

Echtzeitsysteme

Mehrkern-Echtzeitsysteme

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

29. Januar 2018



⚠ Wie lassen sich **komplexe Echtzeitsysteme** handhaben?

- **Rechenzeitbedarf** ist durch einfache Rechensysteme nicht zu erfüllen
- Beispiel: Moderne Fahrerassistenzsystemen
- 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?



1 Herausforderung Mehrkernsystem

2 Ablaufplanung

3 WCET-Analyse

4 Synchronisation

5 Zusammenfassung



- Liu-Layland Planbarkeitskriterium für statische Prioritäten¹
 - RMA ist optimal für periodische Aufgabensysteme (vgl. IV-2/5 ff)
 - Planbare Auslastung $u_{RMA} \leq \ln(2) \sim 69,3\%$

¹Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).

- 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 optimal¹
 - Beispielsweise EDF für beliebige Aufgabensysteme (vgl. IV-2/13 ff)

¹Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).

- 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 optimal¹
 - 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

¹Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).

- 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 optimal¹
 - 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)

¹Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).

- 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 optimal¹
 - 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)

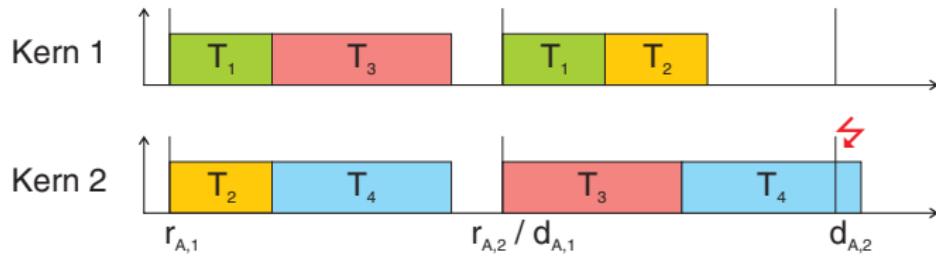


Viele in Einkernsystemen valide Annahmen verlieren in Mehrkernsystemen ihre Gültigkeit!

¹Bezogen auf die Priorität der Aufgaben (task priority).

Anomalie: Kritischer Zeitpunkt

Antwortzeit in Abhängigkeit von der Ausführungsreihenfolge



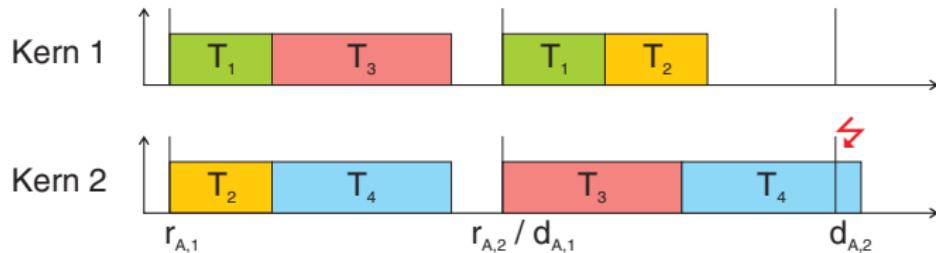
Gleichzeitige Auslösung repräsentiert nicht mehr zwingend den **kritischen Zeitpunkt**

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



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



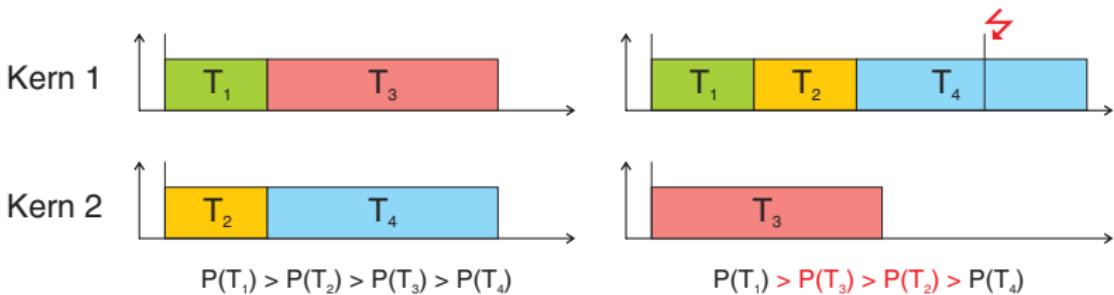
Dhall Effekt [3]

