

# Echtzeitbetriebssysteme

Oliver Jack

Ernst-Abbe-Hochschule Jena  
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Sommersemester 2025



**Ernst-Abbe-Hochschule Jena**  
University of Applied Sciences

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Lernziele

- Kenntnis von Grundbegriffen der Echtzeitplanung
- Kenntnis von Präzedenzsystemen
- Kenntnis von Plänen (Schedules) und Planungsstrategien

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Annahmen

Die Ablaufgeschwindigkeit der physikalischen Vorgänge im technischen Prozess bestimmt notwendige Reaktionszeiten des Rechners und legt Antwortzeiten fest.

Es treten periodische und spontane Anforderungen (Zeitpunkte, Signale, Alarmer), harte und weiche Zeitbedingungen auf.

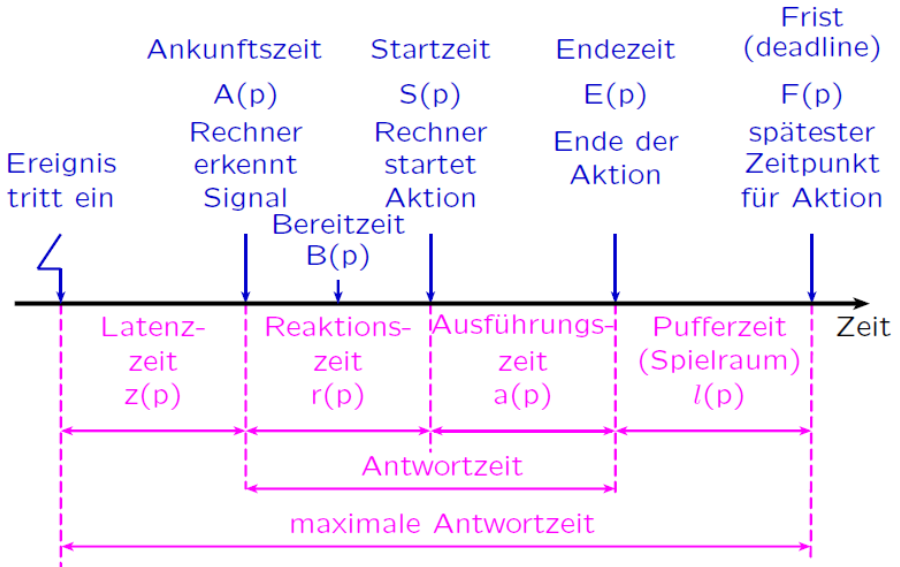
# Planung für Prozessoren und Betriebsmittel

## Klassifikation

- statische / dynamische Planung
- explizit / implizite Planung
- offline / online Planung



# Zeitablauf eines Ereignisses im Prozess $p$



# Bezeichnungen

- Großbuchstaben: Zeitpunkte
- Kleinbuchstaben: Zeitdauern
- Reaktionszeit und Ausführungszeit abhängig von der Umgebung, z. B. von anderen wichtigeren Prozessen
- Latenzzeit: u. a. Verzögerungen durch lokale Hardware, Übertragung über Netze
- Bereitzeit: Der Prozess darf vor seiner Bereitzeit nicht gestartet werden, da z. B. dann erst benötigte Daten verfügbar; in der Regel  $B(p) = A(p)$

