

# Echtzeitsysteme

## Mehrkern-Echtzeitsysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://sys.cs.fau.de/lehre/ss22/ezs/>

12. Juli 2022



# Fragestellungen



Wie lassen sich **komplexe Echtzeitsysteme** handhaben?

- **Rechenzeitbedarf** ist durch einfache Rechensysteme nicht zu erfüllen
- Beispiel: moderne Fahrerassistenzsysteme
- Die **Vielfalt** der abzuarbeitenden Aufgaben ist enorm



■ **Herausforderungen** von Mehrkern-Echtzeitsystemen?

- Welche Anomalien entstehen durch Ausführungsparallelität?
- Welche Konsequenzen hat dies für die Ablaufplanung?



Wie sehen **Verfahren & Mechanismen** für Mehrkern-Echtzeitsystem aus?

- Ablaufplanung?
- WCET-Analyse?
- Zugriffssteuerung?



# Gliederung

1 Herausforderung Mehrkernsystem

2 Ablaufplanung

3 WCET-Analyse

4 Synchronisation

5 Zusammenfassung



# Rückblick Einkernsysteme

Was wir zu wissen glaubten...



■ **Liu-Layland Planbarkeitskriterium** für statische Prioritäten<sup>1</sup>

- RMA ist optimal für periodische Aufgabensysteme (vgl. IV-2/5 ff)
- Planbare Auslastung  $u_{RMA} \leq \ln(2) \sim 69,3\%$



■ Planungsalgorithmen für **dynamische Prioritäten sind optimal**<sup>1</sup>

- Beispielsweise EDF für beliebige Aufgabensysteme (vgl. IV-2/13 ff)



■ Ablaufplanung behält auch im **positiven Fall** ihre **Zulässigkeit**

- Wenn sich das System besser verhält als angenommen
- Antwortzeiten vergrößern sich nicht bei abnehmender Ausführungszeit
- Auslösezeiten und Termine verschieben sich ausführungsbedingt nicht



■ Gleichzeitige Auslösung repräsentiert den **kritischen Zeitpunkt**

- Maximale Antwortzeit hängt von der Menge der Aufgaben ab (vgl. IV-2/38)



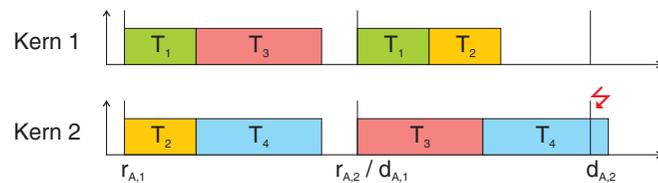
**Viele in Einkernsystemen valide Annahmen verlieren in Mehrkernsystemen ihre Gültigkeit!**

<sup>1</sup>Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).



## Anomalie: Kritischer Zeitpunkt

Antwortzeit in Abhängigkeit von der Ausführungsreihenfolge



⚠ Gleichzeitige Auslösung repräsentiert nicht mehr zwingend den **kritischen Zeitpunkt**

- Antwortzeit der zweiten Periode vergrößert
- Terminverletzung durch Wahl des Kerns

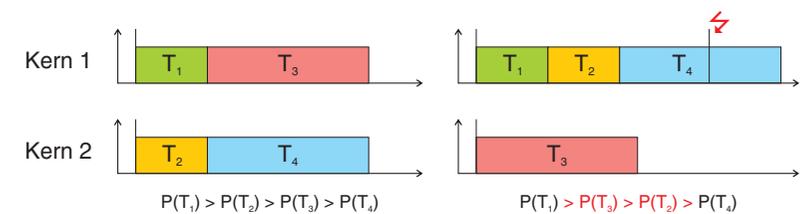
👉 Dhall Effekt [3]

- Garantierte Auslastung wird beliebig schlecht
- Konvergiert im schlimmsten Fall gegen  $u = 1$  (Einkernsystem)



