Quantitative Methoden

Betriebssysteme

Claude-J. Hamann
TU Dresden

Problem und Gegenstand

- **Problem**

  Erfüllen von QoS-Anforderungen mit zeit- bzw. größen-beschränkten Ressourcen

- **Gegenstand**

☛ ***Scheduling***

basierend auf

- deterministischen Modellen
- probabilistischen Modellen

Hauptspeicherverwaltung

Externspeicherzugriff

☞ ***Echtzeitsysteme***

Literatur

WECK, G.: Prinzipien und Realisierung von Betriebssystemen.
B. G. Teubner 1983.

- PFLUG, G.: Stochastische Modelle in der Informatik.
B. G. Teubner 1986.

- DOWDY, L.; C. LOWERY: P.S. to Operating Systems.
Prentice-Hall, 1993.

STANKOWIC, J. A., et al.: Implications of Classical Scheduling Results for Real-Time Systems. In: Computer 6/1995.

- LIU, J. W. S.: Real-Time Systems. Prentice-Hall, 2000

Scheduling – Einführung

- **Begriff**

  Vorgehensweise zur ***Einplanung*** von Aufgaben, die durch ein aktives Betriebsmittel zu bearbeiten sind.

  Entscheidungsstrategien, die die Reihenfolge festlegen, in der sich Prozesse um den Prozessor (allgemeiner: um ein Betriebsmittel) bewerben müssen bzw. in der sie aus einer Warteschlange (für das Betriebsmittel) ausgewählt werden.

- **Aufgabe der Schedulingtheorie**

  Entwicklung und Bewertung **(!)** derartiger Strategien

Scheduling – Einführung

- **Ziele**

hohe Prozessorauslastung	η/U	
größtmöglicher Durchsatz		$\hat{\approx}$
minimale Gesamtbearbeitungszeit	t_g	

geringe durchschnittliche Verweilzeit	$\bar{t}_v$	
minimale Antwortzeit		$\hat{\approx}$
garantierte Reaktionszeit		

Gerechtigkeit

- **Einordnung und Abgrenzung**

  Ablaufplanung (Teilgebiet der Operationsforschung)

  Prozeßauswahl (System-S.) – Prozessorzuteilung (Dispatching)

  Strategie – Algorithmus – Implementation

Scheduling – Einführung

- **Ablaufplan (Schedule)**

  zeitabhängige Zuordnung von Prozessen zu Prozessoren

  oft: graphische Darstellung der Prozessorzuteilung in Form eines GANTT-Diagramms

- **Planungseinheit**

  Prozeß – Thread – Job – Task – Auftrag – Vorgang – ...

- **Klassifikationsgesichtspunkte**

  Bearbeitung in Ein- / Mehrprozessorsystemen
  Bearbeitung ohne / mit Prozessorentzug
  Deterministische / probabilistische Modelle
  Echtzeitbedingungen

Scheduling – Deterministische Modelle

- **Modellannahmen**

  Gegeben:

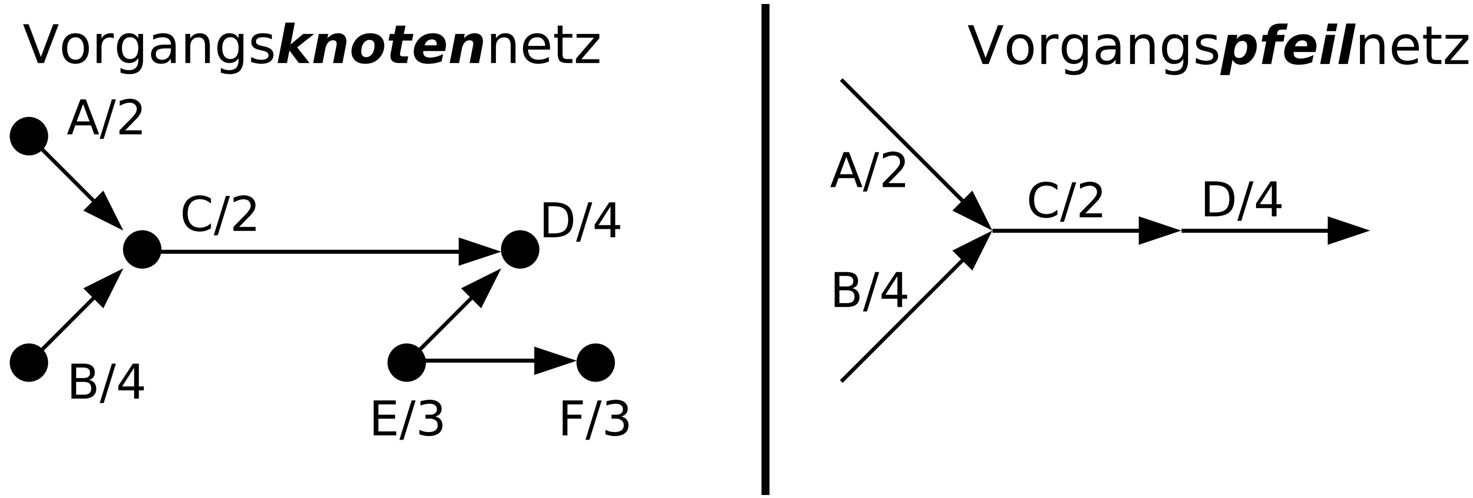
$J = \{J_{1,} \ldots, J_n\}$	Menge von Jobs
$R \subseteq J \times J$	Präzedenzrelation
$t: J \rightarrow \mathbb{R}^+$	Abbildung, wobei $t(J_i) =: t_i$

  - durch Messung oder Rechnung ermittelte tatsächliche (konstante) Ausführungszeit
  - auf Erfahrung beruhende mittlere Zeit
  - abgeschätzte maximal mögliche Ausführungszeit (WCET)

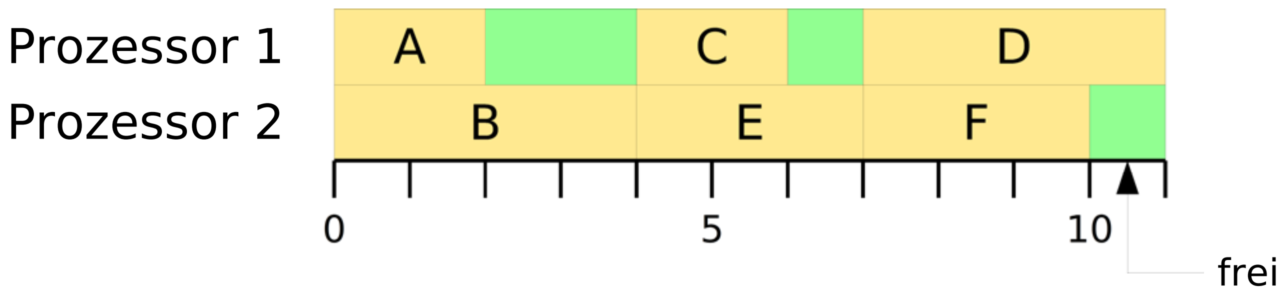
  Anwendungsbereich: (annähernd) konstantes Aufgabenprofil

Scheduling – Deterministische Modelle

- Graphische Darstellung



Möglicher Ablaufplan bei zwei Prozessoren:



Scheduling in 1-Prozessor-Systemen ohne Entzug

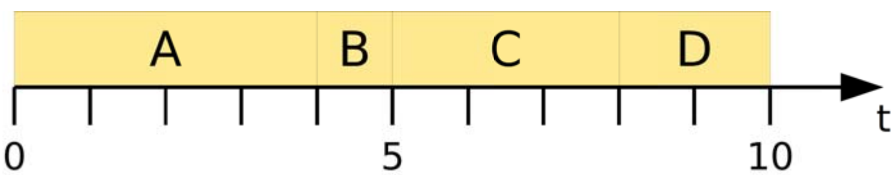
- **FIFO / LIFO**
- **SPT „Shortest Processing Time“**

  ist bei $R = \emptyset$ optimal bzgl. $\bar{t}_v \rightarrow$ Min!

Beispiel:

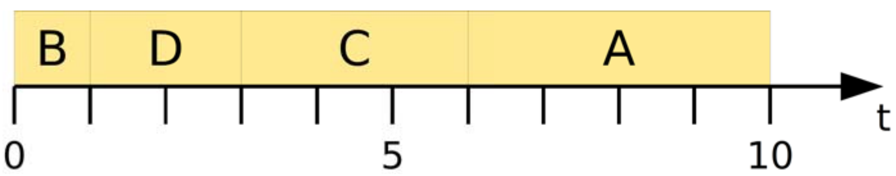
J_i	A	B	C	D
t_i	4	1	3	2

FIFO:



$$\bar{t}_w = \frac{1}{4}(0+4+5+8) = \frac{17}{4}$$

SPT:



$$\bar{t}_w = \frac{1}{4}(0+1+3+6) = \frac{10}{4}$$

Bei $R \neq \emptyset$ ist das Problem NP-vollständig!