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

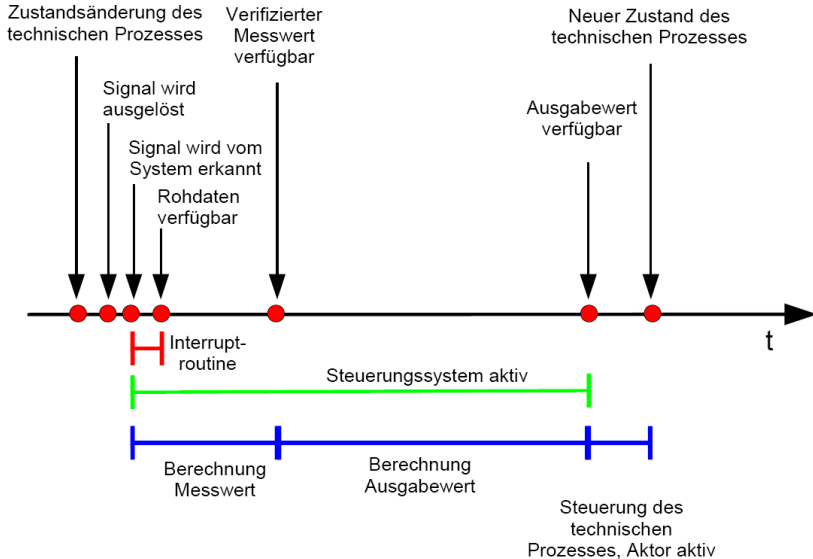
## 5 Zusammenfassung

# Forderungen an Echtzeitplanung

- A priori zeigen, dass stets Zeitrandbedingungen erfüllt, d. h.  
 $\forall p : E(p) \leq F(p)$
- Einplanung nicht nur der CPU, sondern auch anderer Betriebsmittel
- Zeitbedingungen einhalten bzgl. paralleler Vorgänge (Rechenprozesse)
- Berücksichtigung von Kausalzusammenhängen (Synchronisation, Vorranggraphen, Präzedenzsysteme)
- Einhalten von Zeitbedingungen bei der Verteilung von Information (Kommunikation, gemeinsames Führungsziel)
- Präemptive Prozessorzuteilung

Nicht trivial, da technische Systeme vielfach komplex und schwer überschaubar

# Beispiel technischer Prozess



# Dimensionierung der Rechnerleistung

## Aufstellen der Worst Case-Analyse

- Bedarf aus bekannten periodischen Anforderungen
- Bedarf aus erwarteten spontanen Anforderungen
- Zuschlag von 100% oder mehr zum Auffangen von Lastspitzen

## Unterschied zu konventionellen Betriebszielen

- keine maximale Auslastung des Prozessors,
- keine Durchsatzoptimierung,
- Abläufe sollten determiniert abschätzbar sein.

# Weitere Bezeichnungen

Algorithmen zur korrekten Zuteilung von Rechenleistung bei mehreren zu bearbeitenden Aktionen (Rechenprozessen)  $P_1, P_2, \dots, P_n$  müssen für jeden Prozess  $P_i$  beinhalten:

- $F(p_i)$  spätester Zeitpunkt (Frist) für Antwort an technischen Prozess
- $B(p_i)$  Bereitzeitpunkt (frühester Startzeitpunkt)
- $a(p_i)$  Gesamtausführungszeit

# Weitere Bezeichnungen

Weitere wichtige Größen, die von der aktuellen Zeit  $t$  abhängig sind:

- $a(p_i, t)$   
Restausführungszeit des Prozesses  $P_i$  zur Zeit  $t$ ; wobei  
 $a(p_i, B(p_i)) = a(p_i)$   $a(p_i, F(p_i)) = 0$ , falls Prozess zeitgerecht beendet
- $\Delta t(p_i, t)$   
Zeitspanne bis zur Frist des Prozesses  $P_i$ ; wobei  $\Delta t(p_i, t) = F(p_i) - t$
- $l(p_i, t)$   
Zur Zeit  $t$  noch verfügbarer **Spielraum** für Prozess  $P_i$ :  
 $l(p_i, t) = \Delta t(p_i, t) - a(p_i, t)$   
falls:  $l(p_i, t) < 0 \rightarrow P_i$  kann nicht rechtzeitig fertiggestellt werden  
Echtzeitforderung verletzt!



# Annahmen

- Laufzeit  $a(p_i)$  von Programmen bei Echtzeitumgebung bekannt, da Aufgaben und Aufgabenprofile festgelegt (Analyse des Codes, Messungen)
- Ggf. Präzedenzen der Aktionen  $P_i$  beachten (z. B.  $P_i$  muss vor  $P_j$  ausgeführt werden)

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

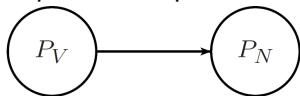
## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Präzedenzsysteme

- Folgen von untereinander abhängigen Aktionen (z. B. **pipes**)
- Bereitzeiten, Antwortzeiten oder Fristen ergeben sich evtl. erst aus vorherigem Ablauf
- Beispiel für Graph-Darstellung



Vorgänger

Nachfolger

- Formel-Notation  $p_V \prec p_N$

# Beispiel

$$a(p_V) = 1$$

$$F(p_V) = 3$$

$$B(p_V) = 0$$

$$\rightarrow \Delta t(p_V, 0) = 3$$

$$a(p_N) = 3$$

$$F(p_N) = 5$$

$$B(p_N) = 0$$

$$\rightarrow \Delta t(p_N, 0) = 5$$

Falls bei  $P_V$  die Frist  $F(P_V)$  gerade noch eingehalten wird, kann der Nachfolgeprozess nicht rechtzeitig fertig werden.

