

Echtzeitsysteme

Mehrkern-Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS19/V_EZS/

20. Januar 2020



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** und **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 Prioritäten¹

- 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**¹

- 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-2/43)



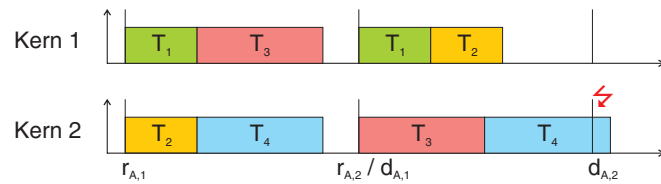
Viele in Einkernsystemen valide Annahmen verlieren in Mehrkernsystemen ihre Gültigkeit!



¹Bezogen 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

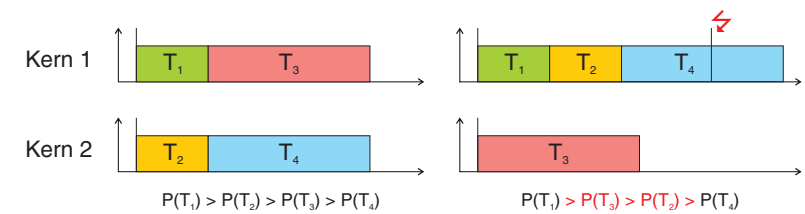
👉 Dhall Effekt [3]

- 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

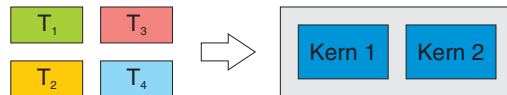
- Höherpriorer Arbeitsaufträge

■ 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



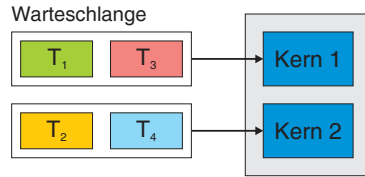
Gliederung

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



Partitionierte Ablaufplanung (vgl. [2])

Teile und herrsche

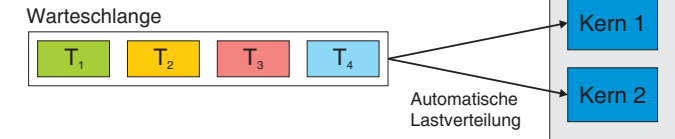


- Partitionierte Ablaufplanung (engl. *partitioned scheduling*)
 - Verteilung der Aufgaben auf Kerne vor der Laufzeit
 - Alle Aufträge einer Aufgabe werden auf demselben Kern ausgeführt
 - Anwendung klassischer EK-Verfahren auf die lokale Aufgabenmenge
- Verteilung \mapsto Behälterproblem (engl. *bin packing problem*)
 - Verteile n Aufgaben der Dichte Δ_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

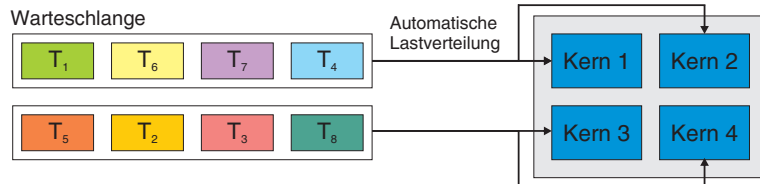


- Globale Ablaufplanung (engl. *global scheduling*)
 - Verteilung der Arbeitsaufträge auf Kerne zur Laufzeit
 - Aufgaben bzw. Aufträge können zwischen Kernen migrieren
 - Mehrkern-Planungsverfahren auf der globalen Warteschlange
 - Statische und dynamische Prioritäten: G-EDF, D-RMA, PFAIR, ...
 - Verfahren 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
 - Beispiele: Aufgaben dürfen nur zwischen bestimmten Kernen migrieren; Begrenze Zahl migrierbarer Aufgaben



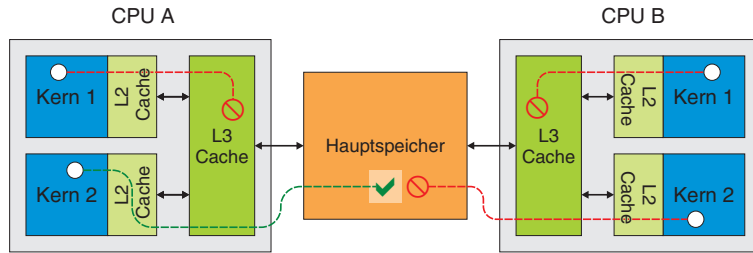
Gliederung

- 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
- ⚠ Ggf. Herstellen der Cachekohärenz (engl. *cache coherency*)
- ⚠ 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 Cachekontextes (engl. *cache working set*) vom Quellkern \leadsto Dislokation von Cacheinhalten
- Laden des restlichen Prozesskontexts (transitive Hülle) \leadsto Cachekohärenz, 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/14) verschärft sich in Mehrkernsystemen

- Synchronisation erzeugt **kernübergreifende Abhängigkeiten** \rightsquigarrow **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/23)
- 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]

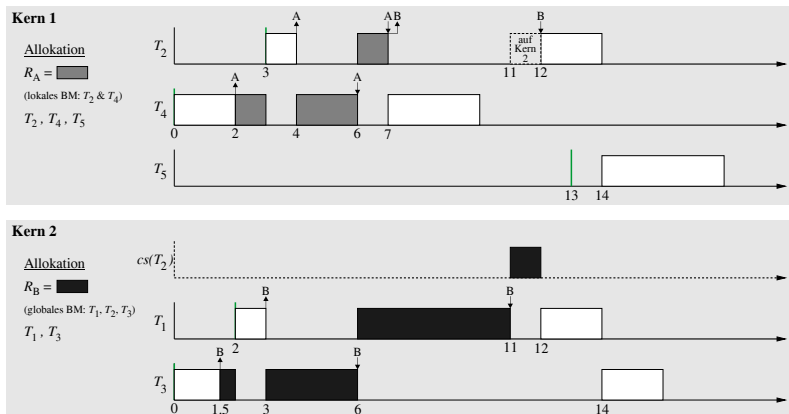
- Eine direkte **Erweiterung** des PCP (s. VII/28) für Einkernsysteme
- \rightarrow **Entfernte Blockierung** als Funktion der Ausführungszeit kritischer Abschnitte

■ Vorgehen und Annahmen

- 1 Einteilung in **lokale** und **globale** Betriebsmittel
 - Lokale Betriebsmittel werden nur von lokalen Aufgaben genutzt \rightsquigarrow 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 höchstpriorige 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 $\hat{\Pi}_i$ (\rightarrow 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 \rightsquigarrow Suspendierung von T_2 auf Kern 1
- t_8 R_B wird von T_1 freigegeben \rightsquigarrow 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
 - Bekannte Techniken und Algorithmen sind wieder anwendbar
 - Garantiert planbare Auslastung sehr schlecht
- Globale Ablaufplanung
 - Findet zur Laufzeit statt und erfordert Migration
 - Verfahren mit dynamischen Prioritäten auf Auftragsebene erlauben vollständige Auslastung
 - 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