Scheduling in 1-Prozessor-Systemen mit Entzug

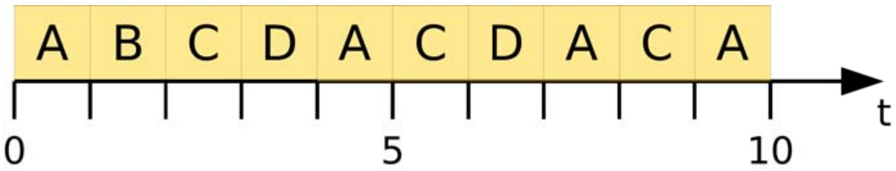
- **RR „Round Robin“**

  Prozeßwechsel mit konstantem Zeitquant Q

Beispiel:

J_i	A	B	C	D
t_i	4	1	3	2

$Q = 1$



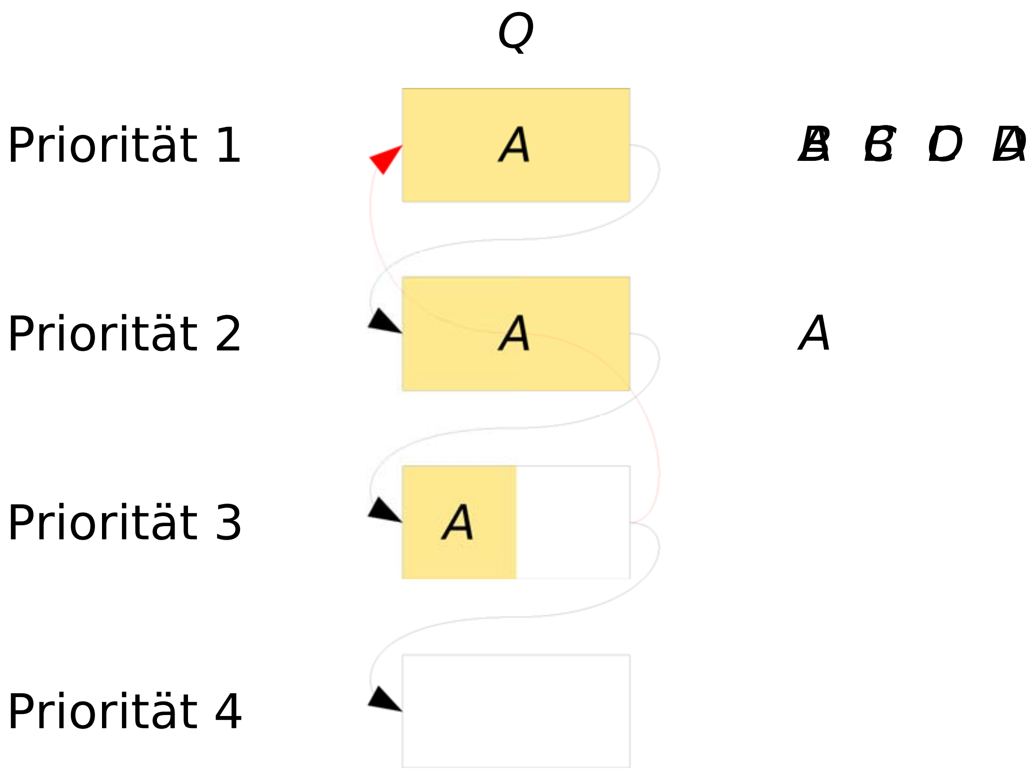
$$\bar{t}_w = \frac{1}{4}(6+1+6+5) = \frac{18}{4}$$

Problem: Größe von Q

Scheduling in 1-Prozessor-Systemen mit Entzug

- **MLF „Multilevel-Feedback“**

  Prozeßwechsel mit Zeitquant *Q* und Prioritäten



Scheduling in 1-Prozessor-Systemen mit Entzug

- **Rechenintensive vs. E/A-intensive Jobs**

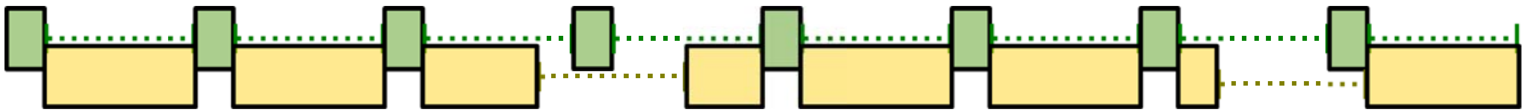
  Antwortzeit und Durchsatz abhängig von Priorität

A

B

Priorität(*A*) > Priorität(*B*)

Priorität(*B*) > Priorität(*A*)



Scheduling in Mehrprozessor-Systemen

m identische Prozessoren. Enumeration: Aufwand $O(e^{jobanzahl})$

- **Optimalitätskriterium** $\boldsymbol{t_g}$ **→ Min!**

  R bel.: polynomialer Algorithmus nur für $m = 2$, t_i = const. bekannt

  $R = \emptyset$: $m = 1$ trivial.

  $m > 1$: Approximation ***LPT***

  „Largest Processing Time“

- **Optimalitätskriterium** $\boldsymbol{\bar{t}_v}$ **→ Min!**

  $R = \emptyset$: SPT ist optimal (sonst NP-vollständig).

- **Scheduling mit Prozessorentzug**

  $R = \emptyset$:

$$t_{g,min} = max\left(\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} t_i, \max_i (t_i)\right)$$

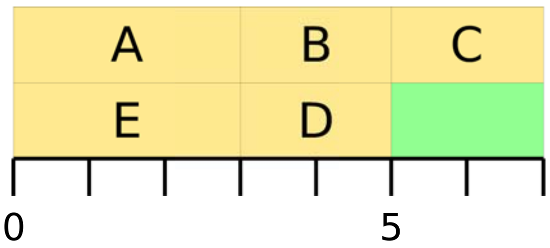
Scheduling in Mehrprozessor-Systemen

- **Beispiele**

  m = 2

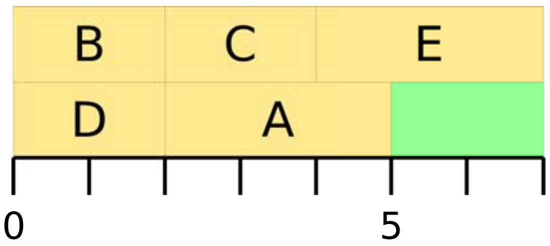
J_i	A	B	C	D	E
t_i	3	2	2	2	3

LPT:



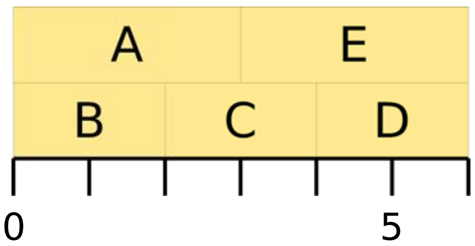
$t_g = 7 \quad \bar{t}_w = \frac{11}{5}$

SPT:



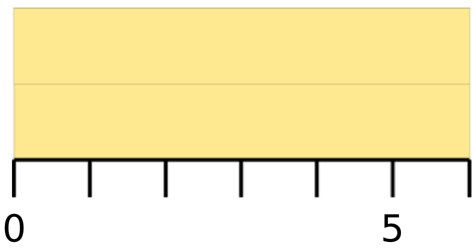
$t_g = 7 \quad \bar{t}_w = \frac{8}{5}$

Opt. bzgl. t_g und $\bar{t}_w$



$t_g = 6 \quad \bar{t}_w = \frac{9}{5}$

Entzug:



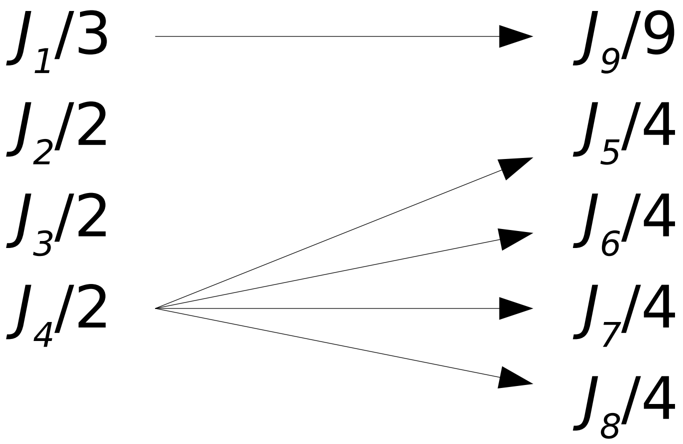
$t_g = 6 \quad \bar{t}_w = \frac{8}{5}$

Mehrprozessor-Anomalien

Für eine Menge von Jobs sei bei gegebenen Bearbeitungszeiten, Prioritätszuordnungen, Prozessoranzahl und Präzedenzrelation ein Ablaufplan gefunden worden. Dann kann eine der folgenden Aktionen zu einer ***Verlängerung*** der Gesamtbearbeitungszeit t_g führen:

