

Algorithmen und Datenstrukturen

Wintersemester 2019/20

20. Vorlesung

Tiefensuche und topologische Sortierung

Themen für den 3. Kurztest (Do, 23.01.20)

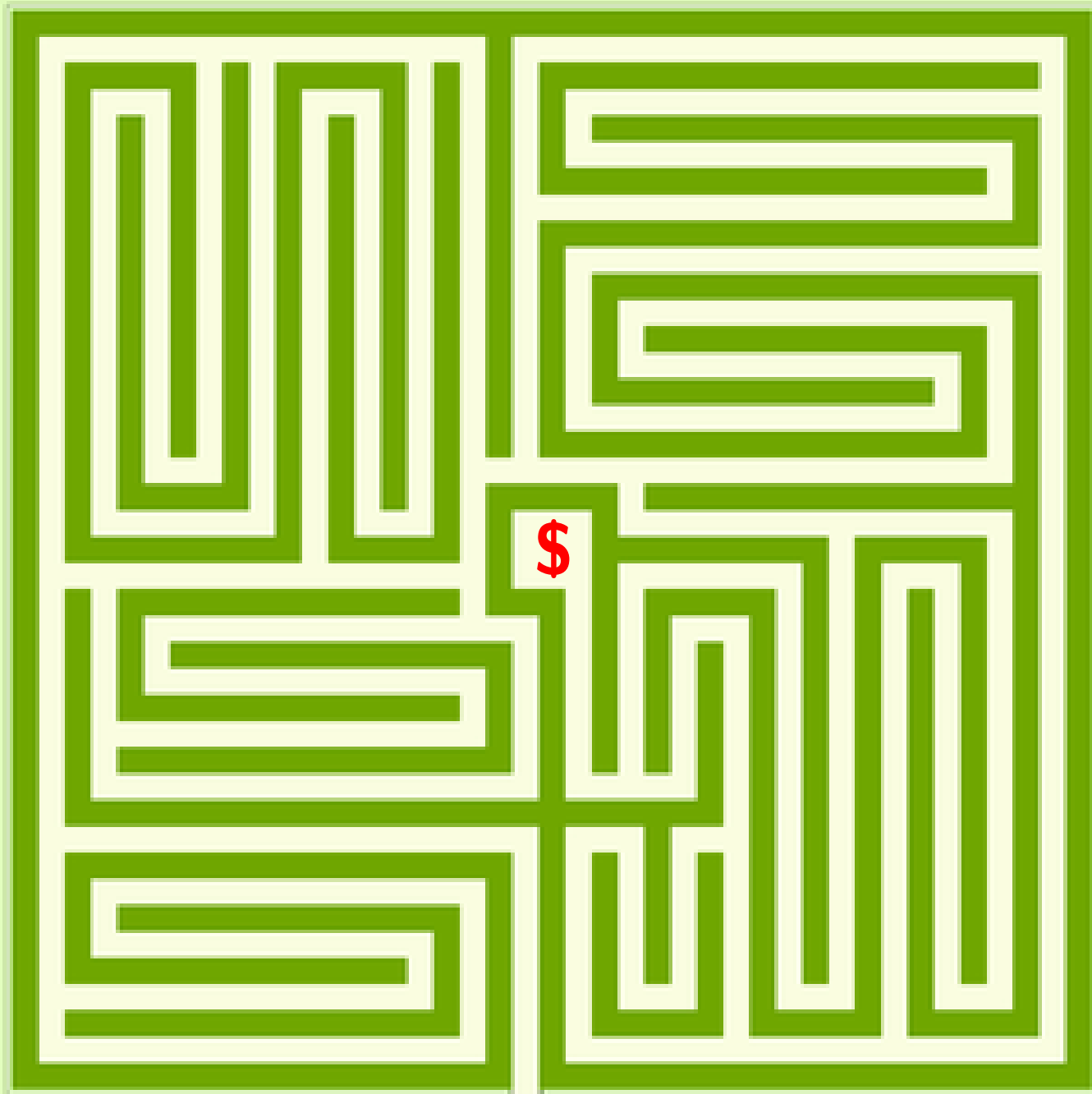
- Rot-Schwarz-Bäume (R-S-Eigenschaften, Höhe)
- Augmentieren von Datenstrukturen
- Amortisierte Analyse
- Nächstes Paar (Teile und Herrsche)
- Graphen und Breitensuche

Themen für den 3. Kurztest (Do, 23.01.20)