## Anomalie: Relative Prioritätsordnung

Antwortzeit in Abhängigkeit von der Ausführungsreihenfolge



⚠ Antwortzeit abhängig vom relativen Prioritätsgefüge

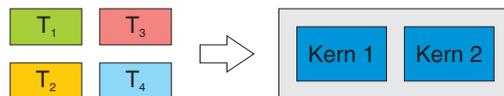
- Höherpriorer Arbeitsaufträge

■ Beispiel:  $T_4$  verpasst seinen Termin

- Vorgezogene Ausführung von  $T_3$  auf Kern 2
  - $T_4$  wird auf Kern 1 eingeplant und verpasst seinen Termin
- Erschwert signifikant die Antwortzeitanalyse



## Herausforderung Mehrkernechtzeitsystem



1 **Prioritätsproblem** (engl. *priority problem*)

→ Wann und in welcher Reihenfolge laufen Arbeitsaufträge?

- Statische Prioritäten für Aufgaben (z.B. RMA)
- Dynamische Prioritäten für Aufgaben (z.B. EDF)
- Dynamische Prioritäten für Aufträge (z.B. PFAIR)

2 **Allokationsproblem** (engl. *allocation problem*)

→ Auf welchem Kern laufen Arbeitsaufträge?

- Keine Migration (engl. *no migration*)
- Migration von Aufgaben (engl. *task-level migration*)
- Migration von Arbeitsaufträgen (engl. *job-level migration*)

👉 Partitionierte, globale und hybride Ablaufplanungsverfahren



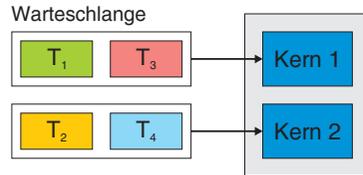
## Gliederung

- 1 Herausforderung Mehrkernsystem
- 2 Ablaufplanung
- 3 WCET-Analyse
- 4 Synchronisation
- 5 Zusammenfassung



## Partitionierte Ablaufplanung (vgl. [2])

Teile und herrsche

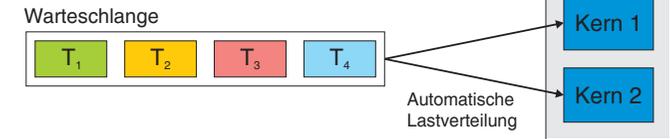


- Partitionierte Ablaufplanung (engl. *partitioned scheduling*)
  - Verteilung der Aufgaben auf Kerne vor der Laufzeit
    - Alle Aufträge einer Aufgabe werden auf demselben Kern ausgeführt
  - Anwendung klassischer EK-Verfahren auf die lokale Aufgabenmenge
- Verteilung  $\mapsto$  Behälterproblem (engl. *bin packing problem*)
  - Verteile  $n$  Aufgaben der Dichte  $\Delta_i$  auf  $m$  Kerne der Kapazität  $\Delta_{max} = 1$
  - Zahlreiche Verfahren verfügbar: First-Fit, Next-Fit, Best-Fit, ...
- Planbare Auslastung im schlimmsten Fall  $u_{wc} \approx 0,5$  (50%)
  - Alle Aufgaben haben eine Auslastung wenig größer als  $u_i > 0,5$



## Globale Ablaufplanung (vgl. [2])

Migration löst das Auslastungsproblem

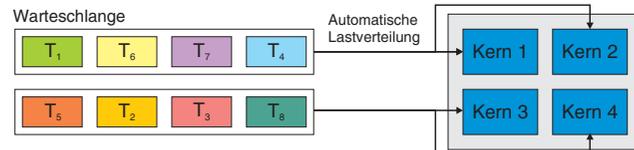


- Globale Ablaufplanung (engl. *global scheduling*)
  - Verteilung der Arbeitsaufträge auf Kerne zur Laufzeit
    - Aufgaben bzw. Aufträge können zwischen Kernen migrieren
  - Mehrkern-Planungsverfahren auf der globalen Warteschlange
    - Statische und dynamische Prioritäten: G-EDF, D-RMA, PFAIR, ...
    - Verfahren mit dynamic-job-level Prioritäten (z.B. PFAIR) dominieren alle anderen Planungsverfahren  $\leadsto$  Auslastung  $u_{opt} = 1$
- Globale Verfahren können mit erheblichen Kosten und Unwägbarkeiten behaftet sein
  - Hohe Migrationskosten, insbesondere bei Migration von Aufträgen
  - Analysierbarkeit der Laufzeit nicht mehr praktikabel