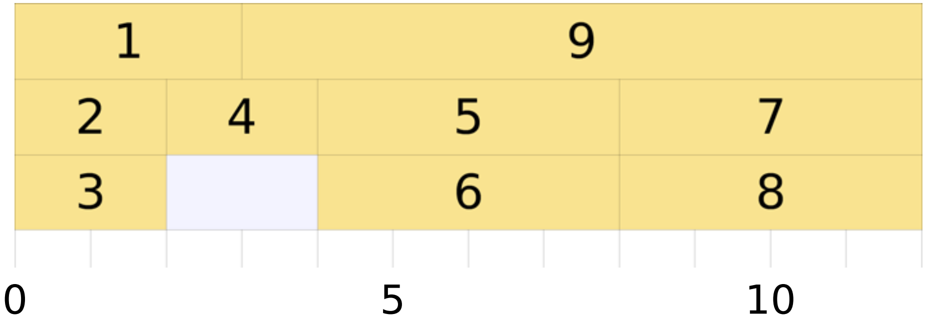
- Erhöhung der Prozessoranzahl
- Verringerung der Bearbeitungszeiten
- Abschwächung der Präzedenzrelation
- Veränderung der Prioritäten.

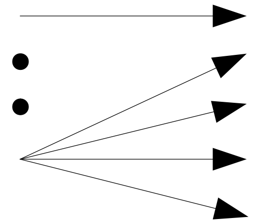
Beispiel. $m = 3$; R:



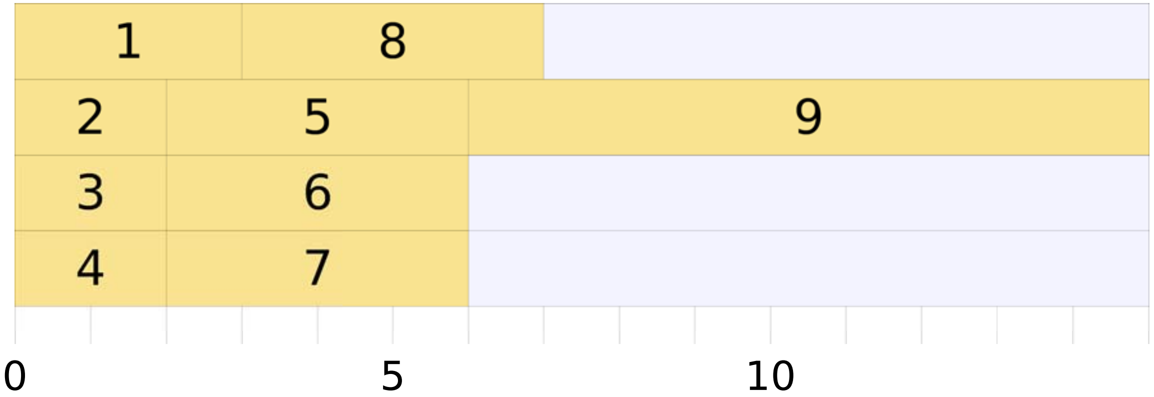
$\mathrm{pr}(J_i) \succ \mathrm{pr}(J_j)$ für $i < j$

Mehrprozessor-Anomalien



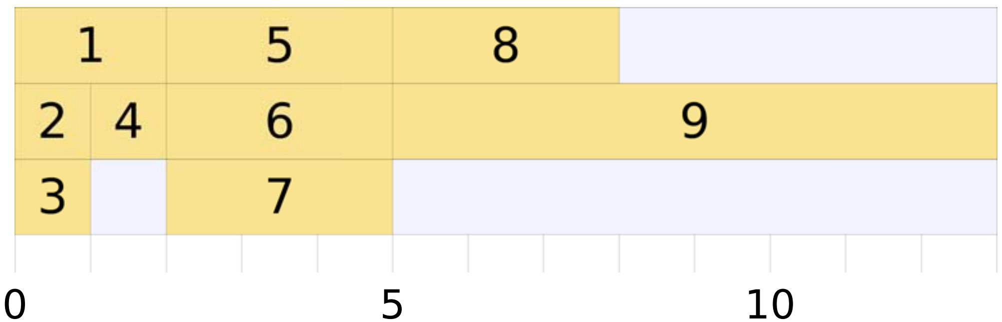


$t_g = 12$



Erhöhung Anzahl Prozessoren:

$t_g = 15$



Verkürzen aller Bearbeitungszeiten um 1 Einheit:

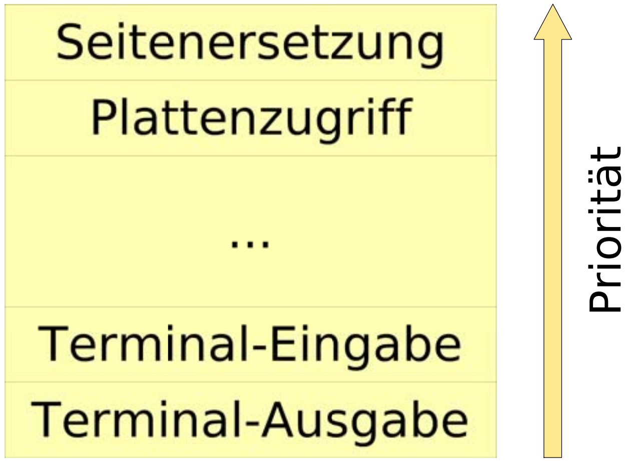
$t_g = 13$

Aufheben der Abhängigkeiten $J_4 \rightarrow J_5$, $J_4 \rightarrow J_6$: $t_g = 16$

Umordnen der Priorität: $J_1\ J_2\ J_4\ J_5\ J_6\ J_3\ J_9\ J_7\ J_8$: $t_g = 14$

Fallstudie: Unix (konzeptionell)

- **Statische Prioritäten im Kern-Modus**



→ gute Auslastung schneller E/A-Geräte

- **Dynamische Prioritäten im Nutzer-Modus**

  Priorität = f(Basis-Priorität, CPU-Nutzung, nice-Wert)

  → Bevorzugung interaktiver Anwendungen

Fallstudie: Linux

- **Prioritätsklassen / Scheduling-Strategien**

• SCHED_FIFO	keine Verdrängung!	Echtzeit
• SCHED_RR	zeitscheiben-basiert	
• SCHED_OTHER	dialogorientiert	Time-sharing