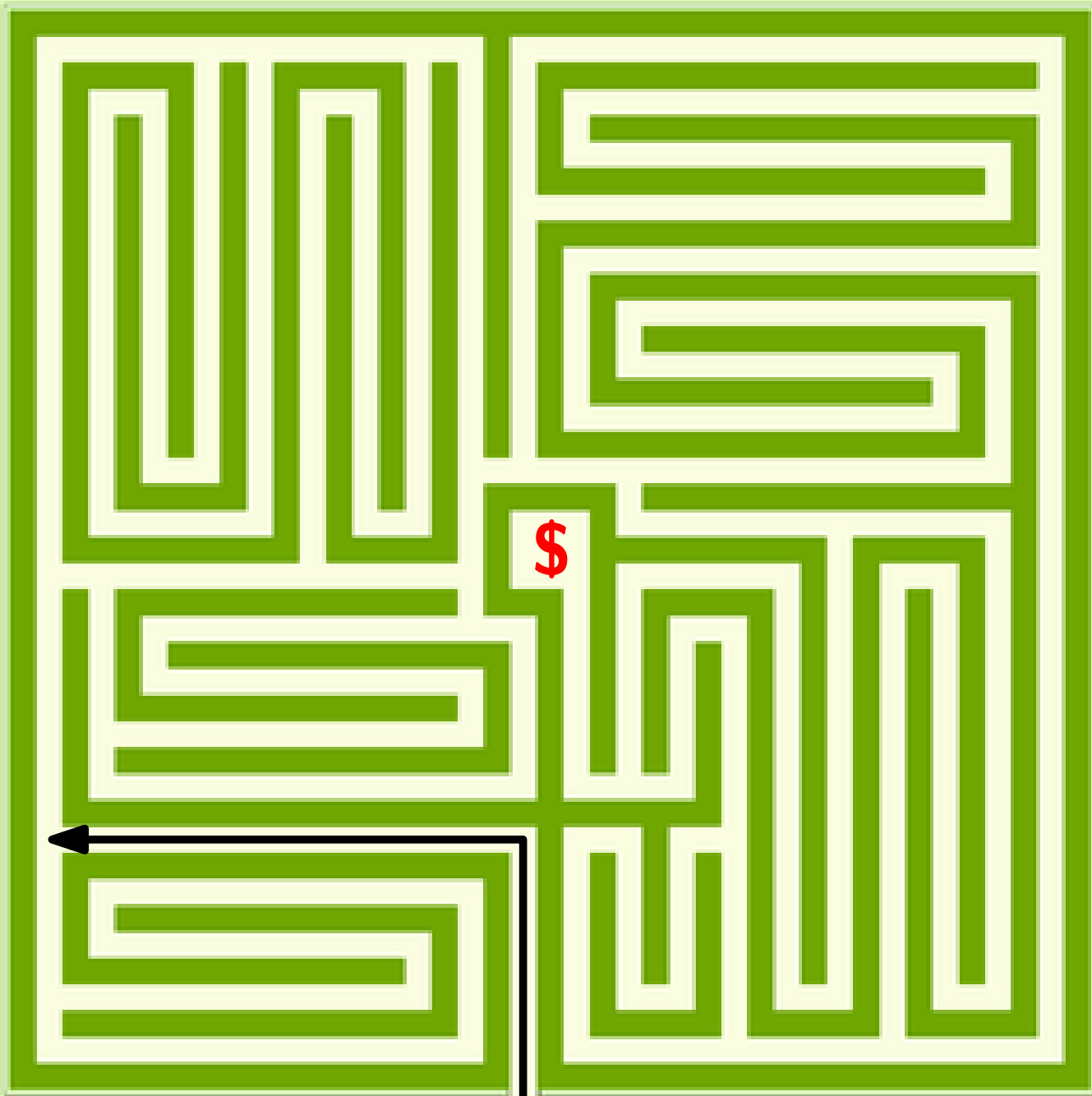
- Rot-Schwarz-Bäume (R-S-Eigenschaften, Höhe)
- Augmentieren von Datenstrukturen
- Amortisierte Analyse
- Nächstes Paar (Teile und Herrsche)
- Graphen und Breitensuche

Anmeldung

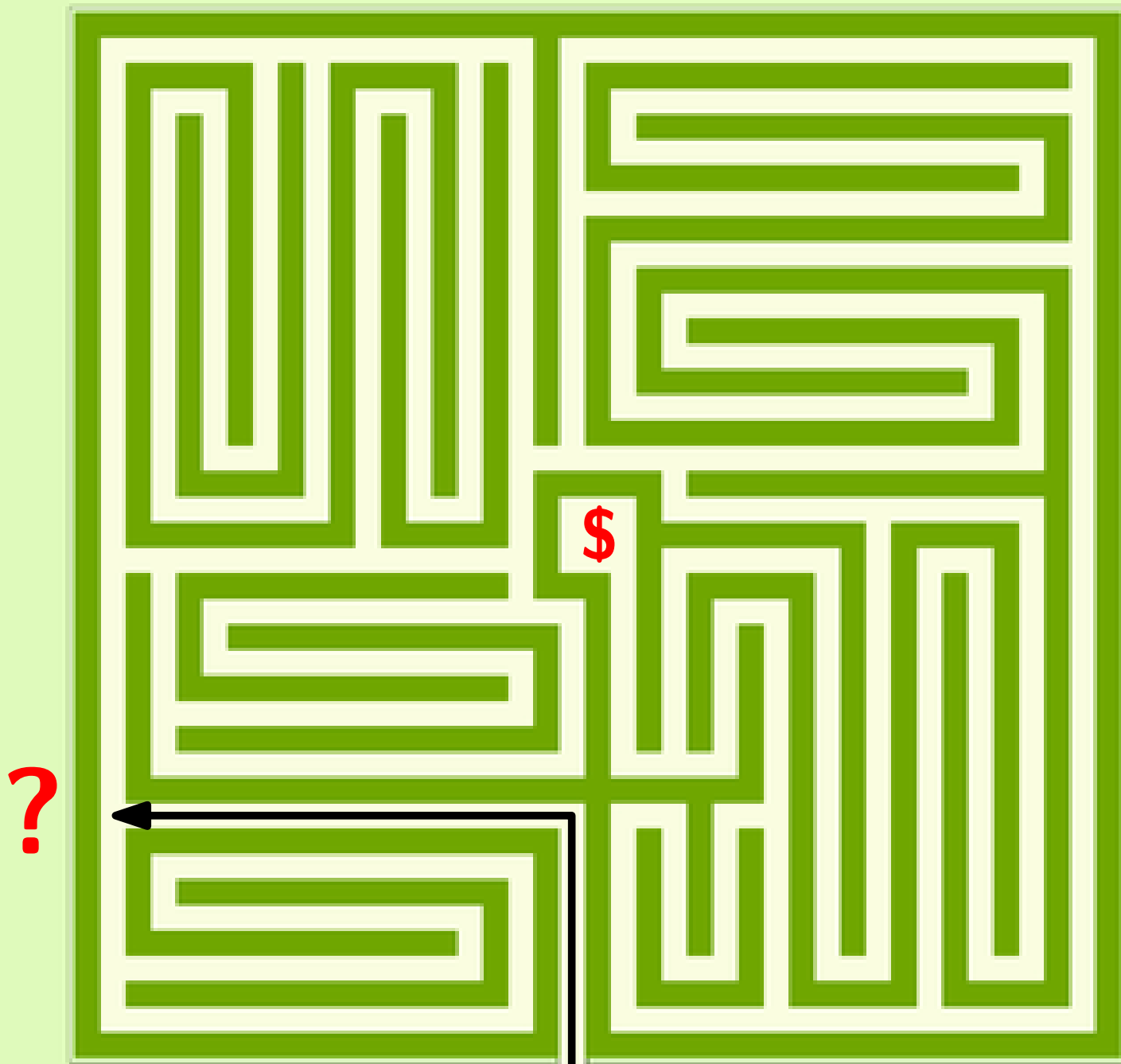
Ab sofort bis Mo, 20.1., 23:59 Uhr.