Bei der Planung mit Präcedenzsystemen muss also berücksichtigt werden, dass auch Folgeprozesse noch rechtzeitig fertig werden

# Verfahren zur Planung von Präzedenzsystemen

Es wird ein normalisiertes Präzedenzsystem  $PS'$  anstelle des ursprünglichen Präzedenzsystems  $PS$  eingeführt

## Normalisierung (Durchführung zur Zeit $t$ )

- $a'(p_i) = a(p_i)$  und  $a'(p_i, t) = a(p_i, t)$
- $F'(p_i, t) = \begin{cases} F(p_i) & : N(p_i) = \emptyset \\ \min \left( F(p_i, \min_{q \in \mathcal{N}(p_i)} (F'(q) - a(q, t))) \right) & : \text{sonst} \end{cases}$
- wobei  $\mathcal{N}(p_i)$  die Menge der unmittelbaren Nachfolger von  $p_i$  ist.

Rekursive Berechnung, beginnend mit Prozessen ohne Nachfolger im Präzedenzgraphen

# Normalisierung zu $B'(p_i)$

- Hängen die Bereitzeiten von externen Vorgängen ab, die unabhängig vom Scheduling der Prozesse sind, dann gilt  $B'(p_i) = B(p_i)$
- Hängen die Bereitzeiten von der Beendigung vorheriger Prozesse ab, dann ist  $B'(p_i)$  abhängig vom konkreten Scheduling.
- Ähnlich wie in der Netzplantechnik lassen sich früheste und späteste Start-Termine für die Prozesse angeben. Diese sind aber für das Scheduling ohne Bedeutung, da die konkreten Präcedenzen berücksichtigt werden müssen.

# Satz

Ein Präzedenzsystem ist nur dann planbar, falls das zugehörige normalisierte PS' planbar ist, d. h. es dafür einen zulässigen Plan gibt.

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung



# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Pläne

## Phasen der Planung

- 1 Test auf Einplanbarkeit (feasibility check)
- 2 Planberechnung (schedule construction)
- 3 Umsetzung auf Zuteilung im Betriebssystem (dispatching)

## Gesucht

Plan mit aktueller Start- und Endezeit für jede Aktion  $P_i$

# Pläne

Darstellung z. B. als nach der Zeit geordnete Liste von Tupeln  $(P_i, S(P_i), E(P_i), BM)$ ; wobei  $BM$  die Menge der benötigten Betriebsmittel (entfällt, wenn nur eines geplant wird)

Falls Prozesse unterbrochen werden: mehrere Tupel je  $P_i$  mit Anfangs- und Endzeitpunkten von aktiven Intervallen

# Begriffe für Planung

## Zulässiger Plan

Ein Plan, bei dem alle Prozesse einer Prozessmenge eingeplant werden und dabei keine Präzedenzrestriktionen und keine Zeitanforderungen verletzt werden

## Optimales Planungsverfahren

Verfahren ist optimal, wenn es für jede Prozessmenge unter den gegebenen Randbedingungen einen zulässigen Plan findet, falls ein solcher existiert

# Begriffe für Planung

## Statische Planung

- Erfordert Kenntnis aller Prozesse  $P_i$  und von  $B(p_i)$ ,  $a(p_i)$  und  $F(p_i)$
- Abgeschlossenes System
- Exakte Algorithmen gehören in diese Gruppe

## Dynamische Planung

- Unvorhergesehen eintreffende Aktionen (Prozesse)
- Unbekannte Prozessparameter
- Keine Gesamtoptimierung

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

- 1 Lernziele dieser Vorlesung
- 2 Grundbegriffe
  - Annahmen und Bezeichnungen
  - Anforderungen
  - Präzedenzen
- 3 **Planen**
  - Pläne
  - **Strategien**
- 4 Eigenschaften von Plänen
  - Bewertung
  - Anomalien
- 5 Zusammenfassung