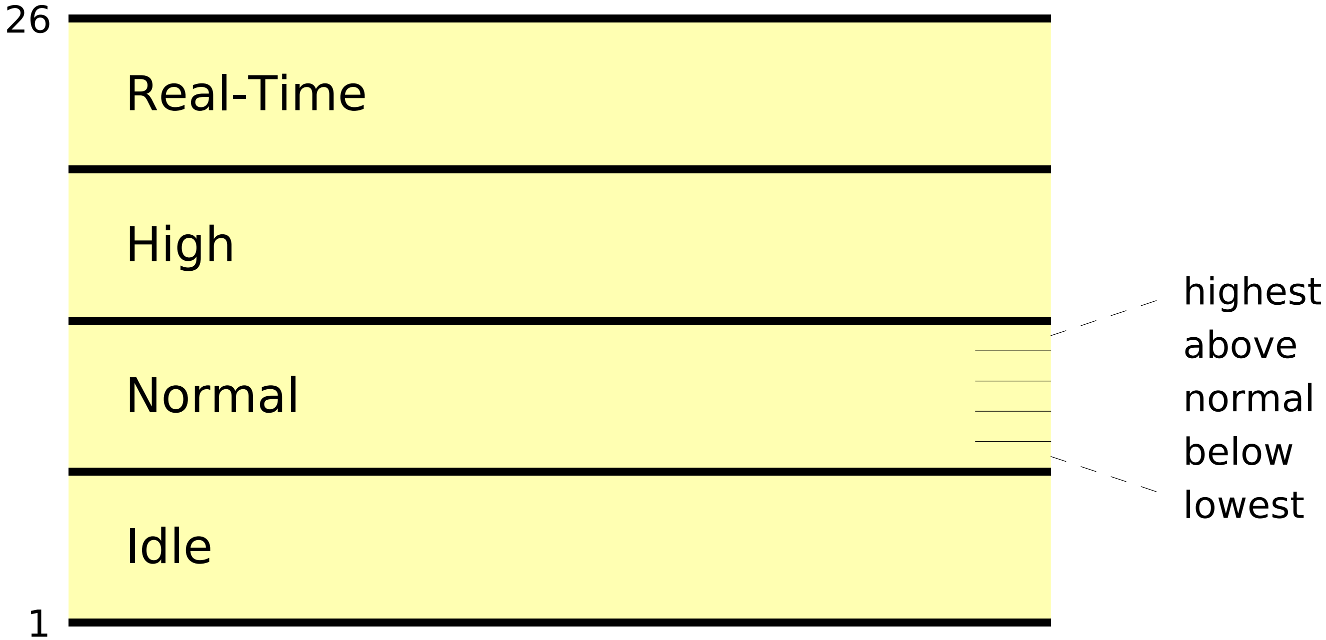
„Prioritäts-Bonus bzw. -Malus“

für E/A-intensive bzw. rechenintensive Jobs

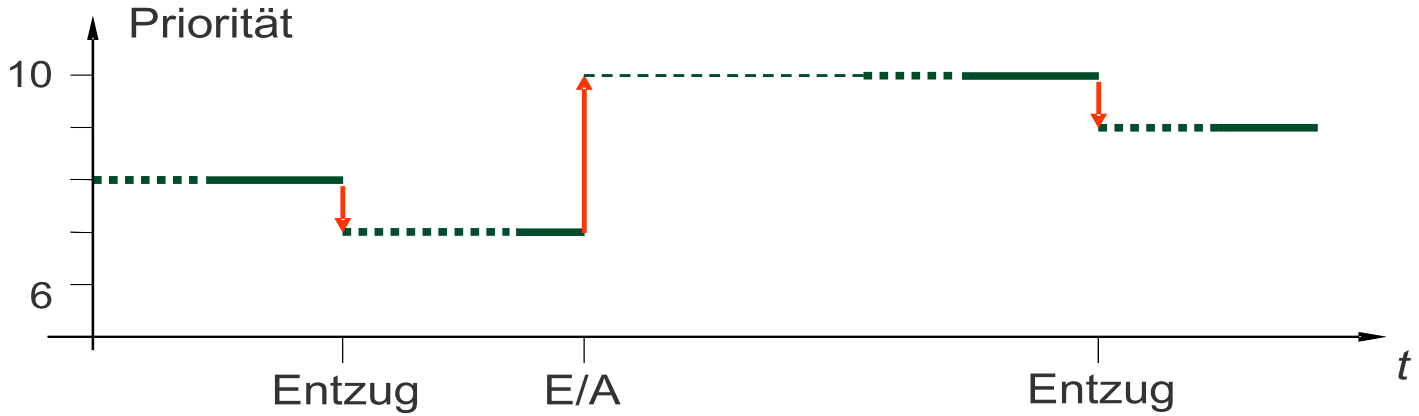
Basis: Messung der Blockierzeiten

Fallstudie: Windows

- Vier „Prioritätsbänder“ mit jeweils fünf Stufen



- Dynamische Priorität entsprechend E/A-Aktivität



Echtzeit-Scheduling – Grundbegriffe

- **Job**

  Planungseinheit für Scheduling

e	Ausführungszeit, Bearbeitungszeit	(execution time)
d	Zeitschranke, Frist	(deadline)
r	Freigabezeit, Bereitzeit	(release time)

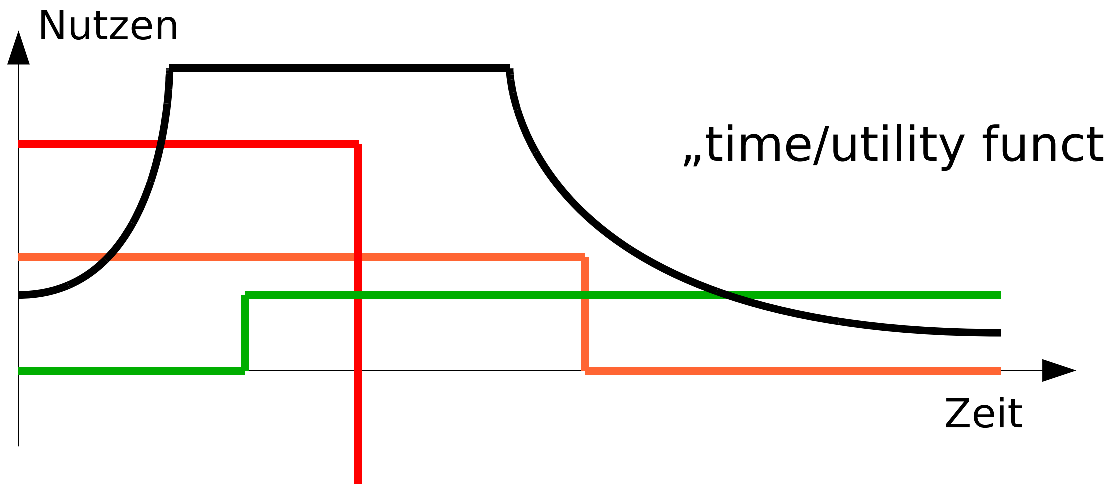
- **Task**

  Menge „zusammengehörender“ Jobs

  speziell: ***Jobnetz*** oder ***periodische Task***

- **Deadline**

  hart / weich



Echtzeit-Scheduling – Grundbegriffe

- **Schedule (Ablaufplan)**

  zeitliche Zuordnung von Jobs zu Prozessoren

  gültig (valid): Zuordnung verletzt keine der gegebenen Bedingungen

  ausführbar (feasible): Einhaltung aller Zeitschranken

- **Scheduling**
  - ***Einplanung:*** Vorgehen (Algorithmus), das bei gegebener Taskbeschreibung einen Ablaufplan bestimmt
  - ***Prozessor-Zuordnung:*** Auswahl eines Jobs durch Scheduler des Systems

- **Ressource (Betriebsmittel)**

  Prozessor, i.d.R. entziehbar (Kosten!)

  weitere, nicht entziehbare Ressourcen

Echtzeit-Scheduling – Grundbegriffe

- **Einplanbarkeit**

  Taskmenge ist ***einplanbar (schedulable, feasible)*** bei einem Scheduling-Algorithmus, wenn der Algorithmus einen ausführbaren Ablaufplan erzeugt

- **Admission (Zulassung)**

  Verfahren, das die Einplanbarkeit einer Taskmenge entscheidet

- **Optimalität (bzgl. Einplanbarkeit)**

  eines Scheduling-Verfahrens in einer Klasse $\mathfrak{C}$ von Verfahren:

  erzeugt für jede Taskmenge ***T*** einen ausführbaren Ablaufplan, sofern ***T*** überhaupt mit einem Verfahren aus $\mathfrak{C}$ eingeplant werden kann

Echtzeit-Scheduling – Grundbegriffe

- **Klassifikationsgesichtspunkte**
  - Scheduling für Jobnetze | periodische Tasks
  - Scheduling für periodische Tasks:

    zeitgesteuert (time driven)

    ereignisgesteuert (event driven)

      statische | dynamische Prioritäten

    nicht-periodische Tasks
  - Nutzung weiterer, nicht entziehbarer Betriebsmittel
  - Entziehbarkeit
  - Ein-/Mehrprozessor-Systeme

Echtzeit-Scheduling – Modellannahmen

- **Deterministisches Modell**

  jede Task T_i ist periodische Folge von Jobs, Periode p_i

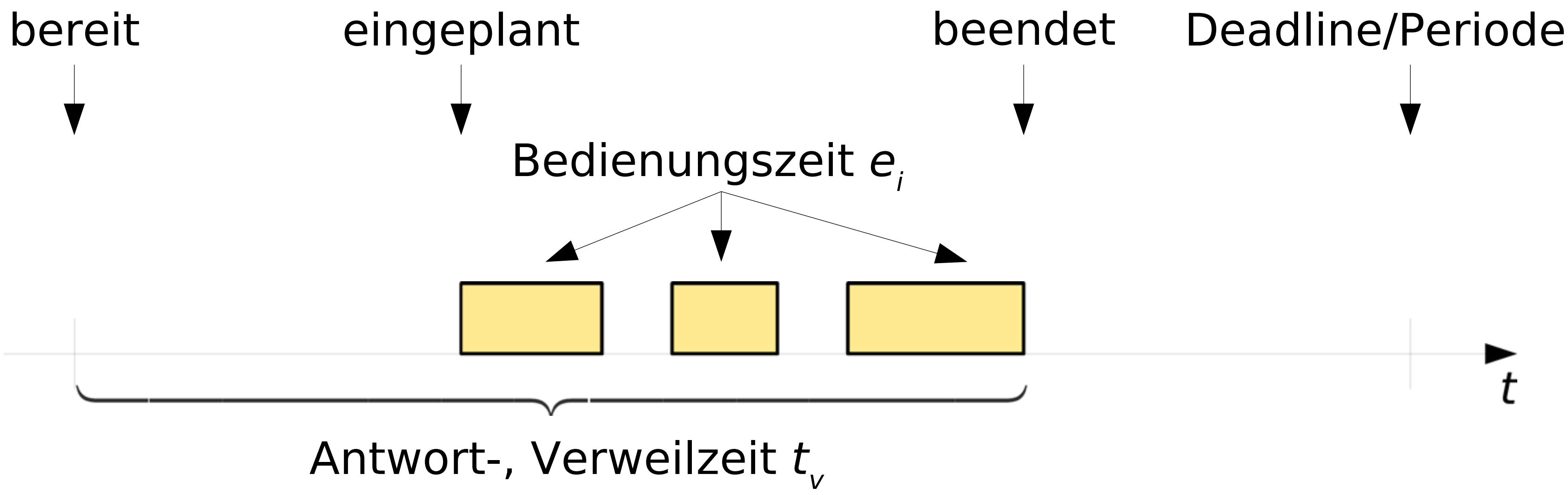
  Periode ist zugleich Zeitschranke (relative Deadline d_i)