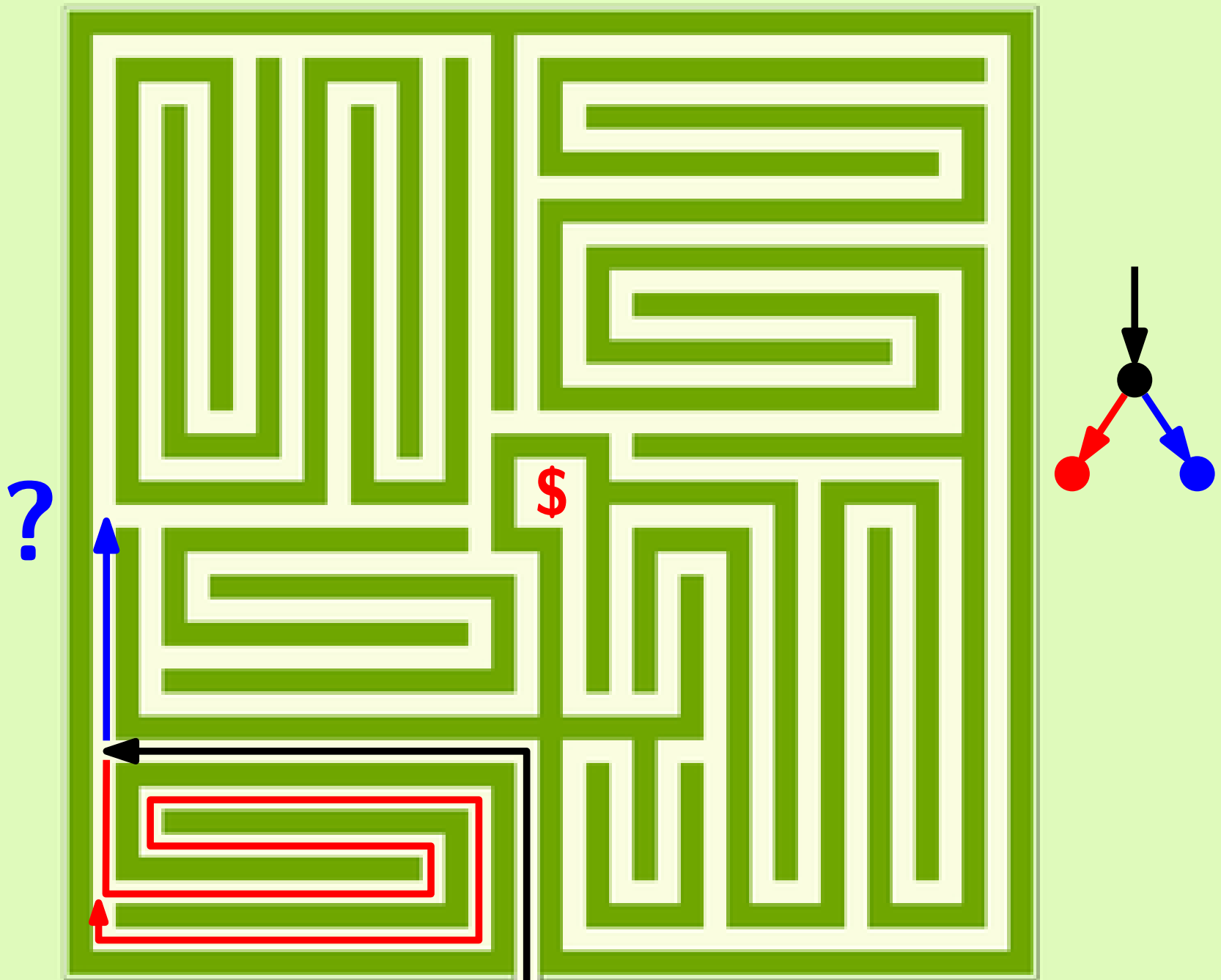
„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons



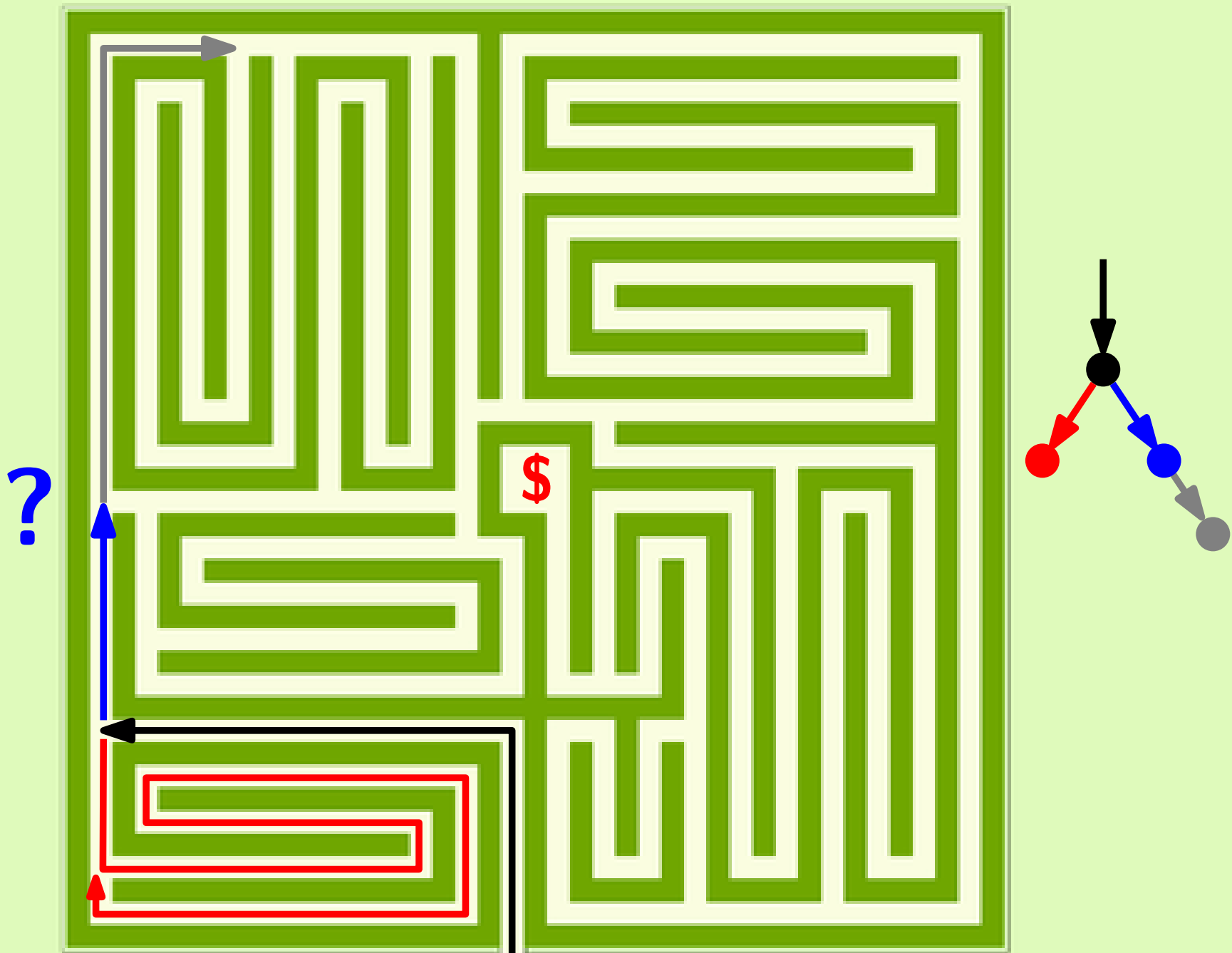
„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons



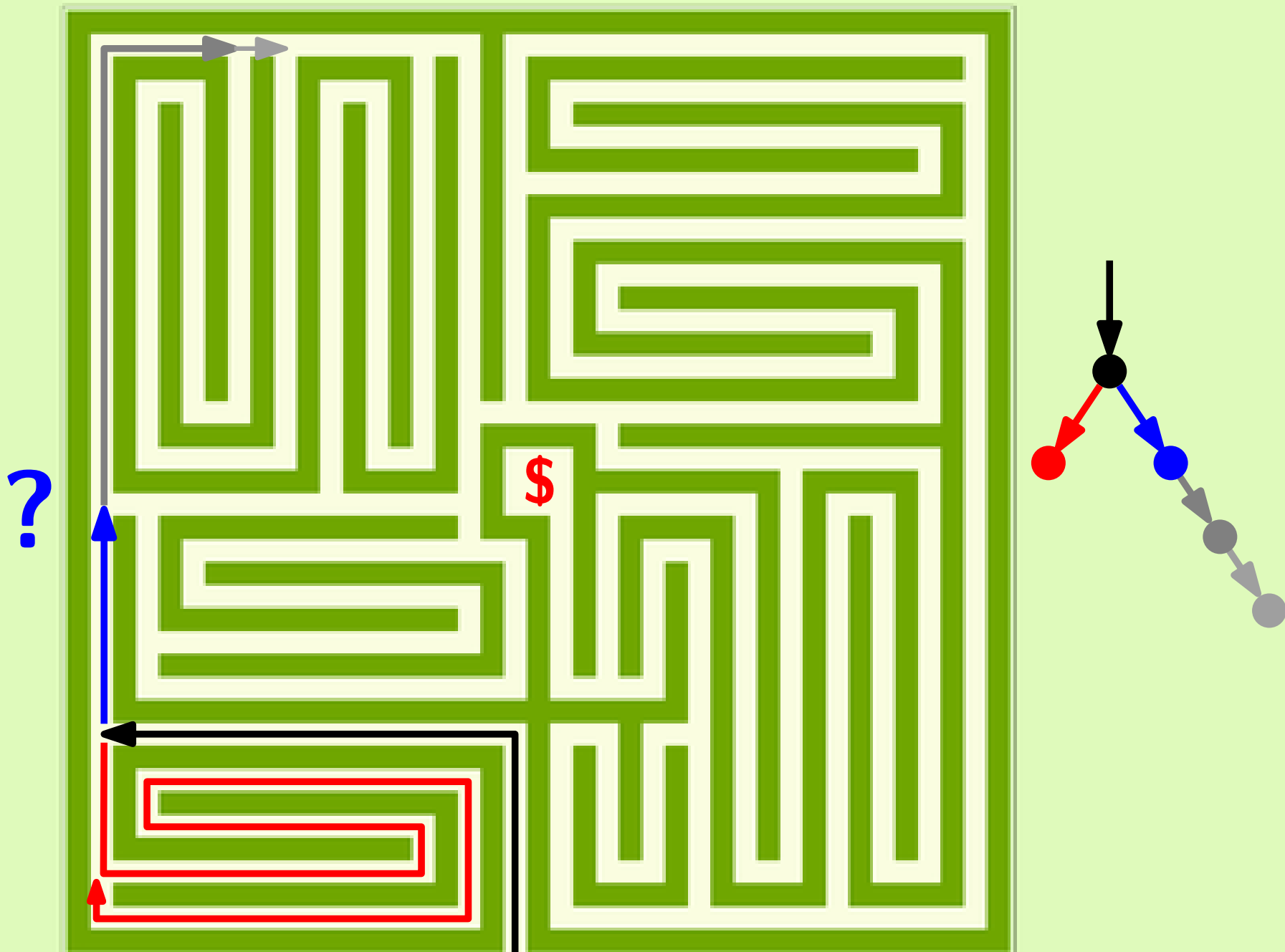
„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons



„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons



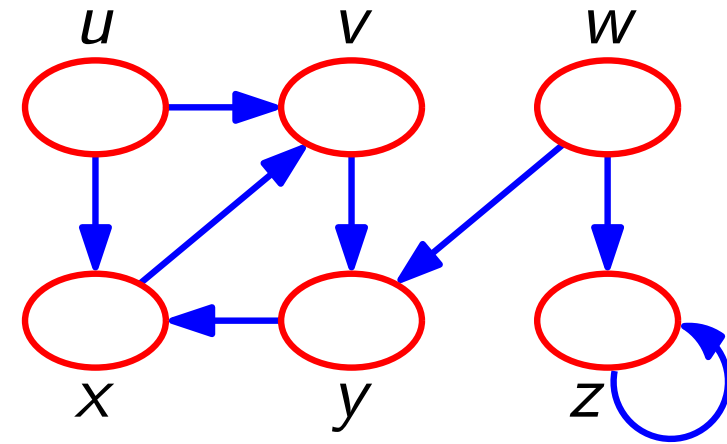
„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons



„Maze-01 Grüningen hedge maze 1576 (destroyed)“
von RTH – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons

Tiefensuche

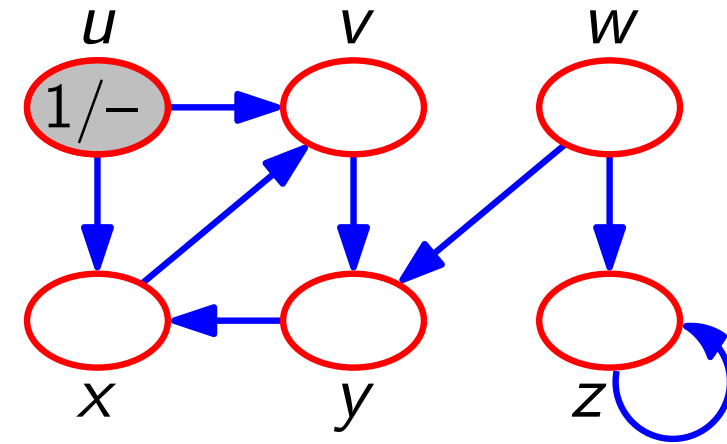
Eingabe: (un)gerichteter Graph G



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

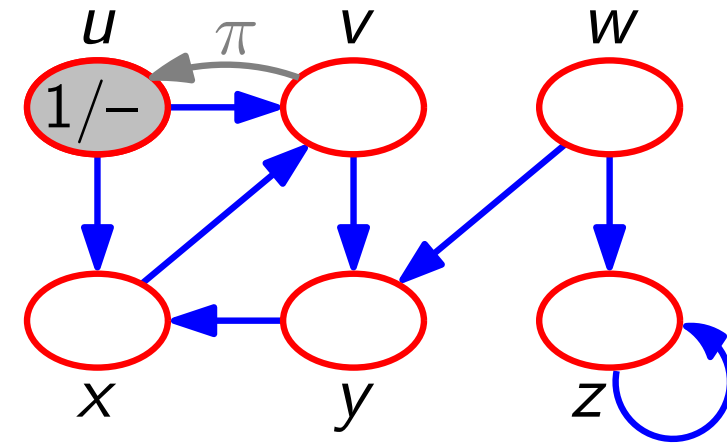
Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

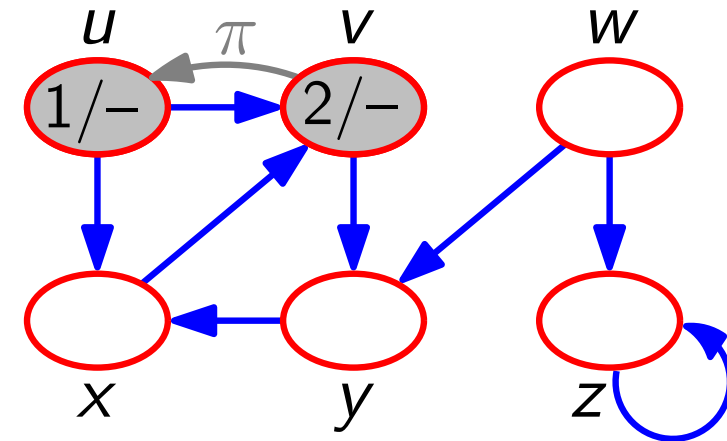
Ausgabe: – Besuchsintervalle $(u.d / u.f)$
 – DFS-Wald $(\leftarrow \pi)$



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

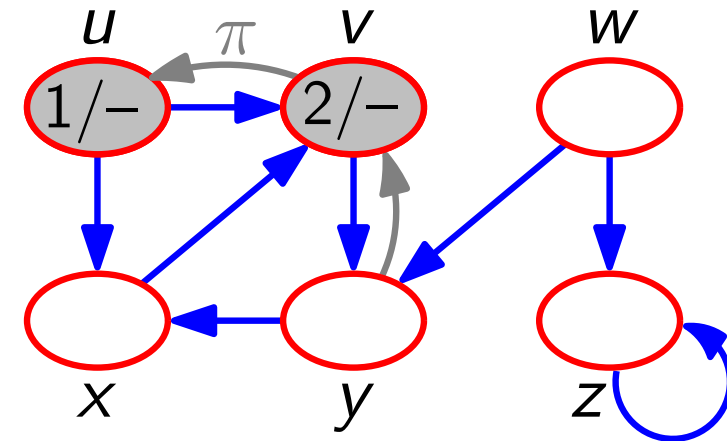
Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

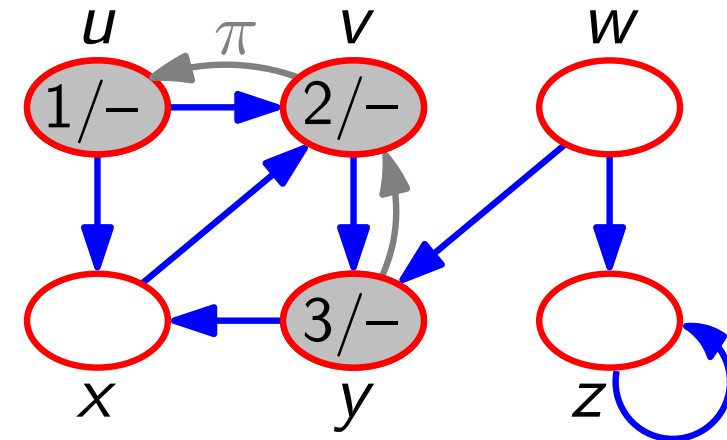
Ausgabe: – Besuchsintervalle $(u.d / u.f)$
 – DFS-Wald $(\leftarrow \pi)$



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

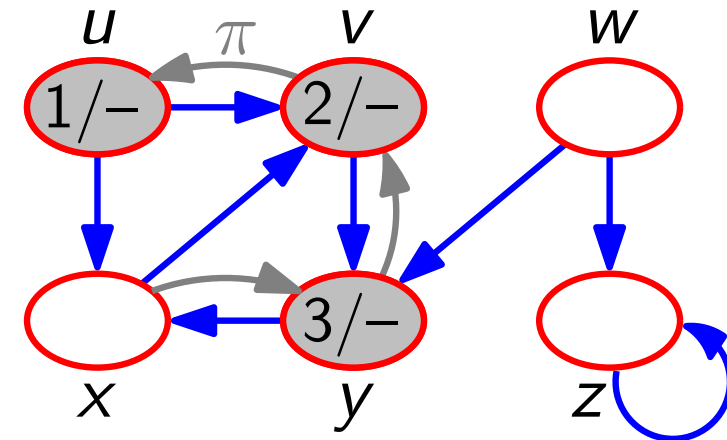
Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