## Hybride Ansätze (vgl. [2])

Das Beste aus beiden Welten



- Hybride Ablaufplanung (engl. *hybrid scheduling*)
  - Kombination globaler und partitionierter Ablaufplanung
    - Migration minimieren und Auslastung maximieren
- Gruppierende Ablaufplanung (engl. *clustered scheduling*)
  - Zusammenfassen von Kernen zu Gruppen (engl. *cluster*) und Partitionierung
  - Pro Gruppe eine globale Warteschlange
    - Hierarchische Ablaufplanung (vgl. Zusteller V-2/27)
- Teilpartitionierende Ablaufplanung (engl. *semi-partitioned scheduling*)
  - Einschränkung der Migration durch (komplexes) Regelwerk
  - Bsp: Aufgabenmigration nur zwischen Kernen; begrenzte Zahl migrierbarer Aufgaben
- Auch Partitionierung nach Wichtigkeit/Kritikalität (vgl. IV-2/16)



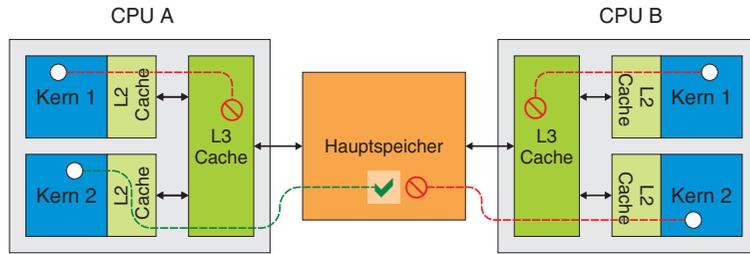
## Gliederung

- 1 Herausforderung Mehrkernsystem
- 2 Ablaufplanung
- 3 WCET-Analyse
- 4 Synchronisation
- 5 Zusammenfassung



## Herausforderung: Echte Ausführungsparallelität

Interferenz auf der physikalischen Ebene



### Echte Ausführungsparallelität ist das Problem

- Einkernsysteme  $\leadsto$  virtuelle Parallelisierung, Sequentialisierung
- Mehrkernsysteme  $\leadsto$  gemeinsames Betriebsmittel

### ■ Beispiel: simultaner Speicherzugriff

- impliziter Wettstreit auf physikalischer Ebene

### ⚠ Auswirkungen auf Laufzeitverhalten

- Blockadezeit durch Speicherzugriff und Invalidation des Cache-Inhalts
  - Studien zeigen dramatische Zunahme der WCET [1]
- $\rightarrow$  Abhängig von den Eigenschaften der Hardware!



## Erweiterung der WCET-Betrachtung

Direkte und indirekte Kosten der Ablaufplanung

### 1 Kosten durch Verdrängung (engl. *preemption costs*)

$\rightarrow$  Die Problem sind uns bereits bekannt (vgl. III-3), die Komplexität der Analyse bzw. Abstraktion steigt jedoch im Mehrkernfall dramatisch an

#### ■ Direkte Kosten

- Unterbrechung, Sicherung und -wiederherstellung des Hardwarekontexts
- ⚠ Einplanung  $\leadsto$  Synchronisation im Mehrkernsystem notwendig

#### ■ Indirekte Kosten

- Wiederaufsetzen/-füllen der Seitentabelle
- Dislokation von Cacheinhalten (engl. *cache evictions*) zwischen Ausführungsrounden
- Vergleiche *Cache-Related Preemption Delays*
- ⚠ Ggf. Herstellen der Cache-Kohärenz (engl. *cache coherency*): einheitliche Sicht auf L3-Cache
- ⚠ Kommunikation zwischen Kernen/Sockeln



