zu 160 Bitfehlern noch nutzbar
- Speicher bis zu 40x länger nutzbar
- Leistungssteigerungen durch integriertes Load-Balancing möglich



DRM – Ergebnisse

Starke Streuung der Schreibfestigkeit

CoV = 0.3



Ipek et al. ASPLOS 2010,
„Dynamically Replicated Memory“

Zusammenfassung

Speicherfehler

häufiger als gedacht

Oft permanent

PCM = viele permanente Fehler



Stand der Technik

ECC + Speichertest



Neue Ansätze

RAMpage – online Speichertest

Kitten – klein = weniger anfällig

DRM – macht PCM-RAM haltbar

Zusammenfassung

Speicherfehler

häufiger als gedacht

Oft permanent

PCM = viele permanente Fehler

Stand der Technik

ECC + Speichertest

Neue Ansätze

RAMpage – online Speichertest

Kitten – klein = weniger anfällig

DRM – macht PCM-RAM haltbar

Zusammenfassung

Speicherfehler

häufiger als gedacht

Oft permanent

PCM = viele permanente Fehler

Stand der Technik

ECC + Speichertest

Neue Ansätze

RAMpage – online Speichertest

Kitten – klein = weniger anfällig

DRM – macht PCM-RAM haltbar

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