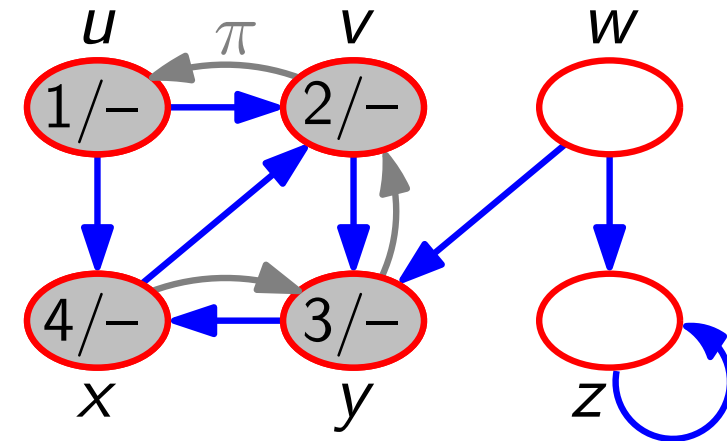
Ausgabe: – Besuchsintervalle $(u.d / u.f)$
 – DFS-Wald $(\leftarrow \pi)$



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

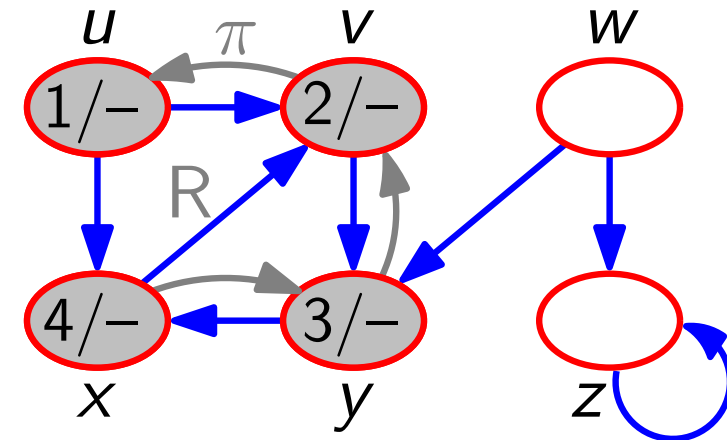
Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)



Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)



Tiefensuche

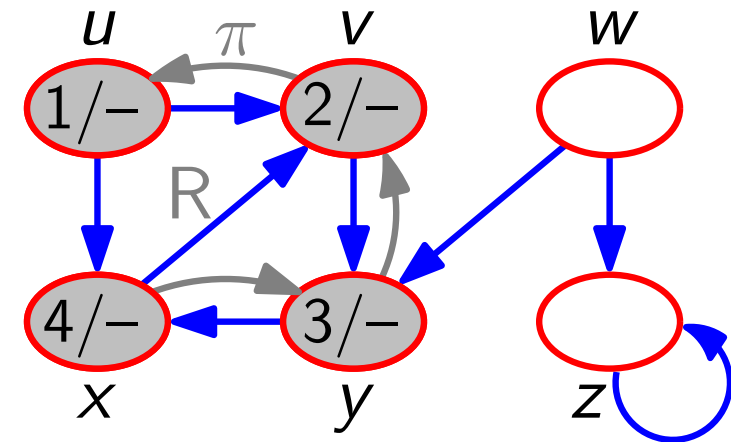
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe:

- Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time
- DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

- Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

Tiefensuche

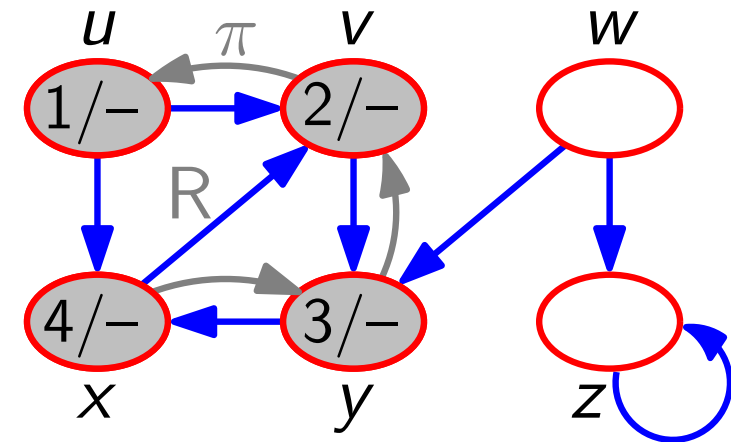
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

Tiefensuche

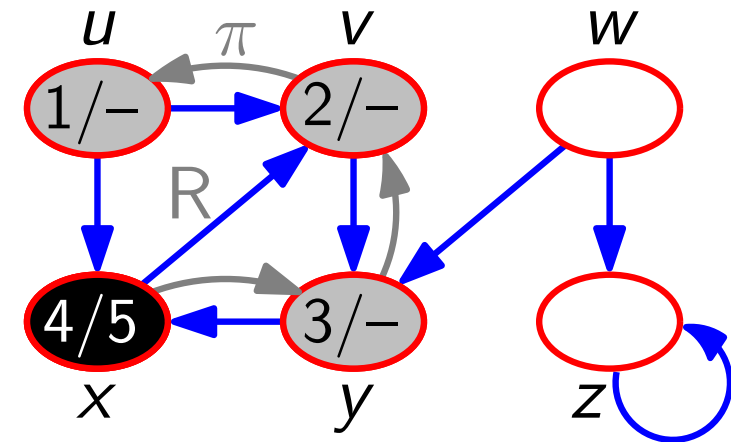
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe:

- Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time
- DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

- Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

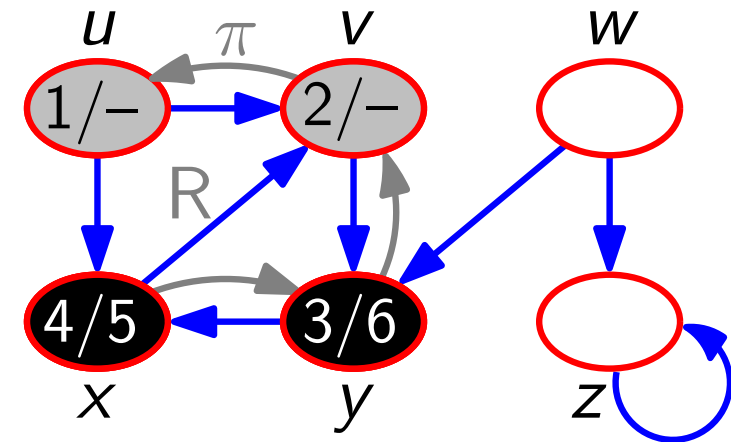
Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