## Erweiterung der WCET-Betrachtung (Forts.)

Direkte und indirekte Kosten der Ablaufplanung

### 2 Kosten durch Migration (engl. *migration costs*)

⚠ Diese Kosten entstehen nur in Mehrkernsystemen

#### ■ Direkte Kosten

- Manipulation der Bereitliste (engl. *ready queue*)  $\leadsto$  Synchronisation
- Sicherung und -wiederherstellung des Hardwarekontexts

#### ■ Indirekte Kosten

- Laden des aktiven Cachekontexts (engl. *cache working set*) vom Quellkern  $\leadsto$  Dislokation von Cacheinhalten
- Laden des restlichen Prozesskontexts (transitive Hülle)  $\leadsto$  Cache-Kohärenz, Kommunikation

⚠ Zusätzlich Kosten durch Verdrängung bei Migration von (laufenden) Arbeitsaufträgen



## Gliederung

1 Herausforderung Mehrkernsystem

2 Ablaufplanung

3 WCET-Analyse

4 Synchronisation

5 Zusammenfassung



# Synchronisation in Mehrkernsystemen

Effekte und Problemstellen bisheriger Ansätze

⚠ Probleme der (unkontrollierten) **Prioritätsumkehr** (siehe VII/13) verschärft sich in Mehrkernsystemen

- Synchronisation erzeugt **kernübergreifende Abhängigkeiten**  $\leadsto$  **entfernte Blockierung** (engl. *remote blocking*)
- **Relative Prioritätsordnung** (Folie 6) betrifft auch Betriebsmittelnutzung
  - Potentielles Problem: lokal  $\neq$  global höchste Priorität

$\rightarrow$  Wovon hängt die **Blockierungszeit** (s. VII/43) ab?

- Längster kritischer Abschnitt aller Betriebsmittel?
- Maximale Verzögerung durch höherpriorige Aufgaben auf einem Kern?

🔍 Gesucht sind Verfahren, welche:

- Kerne nicht unnötig ungenutzt lassen ( $\neq$  NPCS VII/22)
- Sich **ausschließlich** auf die Ausführungszeit der kritischen Abschnitte beziehen ( $\neq$  Prioritätsvererbung VII/28)



# Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme

Multiprocessor Priority Ceiling Protocol (MPCP)



**Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme** (engl. *Multiprocessor Priority Ceiling Protocol*) (MPCP) [4, S. 352],[5]

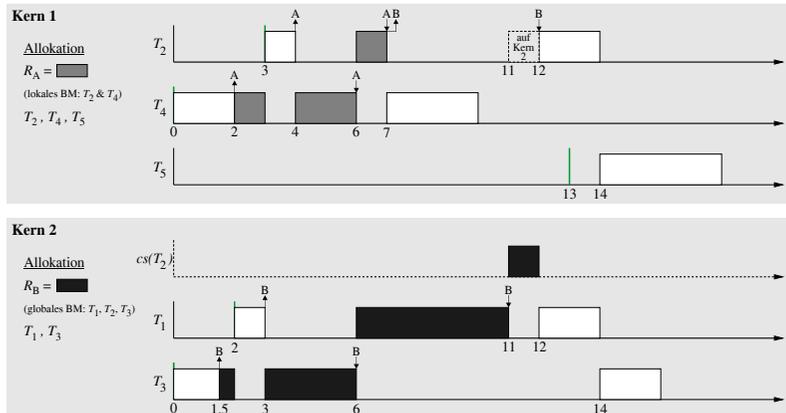
- Eine direkte **Erweiterung** des PCP (s. VII/28) für Einkernsysteme  $\rightarrow$  **Entfernte Blockierung** als Funktion der Ausführungszeit kritischer Abschnitte