# Grundstrategien zur Prozessbearbeitung

## Präemptives (unterbrechbares) Abarbeiten

- Aktionen (Prozesse) haben Prioritäten
- Prioritäten statisch oder dynamisch berechnet
- Ausführung einer Aktion wird sofort unterbrochen, sobald Aktion mit höherer Priorität eintrifft
- unterbrochene Aktion wird an der Unterbrechungsstelle fortgesetzt, sobald keine Aktion höherer Priorität ansteht
- typisch für Echtzeitaufgaben (mit Ausnahme von Programmteilen, die zur Sicherung der Datenkonsistenz nicht unterbrochen werden dürfen)
- Nachteil: häufiges Umschalten reduziert Leistung

# Grundstrategien zur Prozessbearbeitung

## Nichtpräemptives (ununterbrechbares) Abarbeiten

- Eine begonnene Aktion wird zu Ende ausgeführt, selbst wenn während der Ausführung Aktionen höherer Dringlichkeit eintreffen
- z. B. Schreiben in Druckerpuffer, Schließen eines Ventils
- Nachteil: evtl. Versagen (zu hohe Reaktionszeit) des Systems beim Eintreffen “unvorhergesehener” Anforderungen



# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

## 1 Lernziele dieser Vorlesung

## 2 Grundbegriffe

- Annahmen und Bezeichnungen
- Anforderungen
- Präzedenzen

## 3 Planen

- Pläne
- Strategien

## 4 Eigenschaften von Plänen

- Bewertung
- Anomalien

## 5 Zusammenfassung

# Bewertung von Plänen

- Performanz von Planungsalgorithmen (Scheduling-Algorithmen) wird durch Kostenfunktionen auf der Prozess-/Task-Menge bestimmt.
- In der Regel gilt es, diese Kosten zu minimieren.
- Minimiert werden z. B. die **mittlere Antwortzeit**, die **Gesamtausführungszeit**, die **maximale Verspätung**.

# Bewertung von Plänen

- Mittlere Antwortzeit (Average response time)

$$\bar{t}_r := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E(p_i) - A(p_i))$$

- Gesamtabschlusszeit (Total completion time)

$$t_c := \max_i E(p_i) - \min_i A(p_i)$$

- Gewichtete Summe der Abschlusszeiten (Weighted sum of completion times)

$$t_w := \sum_{i=1}^n w_i E(p_i)$$

Die Gewichte  $w_i$  geben für jeden Prozess die Wichtigkeit einer fristgerechten Ausführung an.

# Bewertung von Plänen

- Maximale Verspätung (Maximum lateness)

$$L_{\max} = \max_i (E(p_i) - F(p_i))$$

- Maximale Zahl verspäteter Tasks (Maximum number of late tasks)

$$N_{\text{late}} := \sum_{i=1}^n \text{miss}(E(p_i))$$

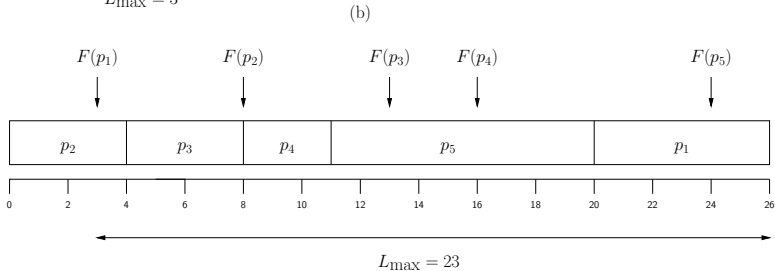
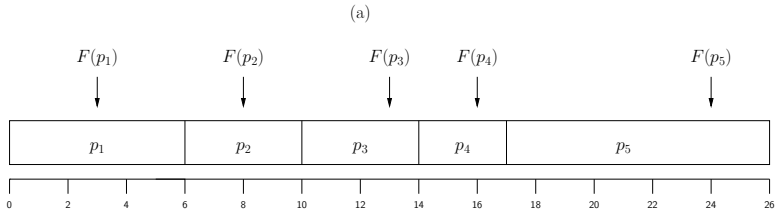
wobei

$$\text{miss}(E(p_i)) := \begin{cases} 0 & : \text{ falls } E(p_i) \leq F(p_i) \\ 1 & : \text{ sonst} \end{cases}$$

# Bewertung von Plänen

- Das Performanzmaß für einen Scheduling-Algorithmus bestimmt wesentlich die Performanz des Echtzeitsystems.
- Eine geeignete Wahl des Performanzmaßes hängt von der spezifischen Anwendung ab.
- Die mittlere Antwortzeit ist bei Echtzeitanwendungen meist nicht relevant.
- Die Minimierung der Gesamtabschlusszeit ist ebenfalls bei Echtzeitanwendungen selten zielführend.
- Die gewichtete Summe der Abschlusszeiten ist bei Echtzeitanwendungen relevant, falls einzelne Tasks wichtiger für das System sind als andere.
- Maximale Verspätung kann bei Echtzeitanwendungen in der Entwurfsphase relevant sein.