Tiefensuche

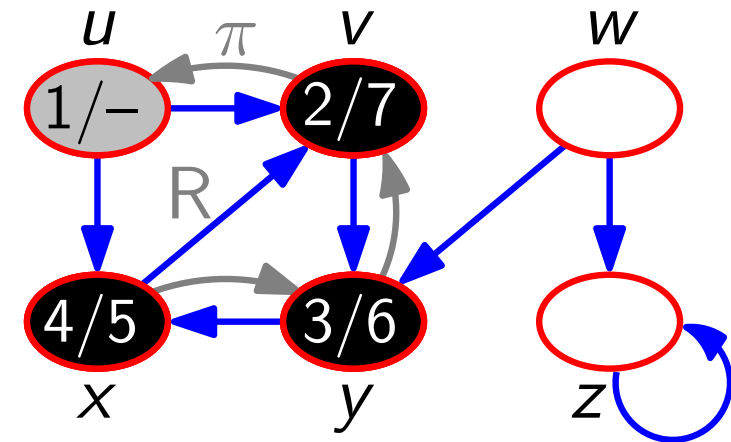
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe:

- Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time
- DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

- Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

Tiefensuche

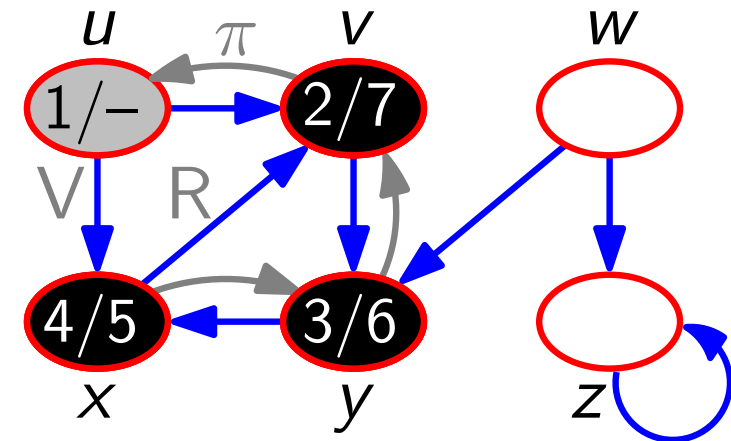
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

Tiefensuche

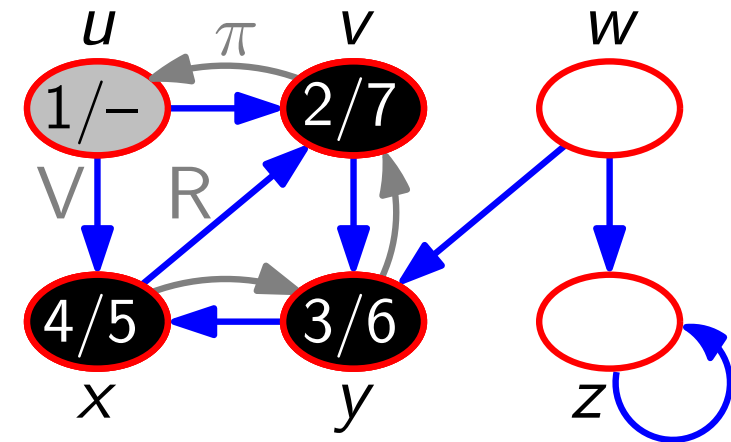
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

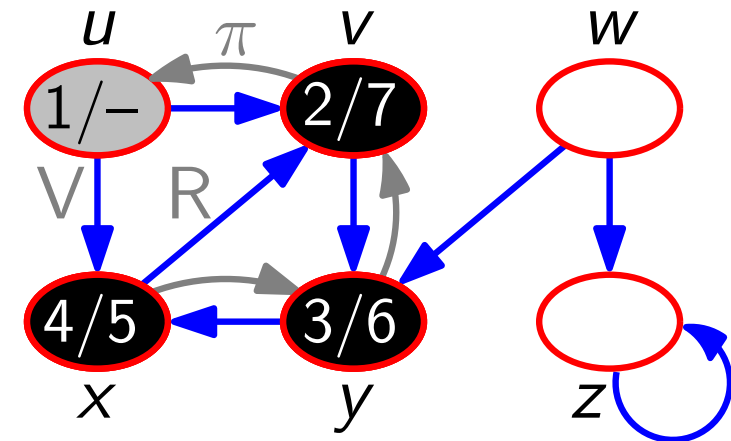
Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

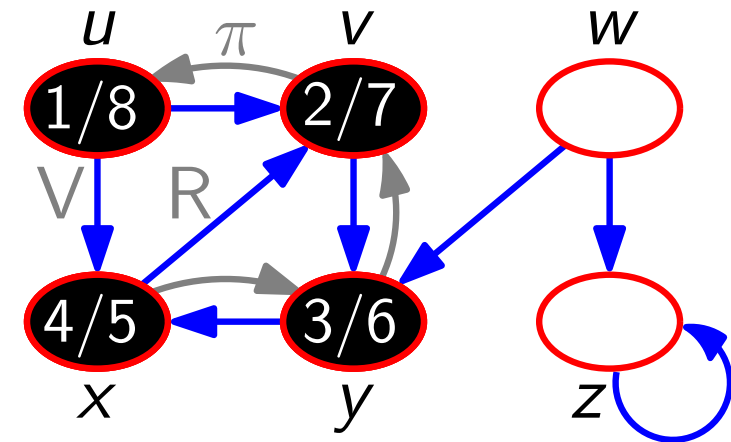
Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