## ■ Vorgehen und Annahmen

- 1 Einteilung in **lokale** und **globale** Betriebsmittel
  - Lokale Betriebsmittel werden nur von lokalen Aufgaben genutzt  $\leadsto$  Synchronisation durch klassisches PCP
  - Globale Betriebsmittel werden von Aufgabe auf verschiedenen Kernen genutzt
- 2 Globale Betriebsmittel erhalten eigenen Prioritätenraum
  - Prioritätsobergrenze  $\hat{\Pi}_i$  eines globalen Betriebsmittels  $R_i$  ist höher als die höchstpriorie unabhängige Aufgabe  $T_H$
  - $\rightarrow \hat{\Pi}_i = P_{T_H} + 1 + \max(P_{T_i} | T_i \text{ nutzt } R_i)$
- 3 Betriebsmittel werden Kernen zugewiesen und **nur** dort ausgeführt
  - Ausführung entfernter  $cs_i$  auf Ebene der Prioritätsobergrenze  $\hat{\Pi}_i$  ( $\leftrightarrow$  Vererbung)



# Beispiel: Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme



- bis  $t_6$  Normaler Ablauf mit lokalen Betriebsmitteln auf Kern 1 & 2
- $t_7$   $T_2$  fordert  $R_B$  (globales BM) an  $\leadsto$  Suspendierung von  $T_2$  auf Kern 1
- $t_8$   $R_B$  wird von  $T_1$  freigegeben  $\leadsto$   $T_2$  erbt als entfernter Aufrufer  $\hat{\Pi}_B$  auf Kern 2
- $t_9$   $cs$  von  $T_2$  wird auf Kern 2 mit  $P_{\hat{\Pi}_B}(t)$  ausgeführt



# Gliederung

- 1 Herausforderung Mehrkernsystem
- 2 Ablaufplanung
- 3 WCET-Analyse
- 4 Synchronisation
- 5 Zusammenfassung



## Zusammenfassung

- Mehrkernechtzeitsysteme sind die Zukunft
  - Leistungssteigerung durch Parallelisierung
- Ablaufplanung ist eine Herausforderung
  - Wissen aus Einkernsystemen im Allgemeinen nicht übertragbar
  - Zeitliche Anomalien  $\leadsto$  Kritischer Zeitpunkt, Prioritätsordnung
  - Prioritätsproblem und Allokationsproblem
- Partitionierte Ablaufplanung
  - Verteilen der Aufgaben auf Kerne zum Entwurfszeitpunkt
  - Transformation in mehrere Einkernsysteme
  - $\rightarrow$  Bekannte Techniken und Algorithmen sind wieder anwendbar
  - $\rightarrow$  Garantiert planbare Auslastung sehr schlecht
- Globale Ablaufplanung
  - Findet zur Laufzeit statt und erfordert Migration
  - Verfahren mit dynamischen Prioritäten auf Auftragsebene erlauben vollständige Auslastung
  - $\rightarrow$  In der Praxis mit hohen Kosten und Unwägbarkeiten behaftet



## Zusammenfassung (Forts.)

- Hybride Ablaufplanung
  - Verbinden die Vor- und Nachteile der anderen Verfahren
  - Teilpartitionierte und gruppierende Ablaufplanung
- WCET-Analyse
  - Komplexität nimmt stark zu
  - Zusätzliche Kosten durch Migration und Synchronisation



## Literaturverzeichnis

- [1] Baruah, S. ; Bertogna, M. ; Buttazzo, G. :  
*Multiprocessor Scheduling for Real-Time Systems.*  
Springer, 2015. –  
ISBN 978–3319086958
- [2] Davis, R. I. ; Burns, A. :  
A Survey of Hard Real-Time Scheduling for Multiprocessor Systems.  
In: *ACM Computing Surveys* 43 (2011), Okt., Nr. 4.  
<http://dx.doi.org/10.1145/1978802.1978814>. –  
DOI 10.1145/1978802.1978814
- [3] Dhall, S. K. ; Liu, C. :  
On a real-time scheduling problem.  
In: *Operations research* 26 (1978), Nr. 1, S. 127–140
- [4] Liu, J. W. S.:  
*Real-Time Systems.*  
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –  
ISBN 0–13–099651–3
- [5] Rajkumar, R. ; Sha, L. ; Lehoczky, J. P.:  
Real-time synchronization protocols for multiprocessors.  
In: *Proceedings of the 9th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS '88).*  
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 1988, S. 259–269