  Bearbeitungszeit e_i ist konstant

  Prozessor ist entziehbar

  Tasks sind voneinander unabhängig („in Zeit und Raum“)

  System-Scheduling prioritätsbasiert



Echtzeit-Scheduling – weitere Begriffe

- **Hyperperiode**

$$H = \mathrm{kgV}(p_1, \ldots, p_n)$$

- **Harmonische Perioden**

$$p_i \leq p_j \quad \rightarrow \quad p_i \mid p_j \qquad\qquad \forall i,j = 1,\ldots,n$$

- ***Nicht-periodische Tasks***
  - *aperiodisch: Mindestabstand*
  - *sporadisch: beliebiger Abstand*

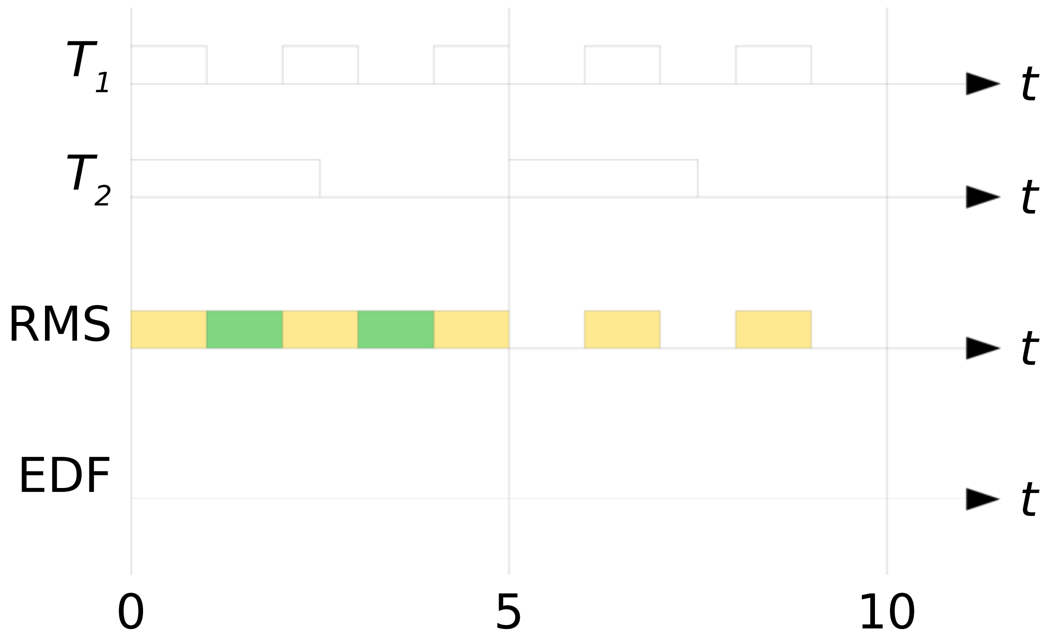
Echtzeit-Scheduling – Verfahren

- **RMS „Rate Monotonic Scheduling"**
  Statische Taskpriorität proportional zu Ankunftsrate

- **EDF „Earliest Deadline First"**
  Task mit nächstgelegener Deadline hat aktuell höchste Priorität

- **Beispiel**

T_1 hat höhere Priorität als T_2



Echtzeit-Scheduling – Eigenschaften

- **Optimalität bzgl. Einplanbarkeit**

  RMS ist optimal in der Klasse aller statischen, EDF in der Klasse aller dynamischen Scheduling-Algorithmen (in Einprozessor-Systemen für unabhängige, verdrängbare Tasks)

  Optimalität von RMS:

  Taskmenge *T* „irgendwie" einplanbar → *T* mit RMS einplanbar

- **Existenz eines Ablaufplans (Admission-Kriterium)**

  bei RMS, falls $\eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{p_i} \leq n \cdot (\sqrt[n]{2} - 1)$ ≈ 0,83 … 0,69 (ln 2)

  bei EDF genau dann, wenn $\eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{p_i} \leq 1$

Echtzeit-Scheduling – Ausblick: QAS

- **Motivation**
  - Architektor von DROPS – Dresden Real-Time OPerating System

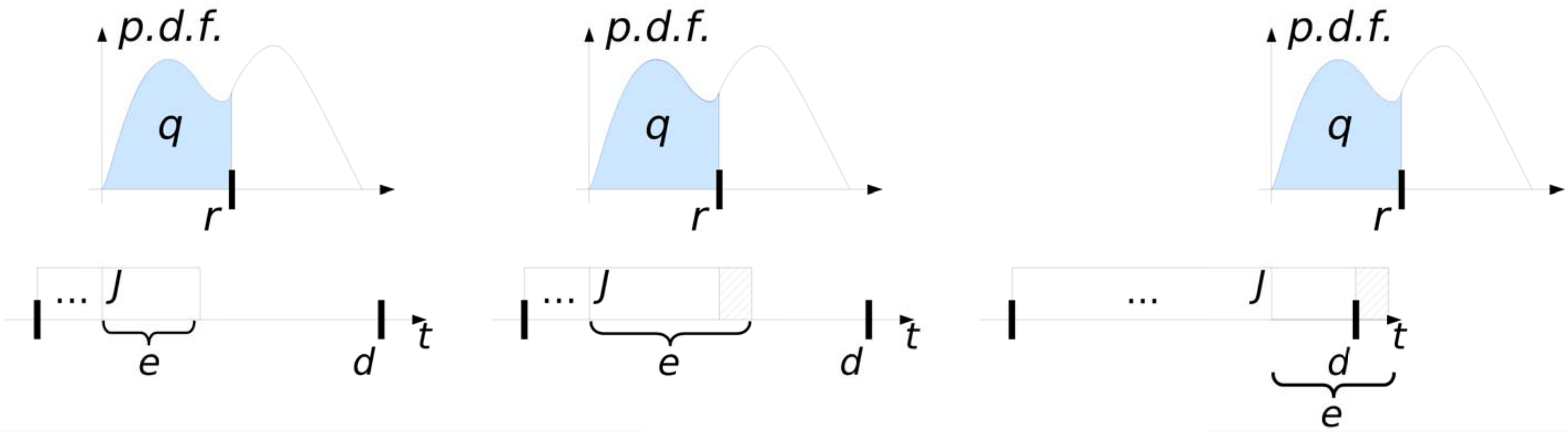
    Scheduling mit festen Prioritäten und Reservierungsprioritäten
  - Arbeitslast

    periodische, unabhängige Tasks mit „weichen“ Echtzeitbedingungen

    stark schwankender Ressourcenbedarf
  - Hintergrund

    Imprecise Computations, Statistical Rate Monotonic Scheduling

- **Idee**



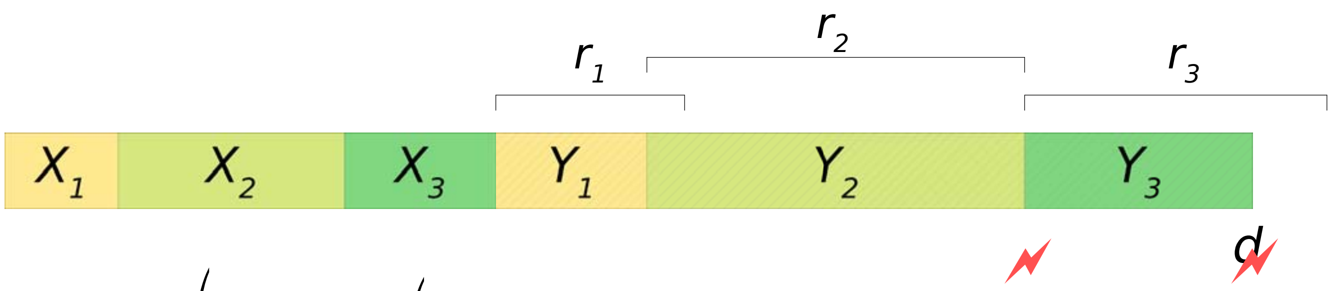
Echtzeit-Scheduling – Quality-Assuring Scheduling

- **Ausgangspunkt**

  Aufteilen der Jobs einer periodischen *Task* T_i in ***Pflichtteil*** X_i und ***Wahlteil*** Y_i (Qualität q_i: Anteil vollständig bearbeiteter Wahlteile)

- **Vorgehen**

  Scheduling auf der Basis statischer Reservierungsprioritäten



$$r_i = \min\left(r \in \mathbb{R} \,\middle|\, P\left(Y_i \le r \wedge \sum_{j=1}^{n} X_j + \sum_{k=1}^{i-1} \min(Y_k, r_k) + Y_i \le d \right)\right) \qquad (*)$$

- **Admission**

  (1) $\sum_{i=1}^{n} w_i \le d$ $\quad$ d: gemeinsame Deadline

  w_j: WCET des Pflichtteils von T_i

  (2) Das Gleichungssystem (*) ist lösbar mit $r_i \le d \;\; \forall i = 1,\ldots,n$

Scheduling - Probabilistische Modelle

- **Modellannahmen**

  Zu zufälligen Zeiten A_i (Ankunftszeit) treffen Anforderungen an den Scheduler in zufälligem Umfang B_i (geforderter Bedarf nach dem betrachteten Betriebsmittel, Bedienungszeit) ein.