# Beispiel Schedule



# Beispiel Schedule

- Minimierung der maximalen Verspätung minimiert nicht generell die maximale Zahl verspäteter Tasks!
- Plan (a) minimiert die maximale Verspätung, aber alle Tasks sind verspätet, d. h. überschreiten ihre Frist.
- Plan (b) hat eine größere maximale Verspätung, aber vier von fünf Tasks sind vor ihrer Frist beendet.



# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

- 1 Lernziele dieser Vorlesung
- 2 Grundbegriffe
  - Annahmen und Bezeichnungen
  - Anforderungen
  - Präzedenzen
- 3 Planen
  - Pläne
  - Strategien
- 4 **Eigenschaften von Plänen**
  - Bewertung
  - **Anomalien**
- 5 Zusammenfassung

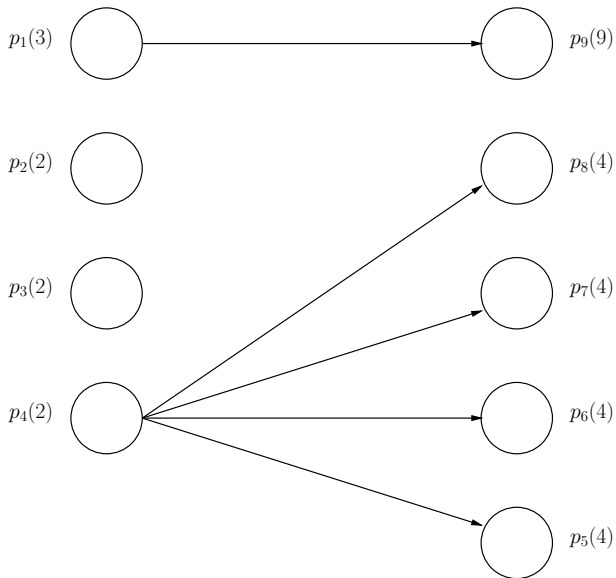
# Scheduling Anomalien

## Satz:

If a task set optimally scheduled on a multiprocessor with some priority assignment, a fixed number of processors, fixed execution times, and precedence constraints, then increasing the number of processors, reducing execution times, or weakening the precedence constraints can increase the schedule length.

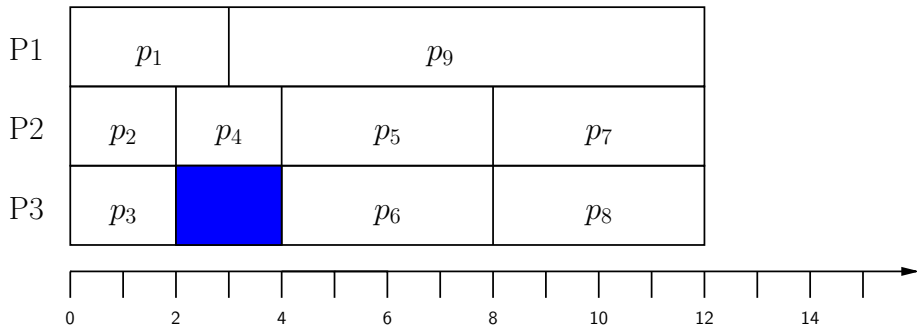
R.L. Graham. Bounds in the performance of scheduling algorithms. In *Computer and Job Scheduling Theory*, pp. 165–227. John Wiley and Sons, 1976