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



Anomalie: Relative Prioritätsordnung

Antwortzeit in Abhängigkeit von der Ausführungsreihenfolge



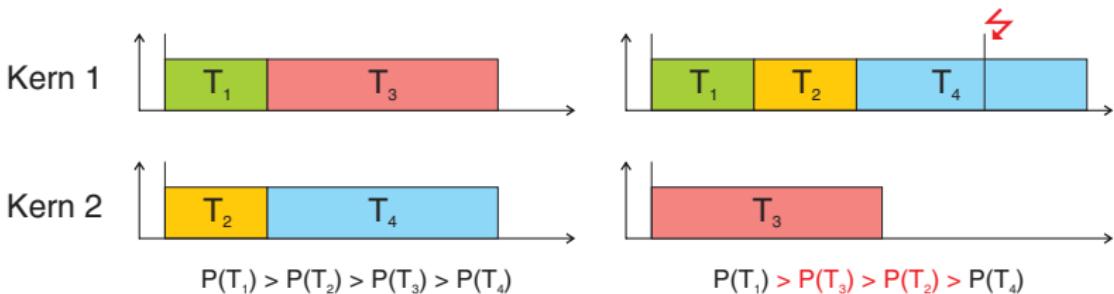
Antwortzeit abhängig vom relativen Prioritätsgefüge

- Höherprioriter Arbeitsaufträge



Anomalie: Relative Prioritätsordnung

Antwortzeit in Abhängigkeit von der Ausführungsreihenfolge



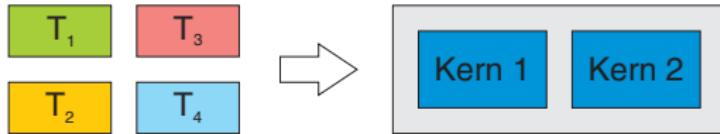
⚠ Antwortzeit abhängig vom relativen Prioritätsgefüge

- Höherprioriter Arbeitsaufträge

■ Beispiel: T₄ verpasst seinen Termin

- Vorgezogene Ausführung von T₃ auf Kern 2
- T₄ wird auf Kern 1 eingeplant und verpasst seinen Termin
- Erschwert signifikant die Antwortzeitanalyse

Herausforderung Mehrkernechtzeitsystem

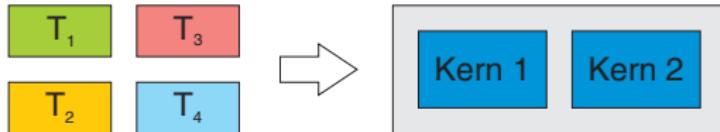


1 Prioritätsproblem (engl. *priority problem*)

- 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)



Herausforderung Mehrkernechtzeitsystem



1 Prioritätsproblem (engl. *priority problem*)

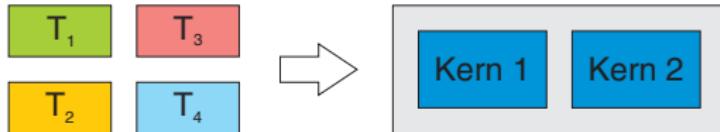
- Wann und in welcher Reihenfolge laufen Arbeitsaufträge?
- Statische Prioritäten für Aufgaben (z.B. RMA)
- Dynamische Prioritäten für Aufgaben (z.B. EDF)
- Dynamische Prioritäten für Aufträge (z.B. PFAIR)

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*)