  Anwendungsbereich: Interaktiver Betrieb, verteilte Systeme

- **Mathematisches Instrumentarium**

  Bedienungstheorie

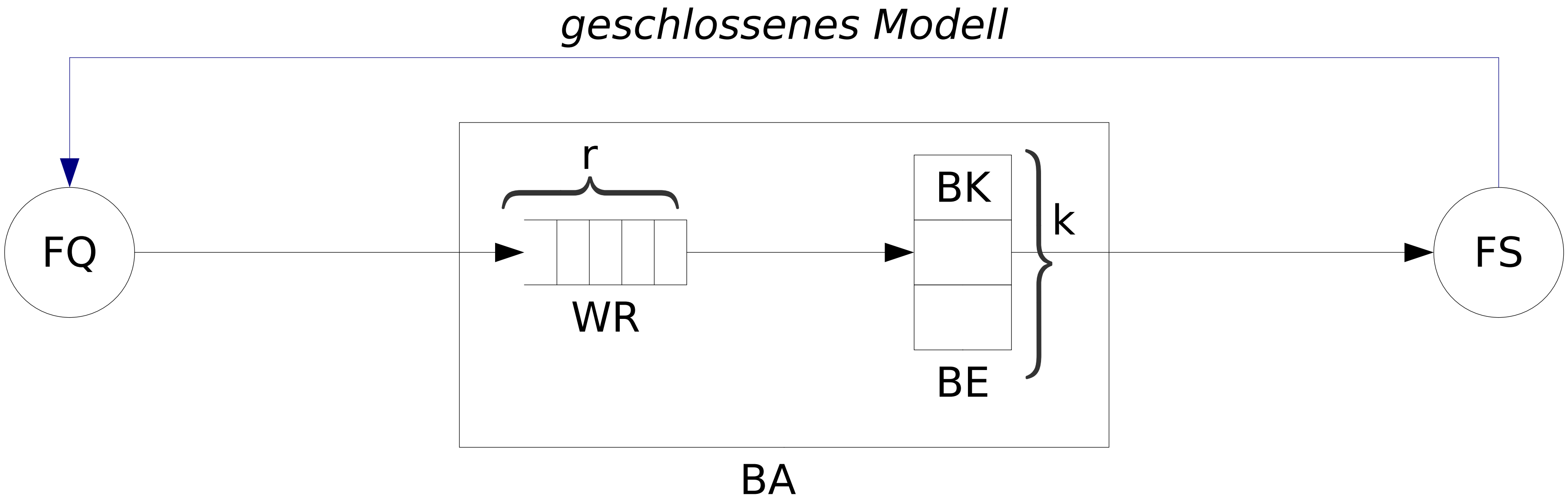
  Warteschlangentheorie

  Теория массого обслуживания

- **Historie**

1908	Erlang	Kopenhagener Telegrafenamt
1910	Palm	Mehrmaschinenbedienung
1940 ...1970	Kantorowitsch, Gnedenko, Kowalenko	
1965 ...1980	Kleinrock, Coffman, Denning	

Bedienungssysteme – Strukturbeschreibung



FQ: Forderungsquelle

FS: Forderungssenke

BA: Bedienungsanlage

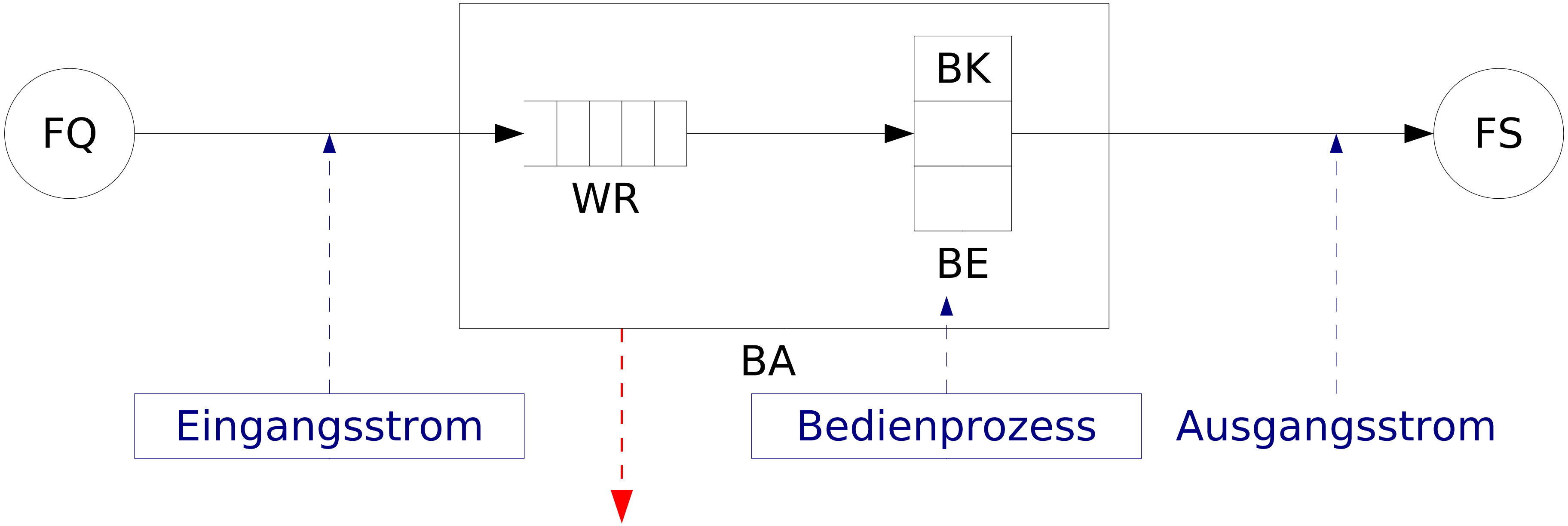
WR: Warteraum

BE: Bedienungseinrichtung

BK: Bedienungskanal

- **Strukturbeschreibung**
  - r: Größe des Warteraums
  - k: Anzahl Bedinungskanäle
  - Bedienungsstrategie !
  - offen/geschlossen

Bedienungssysteme – Lastbeschreibung



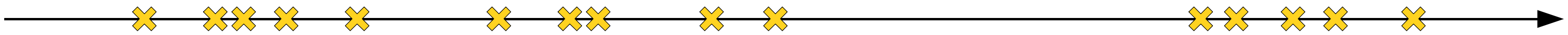
Ankunftszeit-abstand T_a

$\underbrace{\textbf{Wartezeit } T_w + \textbf{ Bedienungszeit } T_b}_{\textbf{Verweilzeit } T_v}$

- **Lastbeschreibung**
  - Ankunftsprozeß
  - Bedienungsprozeß

Bedienungssysteme – Prozeßbeschreibung

- **Ankunftsprozeß**



N_a zufällige Anzahl der pro Zeiteinheit eintreffenden Ford.

T_a zufällige Zeitdauer zwischen dem Eintreffen zweier Ford.

oft: *POISSONscher Ankunftsprozeß mit der Rate λ > 0:*

$$P(N_a = i) = \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda}, i \in \mathbb{N}$$ POISSON-Verteilung

$$P(T_a \le t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \ge 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$ Exponentialverteilung

$$\boxed{E(N_a) = \lambda = \frac{1}{E(T_a)}}$$ Eingangsstromintensität, Ankunftsrate

Bedienungssysteme - Prozeßbeschreibung

- **Bedienprozeß**

T_b zufällige Dauer der Bedienung einer Forderung

oft: T_b exponentiell verteilt, Parameter μ

- **Weitere Verteilungen**

ERLANG-Verteilung k-ter Ordnung, $k \in \mathbb{N}^+$

$$f(t) = \frac{\alpha^k t^{k-1}}{(k-1)!} \cdot e^{-\alpha t} \qquad (t \geq 0)$$

Hypo-Exponentialverteilung

$$f(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right) \qquad (t \geq 0)$$

Bedienungssysteme – Kurzbeschreibung

- **Kendallsche Notation**

  A/B/k/r

  - r: Warteraumkapazität, $r \geq 0$ / ∞
  - k: Anzahl der Bedienungskanäle, $k > 0$
  - B: Bedienprozess
  - A: Ankunftsprozess

  Häufige Werte für A,B:

M	Poisson-Prozess / exponentialvert. Zeit
E_k	Erlang-Verteilung k-ter Ordnung
D	deterministische Verteilung
G	allgemeiner Fall

- **Bedienungsstrategie**

  FIFO, LIFO, Random, Prioritäten, ...