# Scheduling Anomalien


$$\text{prio}(p_i) < \text{prio}(p_j) \forall i < j$$

Zahlen in Klammern:  $a(p_i)$

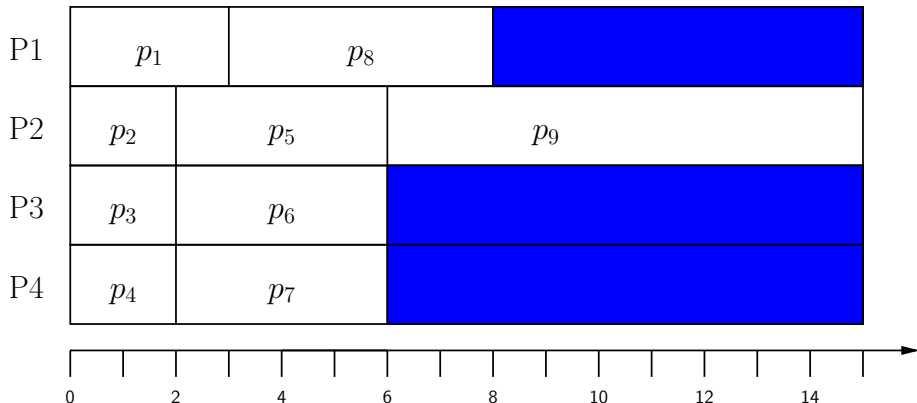
# Scheduling Anomalien



Optimaler Plan für drei Prozessoren

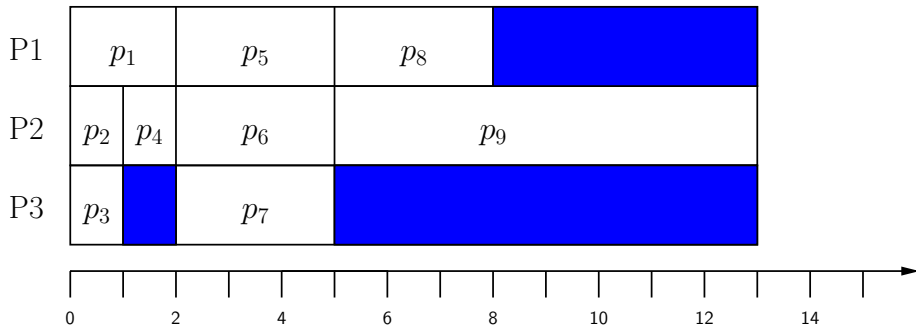
- Bedeutung  $\text{prio}(p_i)$ : kleiner Wert entspricht hoher Priorität.
- Einplanung: Prozesse hoher Priorität vor Prozessen niedriger Priorität.
- Einplanung: Präzedenzen einhalten.

# Scheduling Anomalien



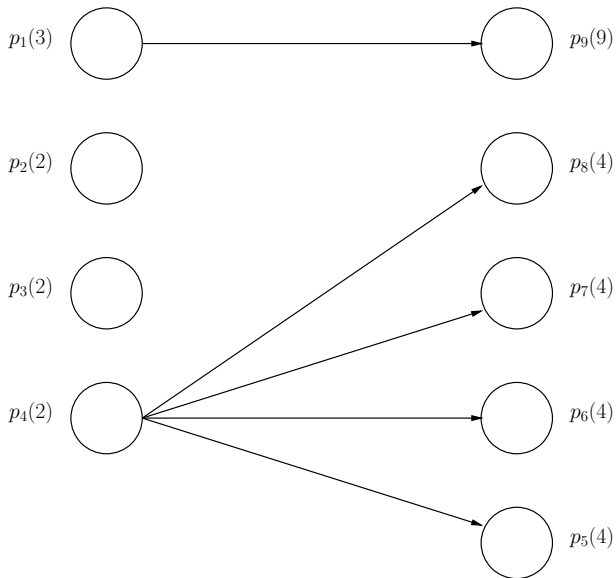
Plan für vier Prozessoren: Erhöhung der Gesamtabschlusszeit um drei Einheiten!

# Scheduling Anomalien



Plan für drei Prozessoren mit Ausführungszeiten jedes Tasks um eine Einheit reduziert: Erhöhung der Gesamtabschlusszeit um eine Einheit!