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



1 Herausforderung Mehrkernsystem

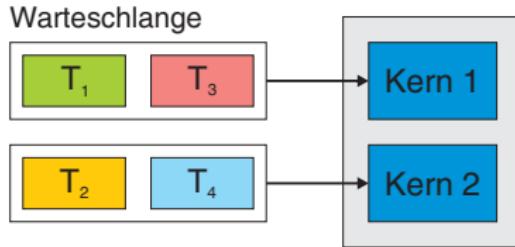
2 Ablaufplanung

3 WCET-Analyse

4 Synchronisation

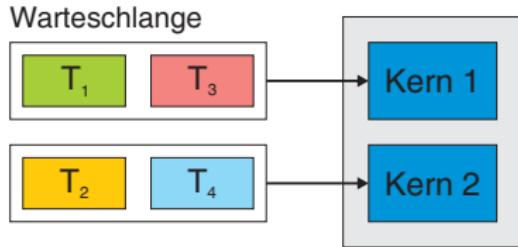
5 Zusammenfassung



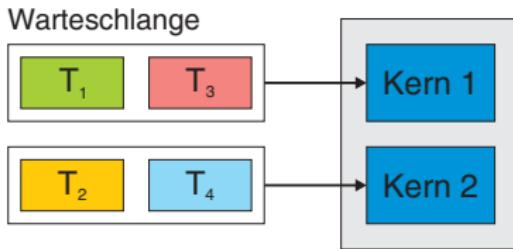


- ☞ **Partitionierte Ablaufplanung** (engl. *partitioned scheduling*)
 - Verteilung der Aufgaben auf Kerne vor der Laufzeit
 - Alle Aufträge einer Aufgabe werden auf demselben Kern ausgeführt
 - Anwendung klassischer EK-Verfahren auf die lokale Aufgabenmenge





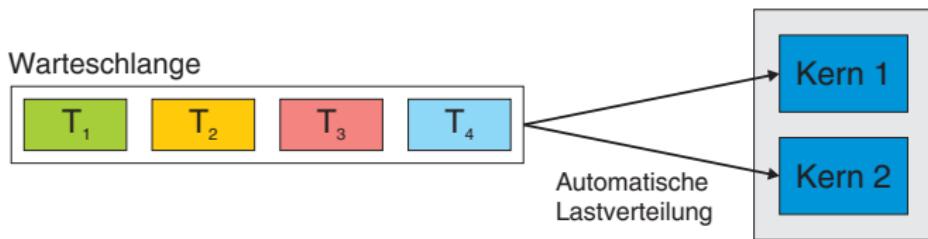
- ☞ Partitionierte Ablaufplanung (engl. *partitioned scheduling*)
 - Verteilung der Aufgaben auf Kerne vor der Laufzeit
 - Alle Aufträge einer Aufgabe werden auf demselben Kern ausgeführt
 - Anwendung klassischer EK-Verfahren auf die lokale Aufgabenmenge
- Verteilung → Behälterproblem (engl. *bin packing 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, ...



- ☞ 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 → 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



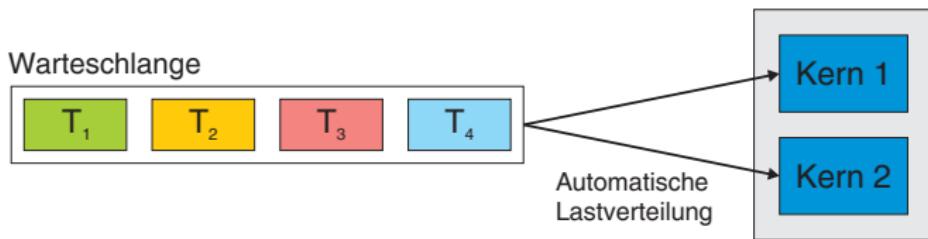
■ Globale Ablaufplanung (engl. *global scheduling*)

- Verteilung der Arbeitsaufträge auf Kerne zur Laufzeit
→ Aufgaben bzw. Aufträge können zwischen Kernen migrieren



Globale Ablaufplanung (vgl. [2])

Migration löst das Auslastungsproblem



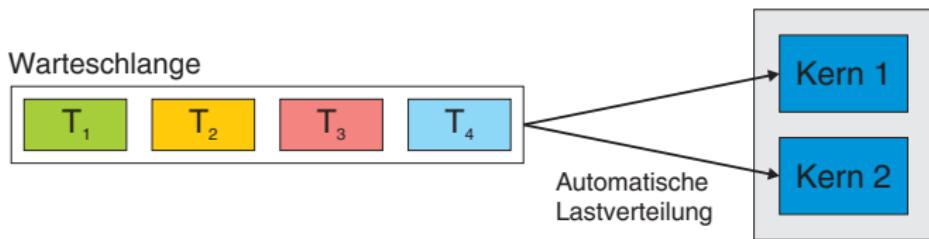
Globale Ablaufplanung (engl. *global scheduling*)

- 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 ∼ Auslastung $u_{opt} = 1$