- **Geschlossenes Modell**

  n: Anzahl der Forderungen (statt r)

Bedienungssysteme – Bewertungsgrößen

- **„Elementare“ Bewertungsgrößen**

$E(T_a)$ mittlerer Ankunftszeitabstand

$E(T_b)$ mittlere Bedienzeit

$$\lambda = \frac{1}{E(T_a)}$$ Ankunftsrate

$$\mu = \frac{1}{E(T_b)}$$ Bedienrate

$$\boxed{\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{E(T_b)}{E(T_a)}}$$

Verkehrswert (**Be**-lastung, Angebot)

Forderung: $\rho < k$ für nicht-kritischen Zustand

Bedienungssysteme – Bewertungsgrößen

- **Bewertungsgrößen i. e. S.**

N_w	Warteschlangenlänge
N_b	Anzahl der aktuell bedienten Forderungen
$N_v = N_w + N_b$	Anzahl der im System befindlichen Forderungen
T_w	Wartezeit
$T_v = T_w + T_b$	Verweilzeit

Für GI/G/k/∞-Systeme gilt: $\boxed{\mathrm{E}(T_v) = \mathrm{E}(N_v) \cdot \mathrm{E}(T_a)}$ (LITTLE)

Bedienungssysteme – Bewertungsgrößen

- **Grundlage**

  Zustandswahrscheinlichkeiten $p_i = \mathrm{P}(N_v = i) \quad i \in \mathbb{N}$

- **Allgemeines Vorgehen**

  Ermitteln des Zustandsgraphen

  Aufstellen der Zustandsgleichungen

  Lösen des Gleichungssystems

  Berechnen der Zustandswahrscheinlichkeiten

  Berechnen der Bewertungsgrößen

M/M/1/∞-System

- **Struktur**

  Eingangsstrom: POISSON-Prozess, Intensität λ

  Bedienungszeit: exponentiell verteilt, Parameter μ

  Bedienungsstrategie: FIFO, LIFO, gleichverteilt; ohne Entzug

  Verkehrswert $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$!

- **Zustandswahrscheinlichkeiten**

  $$p_i = \mathrm{P}(N_v = i) = \rho^i(1 - \rho) \qquad i \in \mathbb{N}$$

M/M/1/∞-System – Bewertungsgrößen

$$E(T_w) = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \qquad E(T_v) = E(T_w) + E(T_b) = \frac{1}{\mu(1-\rho)}$$

$$E(N_w) = \frac{\rho^2}{1-\rho} \qquad E(N_v) = E(N_w) + E(N_b) = \frac{\rho}{1-\rho}$$

$$E(T_w^2) = \begin{cases} \dfrac{2\rho}{\mu^2(1-\rho)^2} & \text{FIFO} \\[2ex] \dfrac{2\rho}{\mu^2(1-\rho)^3} & \text{LIFO} \\[2ex] \dfrac{2\rho}{\mu^2(1-\rho)^2\left(1-\frac{\rho}{2}\right)} & \text{RANDOM} \end{cases}$$

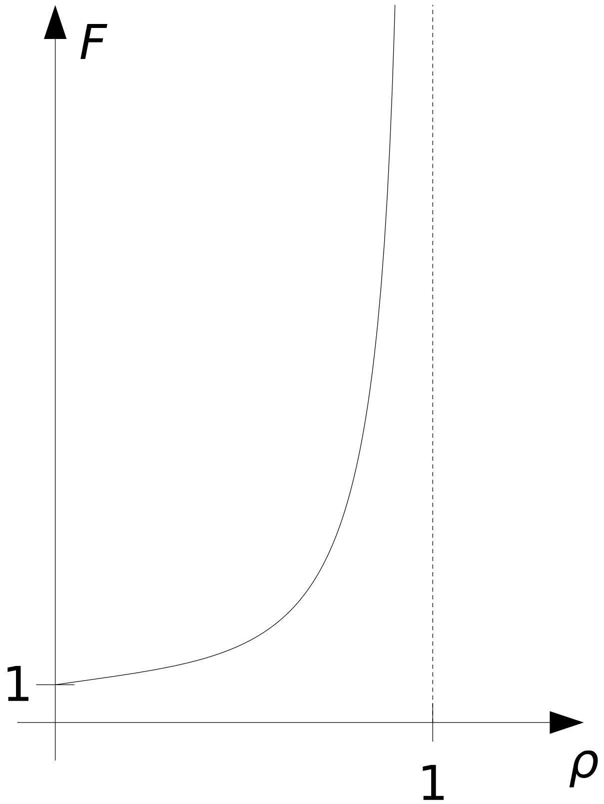
Wartezeit-Verteilung für M/M/1/∞-FIFO:

$$P(T_w \leq t) = 1 - \rho e^{-(\mu-\lambda)t} \qquad (t \geq 0)$$

M/M/1/∞-System – Systemverhalten

- **Verweilzeitfaktor**

$$F = \frac{E(T_v)}{E(T_b)} = \frac{1}{1-\rho}$$



ρ	0,4	→	0,44
F	1,67	→	1,79

ρ	0,9	→	0,94
F	10	→	16,7

ρ	0,9	→	0,99
F		→	

Weitere Standardmodelle

- **M/G/1/∞-System**

$$E(T_w) = \frac{\lambda \cdot E(T_b^2)}{2(1-\rho)}$$

- **M/M/*k*/∞-System**

$$E(N_w) = \frac{\rho^{k+1}}{(k-1)!(k-\rho)^2} \cdot p_0 \qquad \eta = \frac{\rho}{k}$$

$$p_0 = \left[\sum_{i=0}^{k-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^k}{(k-1)!(k-\rho)} \right]^{-1}$$

- **M/G/*k*/0-System**

$$p_V = p_k = \frac{\rho^k}{k!} \cdot p_0, \qquad p_0 = \left[\sum_{i=0}^{k} \frac{\rho^i}{i!} \right]$$

Bewertung von Scheduling-Verfahren

- **Bewertungsmaß und Strategien**

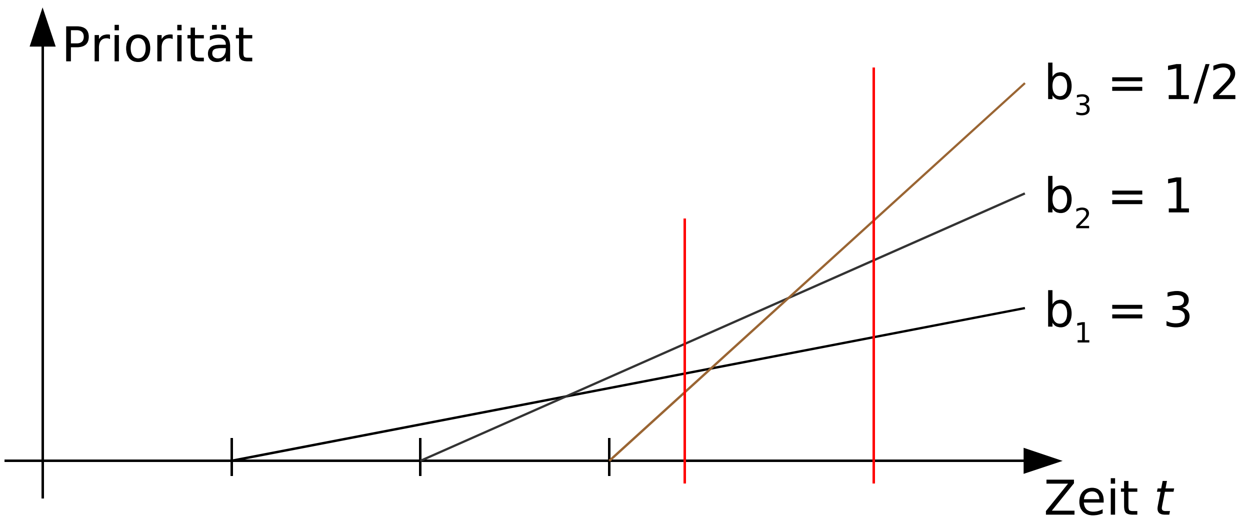
  Abhängigkeit der mittleren Wartezeit E(T_w) vom Bedienzeitwunsch *b* der Forderungen für die Strategien (ohne Entzug)