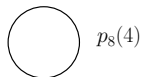
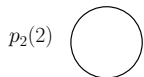
# Scheduling Anomalien



$$\text{prio}(p_i) < \text{prio}(p_j) \forall i < j$$

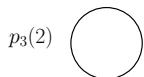
Zahlen in Klammern:  $a(p_i)$

# Scheduling Anomalien



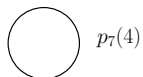
$\text{prio}(p_i) < \text{prio}(p_j) \forall i < j$

Präzedenzen entfernt

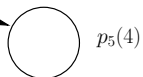


$p_4 \prec p_7$

$p_4 \prec p_8$

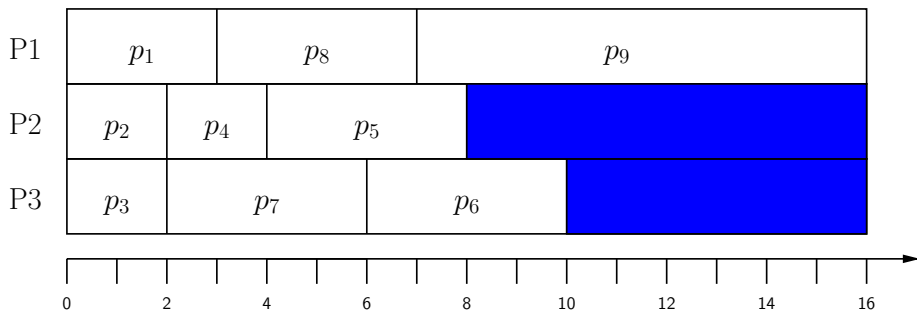


Zahlen in Klammern:  $a(p_i)$



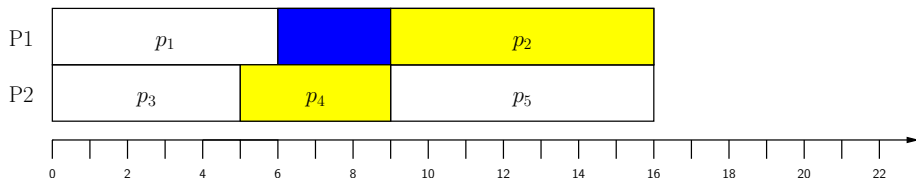


# Scheduling Anomalien



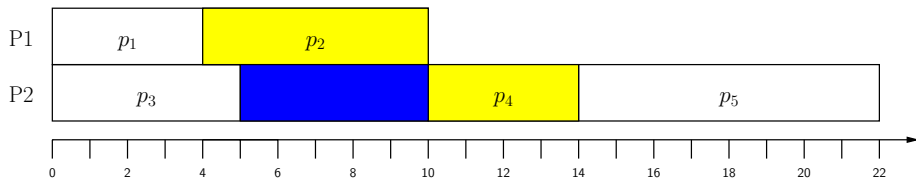
Plan für drei Prozessoren mit entfernten Präzedenzen: Erhöhung der Gesamtabschlusszeit um vier Einheiten!

# Scheduling Anomalien bei exklusiv genutzten Betriebsmitteln



- Prozesse  $p_2$  und  $p_4$  benutzen ein Betriebsmittel, das nur exklusiv genutzt werden kann..
- Präzedenzen:  $p_1 \prec p_2$ ,  $p_4 \prec p_5$ .

# Scheduling Anomalien bei exklusiv genutzten Betriebsmitteln



- Prozesse  $p_2$  und  $p_4$  benutzen ein Betriebsmittel, das nur exklusiv genutzt werden kann.
- Reduktion der Ausführungszeit von  $p_1$  um zwei Einheiten: Erhöhung der Gesamtabschlusszeit um fünf Einheiten!

# Lerneinheit 4. Echtzeitplanung

- 1 Lernziele dieser Vorlesung
- 2 Grundbegriffe
  - Annahmen und Bezeichnungen
  - Anforderungen
  - Präzedenzen
- 3 Planen
  - Pläne
  - Strategien
- 4 Eigenschaften von Plänen
  - Bewertung
  - Anomalien
- 5 Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- **Ablaufplanung** ist ein zentraler Dienst von Echtzeitbetriebssystemen.
- Wichtige Größen für die Echtzeitplanung sind **Bereitzeitpunkt**, **Frist** und **Gesamtausführungszeit**.
- Planung erfolgt häufig in **Präzedenzsystemen**.
- Planung kann **statisch** und **dynamisch** erfolgen.
- Prozessbearbeitung kann **präemptiv** und **nicht-präemptiv** erfolgen.
- **Performanz** von Planungsalgorithmen wird durch **Kostenfunktionen** auf der Prozess-/Task-Menge bestimmt.