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 ∼ Auslastung $u_{opt} = 1$



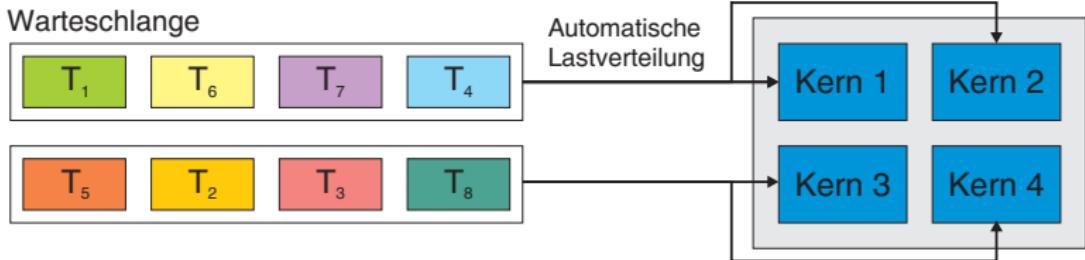
Globale Verfahren können mit erheblichen Kosten und Unwägbarkeiten behaftet sein

- Hohe Migrationskosten, insbesondere bei Migration von Aufträgen
- Analysierbarkeit der Laufzeit nicht mehr praktikabel



Hybride Ansätze (vgl. [2])

Das Beste aus beiden Welten



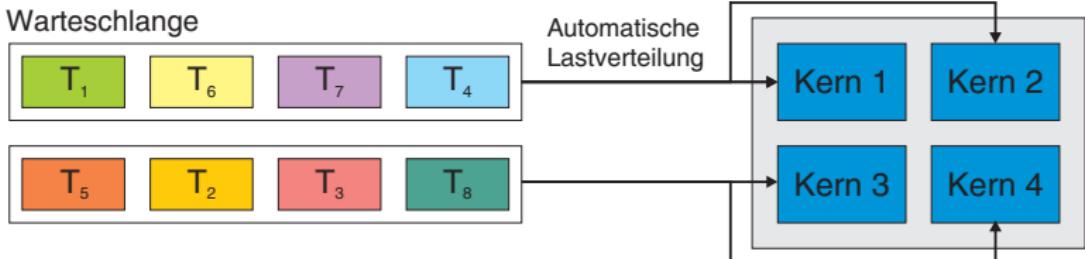
Hybride Ablaufplanung (engl. *hybrid scheduling*)

- Kombination globaler und partitionierter Ablaufplanung
- Migration minimieren und Auslastung maximieren



Hybride Ansätze (vgl. [2])

Das Beste aus beiden Welten



Hybride Ablaufplanung (engl. *hybrid scheduling*)

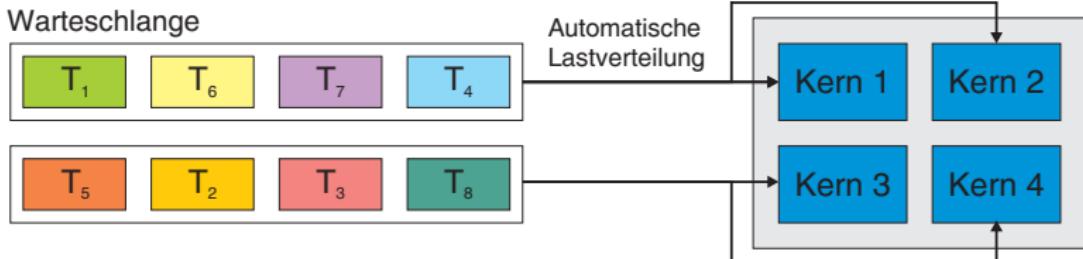
- Kombination globaler und partitionierter Ablaufplanung
→ Migration minimieren und Auslastung maximieren

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)



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*)

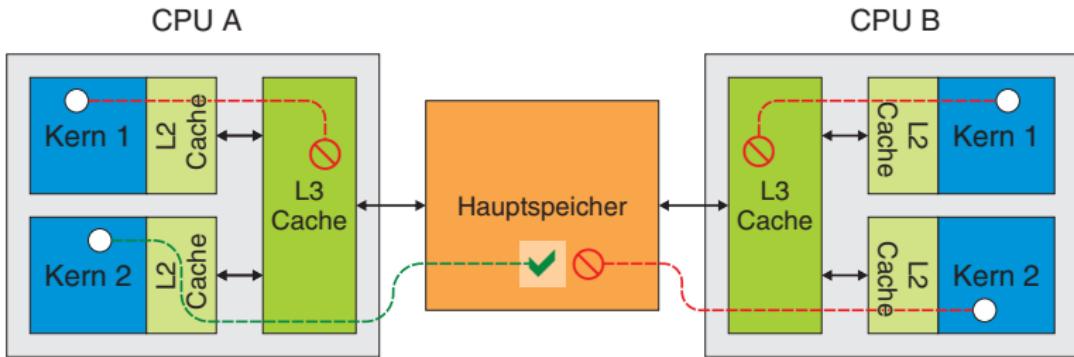
- Einschränkung der Migration durch (komplexes) Regelwerk
- Beispiele: Aufgaben dürfen nur zwischen bestimmten Kernen migrieren; Begrenzte Zahl migrierbarer Aufgaben