  FIFO – LIFO – Random

  SJN (SPT)

  HRN „Highest Response Ratio Next“

$$\text{Priorität} = \frac{\text{aktuelle Verweilzeit}}{\text{Bedienzeitwunsch}} = \frac{t - t_i}{b_i}$$



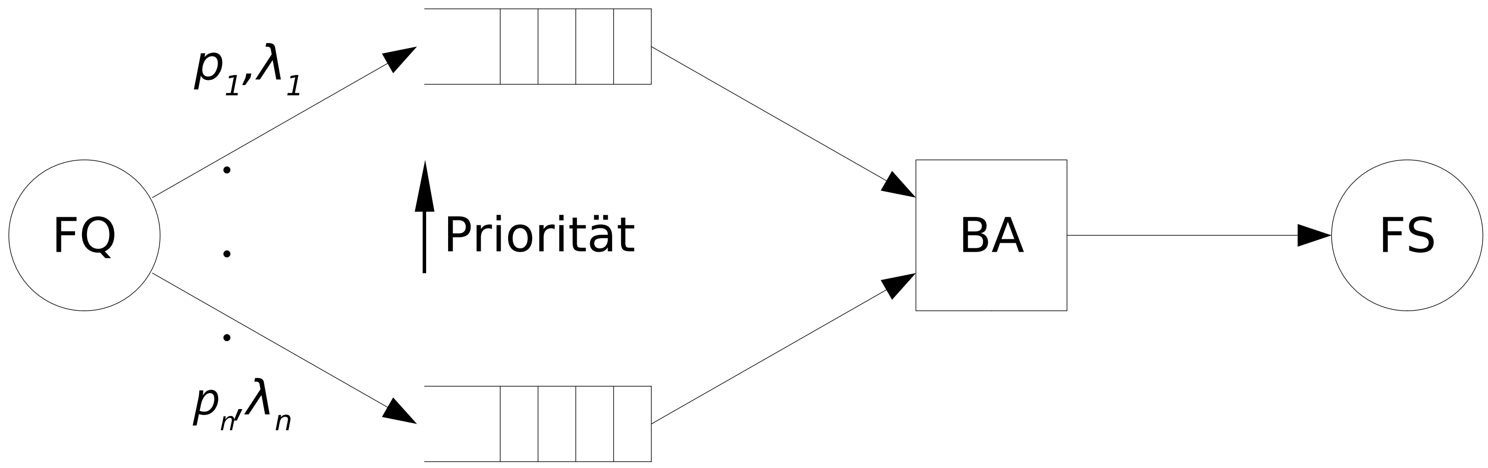
Bewertung von Scheduling-Verfahren

FEP Fixed External Priorities

Aufträge werden in Prioritätsklassen eingeordnet

innerhalb einer Klasse FIFO

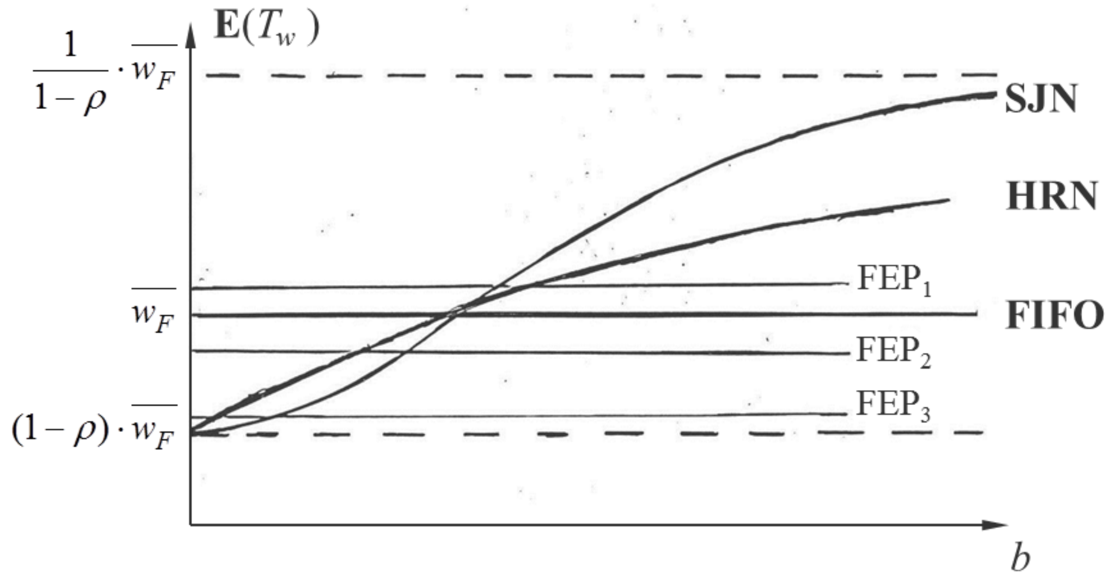
Bedienrate klassenunabhängig



- **Grundlage:** M/G/1/∞-System mit dynamischen Prioritäten

Bewertung von Scheduling-Verfahren

- **Ergebnisse**



FIFO: einfach. Gleichbehandlung aller Aufträge.

SJN: Bevorzugung kürzerer Aufträge.

$\bar{t}_w$ wird bei $R = \emptyset$ minimal, falls alle b bekannt.

HRN: größere Gerechtigkeit.

FEP: statisch. Prioritätszuordnung?

Ausblick: Speicherverwaltung

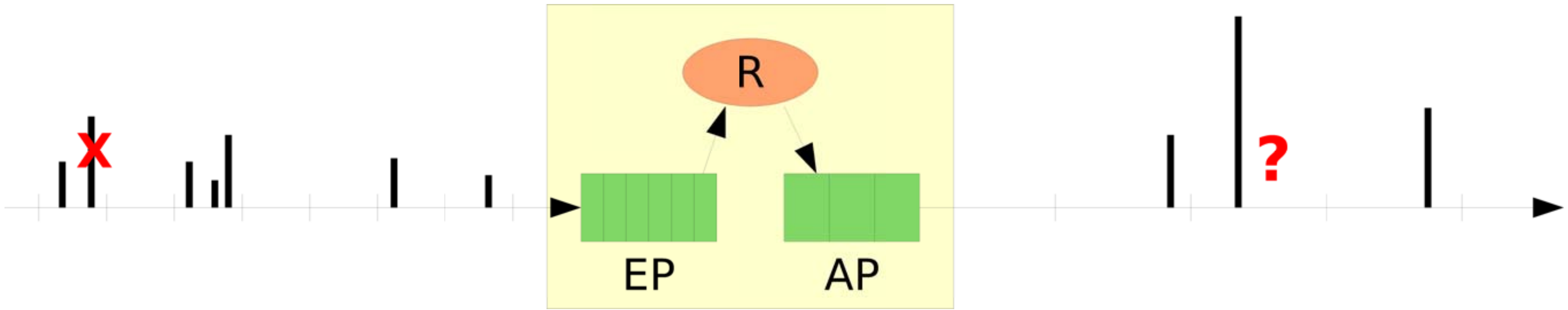
- **Bewertung von Speicher-Zuteilungsstrategien**
  - ***Segmentierter Speicher***

    Freispeicherlisten → externe Fragmentierung

    Auffüllen und Kompaktifizieren → Aufwand
  - ***Seitenorientierte Systeme***

    Arbeitsmengen → Fenstergröße

    statische Ersetzungsstrategien → Seitenfehlerrate
- **Pufferdimensionierung** !



Ausblick: Magnetplatte – Positionierabstand

k: Spuranzahl

D: Positionierabstand

Forderungsstrom POISSONSCH, Intensität λ

- **Bedienungsstrategie FIFO**

$$\boxed{E\,D_{FIFO} = \frac{k^2-1}{3k} \sim \frac{k}{3}}$$

- **Bedienungsstrategie SSTF (Shortest Seek Time First)**

$$E\,D_{SSTF} \sim \frac{k}{n+1}$$

n: Anzahl der wartenden Aufträge

- **Bedienungsstrategie SCAN *(Fahrstuhl-Algorithmus)***

$$E\,D_{SCAN} = \frac{k}{\lambda\tau}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)$$

τ: Zeit zum Überfahren der Platte

Ausblick: Scheduling

- **Scheduling**

    Leistungsanalyse mittels Bedienungsnetzen

    Prioritätsinversion, Berechnung von Blockierungszeiten

    Scheduling-Verfahren für flexible Applikationen

    Scheduling-Verfahren für nicht-periodische Tasks
    und Tasks ohne Echtzeit-Anforderungen

    Admission-Algorithmen

- **Leistungsanalyse von Betriebssystem-Komponenten**

„Quantitative Methoden
der Betriebssysteme-Konstruktion“

Quantitative Methoden