- 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 Invalidierung des Cache-Inhalts
 - Studien zeigen **dramatische Zunahme der WCET** [1]
→ Abhängig von den Eigenschaften der Hardware!

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

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



1

Kosten durch Verdrängung (engl. *preemption costs*)

→ Die Probleme 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 → **Synchronisation** im Mehrkernsystem notwendig



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

→ Die Probleme 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 ~ **Synchronisation** im Mehrkernsystem notwendig

■ Indirekte Kosten

- Wiederaufsetzen / -füllen der Seitentabelle
- Dislokation von Cacheinhalten (engl. *cache evictions*) zwischen Ausführungsrunden
- ⚠ Ggf. Herstellen der **Cachekohärenz** (engl. *cache coherency*)
- ⚠ Kommunikation zwischen Kernen/Sockeln



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

⚠ Diese Kosten entstehen nur in Mehrkernsystemen



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

⚠ Diese Kosten entstehen nur in Mehrkernsystemen

■ Direkte Kosten

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



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 Cachekoherenz, Kommunikation



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 Cachekoherenz, Kommunikation

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



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





Probleme der (**unkontrollierten**) Prioritätsumkehr (siehe VII/11) 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
- Wovon hängt die **Blockierungszeit** (s. VII/40) ab?
- Längster kritischer Abschnitt aller Betriebsmittel?
 - Maximale Verzögerung durch höherpriore Aufgaben auf einem Kern?





Probleme der (**unkontrollierten**) Prioritätsumkehr (siehe VII/11) 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
- Wovon hängt die **Blockierungszeit** (s. VII/40) ab?
- Längster kritischer Abschnitt aller Betriebsmittel?
 - Maximale Verzögerung durch höherpriore Aufgaben auf einem Kern?



Gesucht sind Verfahren, welche:

- Kerne nicht unnötig ungenutzt lassen (\neq NPCS VII/20)
- Sich **ausschließlich** auf die Ausführungszeit der kritischen Abschnitte beziehen (\neq Prioritätsvererbung VII/25)





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

- Eine direkte Erweiterung des PCP (s. VII/25) für Einkernsysteme
- Entfernte Blockierung als Funktion der Ausführungszeit kritischer Abschnitte



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

- Eine direkte Erweiterung des PCP (s. VII/25) für Einkernsysteme
→ 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 ↳ Synchronisation durch klassisches PCP
- Globale Betriebsmittel werden von Aufgabe auf verschiedenen Kernen genutzt



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

- Eine direkte **Erweiterung** des PCP (s. VII/25) für Einkernsysteme
→ **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 ↳ 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 höchstpriore unabhängige Aufgabe T_H
→
$$\hat{\Pi}_i = P_{T_H} + 1 + \max(P_{T_i} | T_i \text{ nutzt } R_i)$$



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

- Eine direkte **Erweiterung** des PCP (s. VII/25) für Einkernsysteme
→ **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 ↗ 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 höchstpriore unabhängige Aufgabe T_H
→ $\hat{\Pi}_i = P_{T_H} + 1 + \max(P_{T_i} | T_i \text{ nutzt } R_i)$

3 Betriebsmittel werden Kernen zugewiesen und nur dort ausgeführt

- Ausführung entfernter cs_i auf Ebene der Prioritätsobergrenze $\hat{\Pi}_i$ (→ Vererbung)



Beispiel: Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme

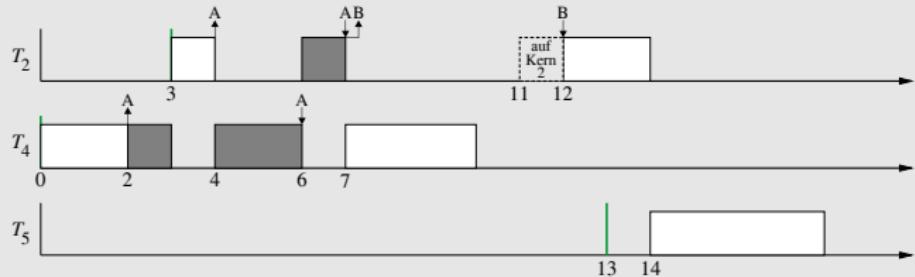
Kern 1

Allokation

$R_A = \blacksquare$

(lokales BM: T_2 & T_4)

T_2, T_4, T_5



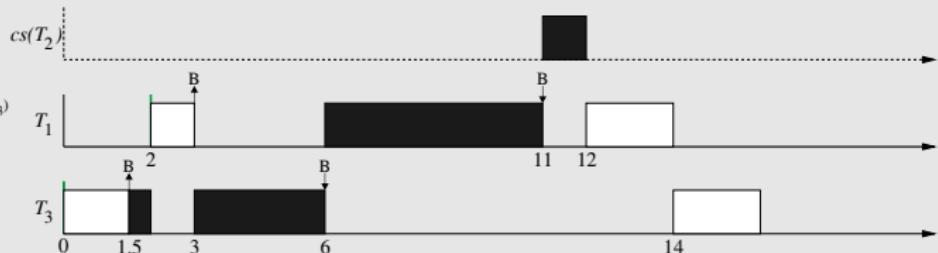
Kern 2

Allokation

$R_B = \blacksquare$

(globales BM: T_1, T_2, T_3)

T_1, T_3



bis t_6 Normaler Ablauf mit lokalen Betriebsmitteln auf Kern 1 & 2



Beispiel: Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme

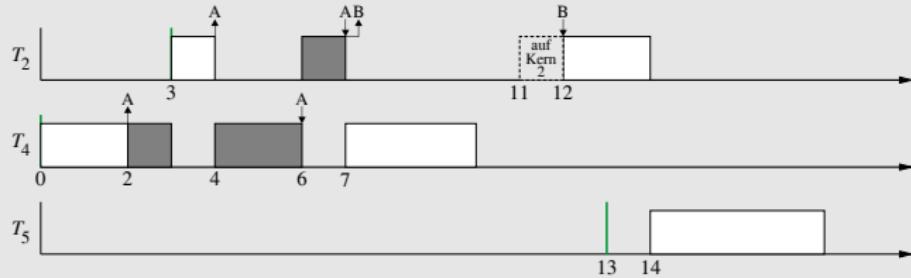
Kern 1

Allokation

$R_A = \blacksquare$

(lokales BM: T_2 & T_4)

T_2, T_4, T_5



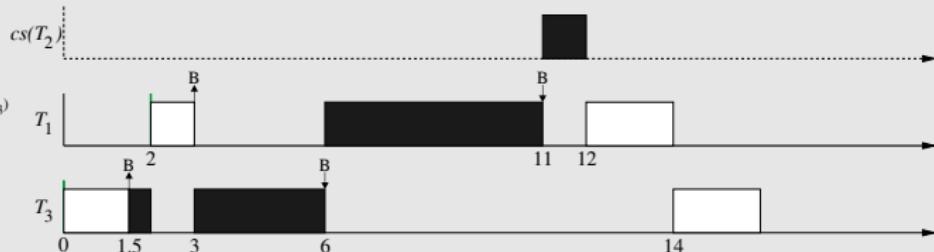
Kern 2

Allokation

$R_B = \blacksquare$

(globales BM: T_1, T_2, T_3)

T_1, T_3



bis t_6 Normaler Ablauf mit lokalen Betriebsmitteln auf Kern 1 & 2

t_6 T_2 fordert R_B (globales BM) an \leadsto Suspendierung von T_2 auf Kern 1



Beispiel: Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme

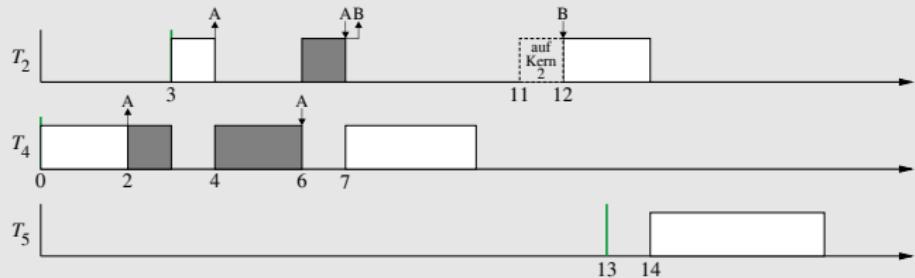
Kern 1

Allokation

R_A =

(lokales BM: T_2 & T_4)

T_2, T_4, T_5



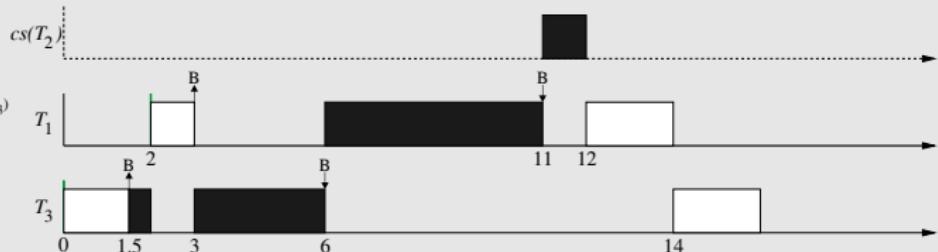
Kern 2

Allokation

R_B =

(globales BM: T_1, T_2, T_3)

T_1, T_3



bis t_6 Normaler Ablauf mit lokalen Betriebsmitteln auf Kern 1 & 2

t_6 T_2 fordert R_B (globales BM) an \leadsto Suspendierung von T_2 auf Kern 1

t_{11} R_B wird von T_1 freigegeben $\leadsto T_2$ erhält den entfernten Aufrufer $\hat{\Pi}_A$ auf Kern 2



Beispiel: Prioritätsobergrenzen für Mehrkernsysteme

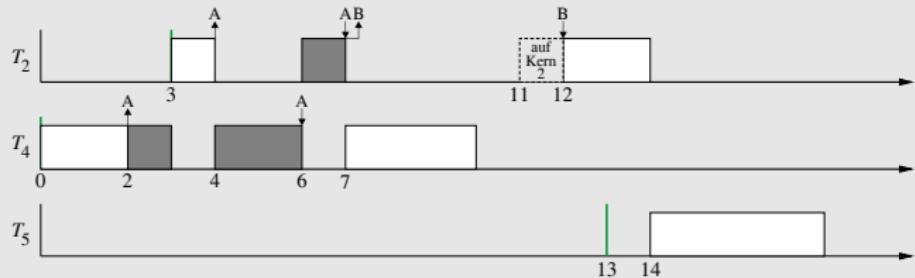
Kern 1

Allokation

$R_A = \blacksquare$

(lokales BM: T_2 & T_4)

T_2, T_4, T_5



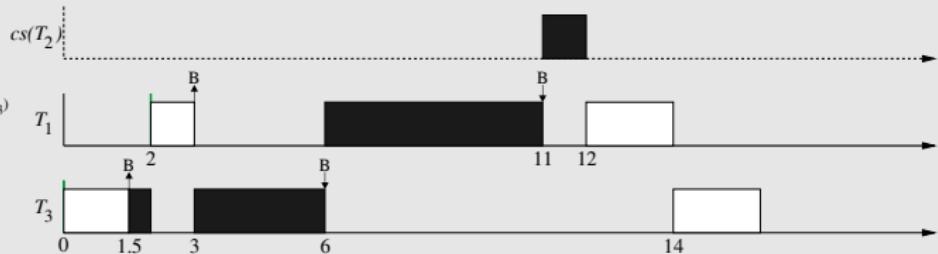
Kern 2

Allokation

$R_B = \blacksquare$

(globales BM: T_1, T_2, T_3)

T_1, T_3



bis t_6 Normaler Ablauf mit lokalen Betriebsmitteln auf Kern 1 & 2

t_6 T_2 fordert R_B (globales BM) an \leadsto Suspendierung von T_2 auf Kern 1

t_{11} R_B wird von T_1 freigegeben $\leadsto T_2$ erhält als entfernter Aufrufer $\hat{\Pi}_A$ auf Kern 2

t_{11} cs von T_2 wird auf Kern 2 mit $P_{\hat{\Pi}_A}(t)$ ausgeführt



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



- Mehrkernechtzeitsysteme sind die Zukunft
 - Leistungssteigerung durch Parallelisierung
- Ablaufplanung ist eine Herausforderung
 - Wissen aus Einkernsystemen im Allgemeinen nicht übertragbar
 - Zeitliche Anomalien → 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



■ 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