Tiefensuche

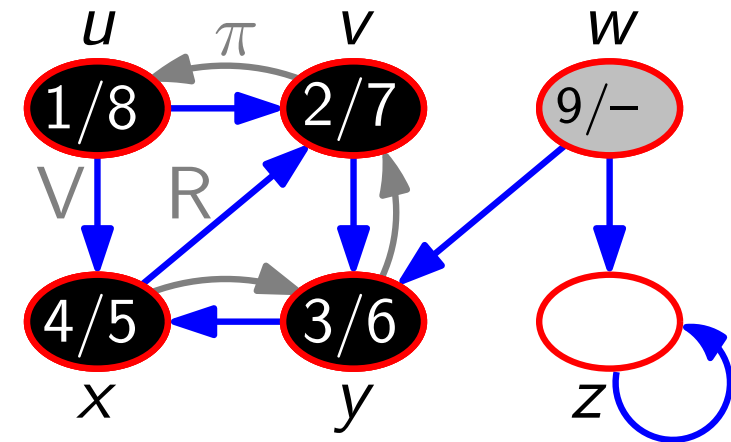
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

Tiefensuche

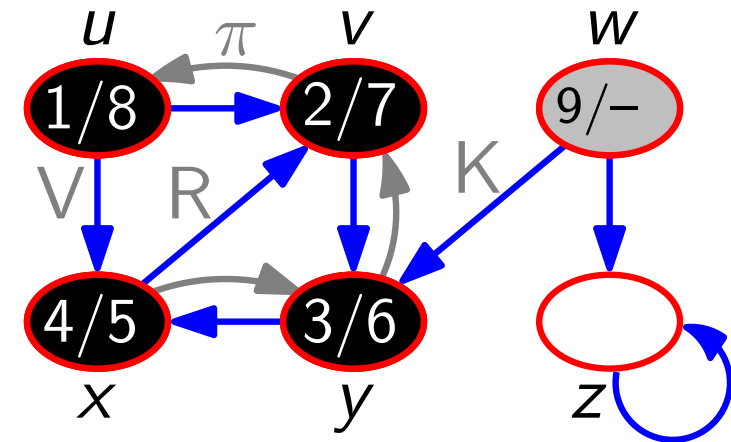
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

Tiefensuche

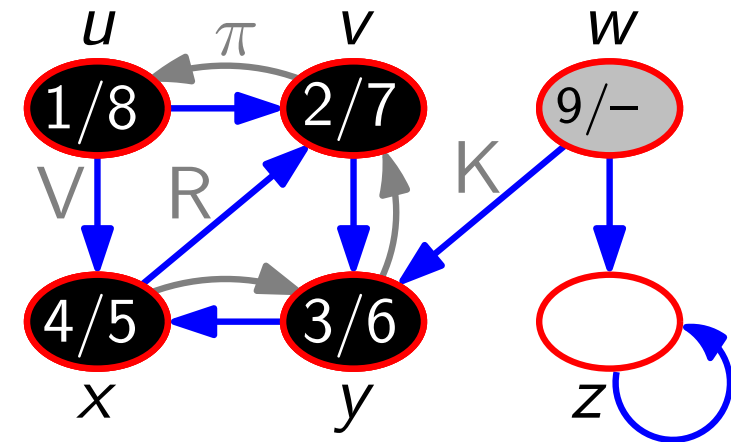
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

Tiefensuche

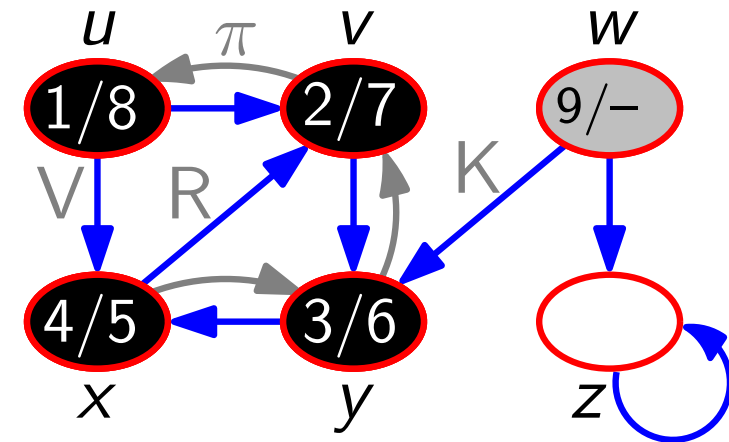
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz

schwarz

Tiefensuche

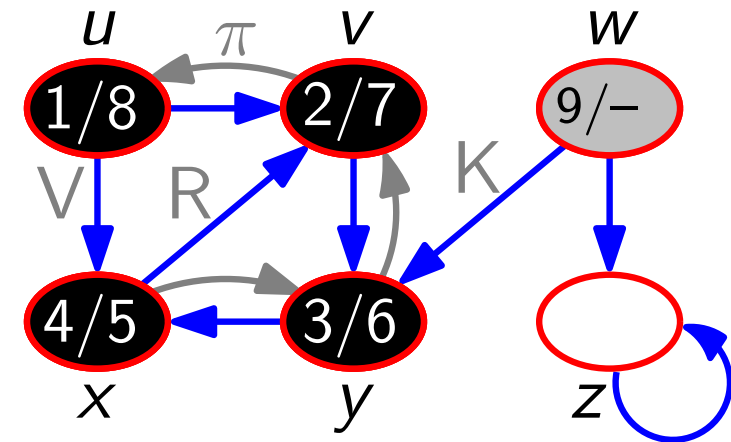
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

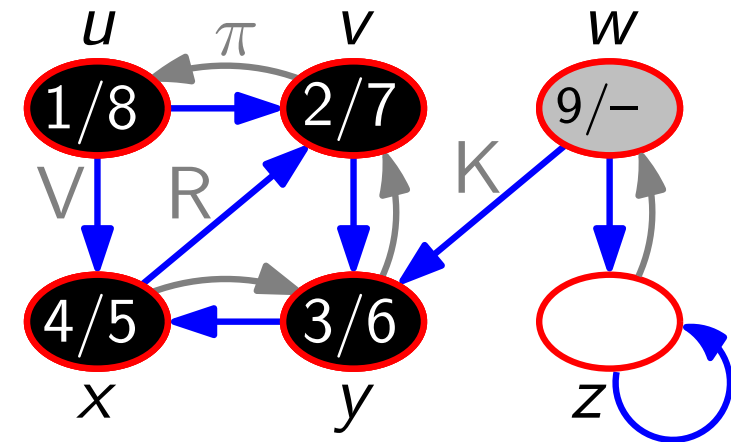
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

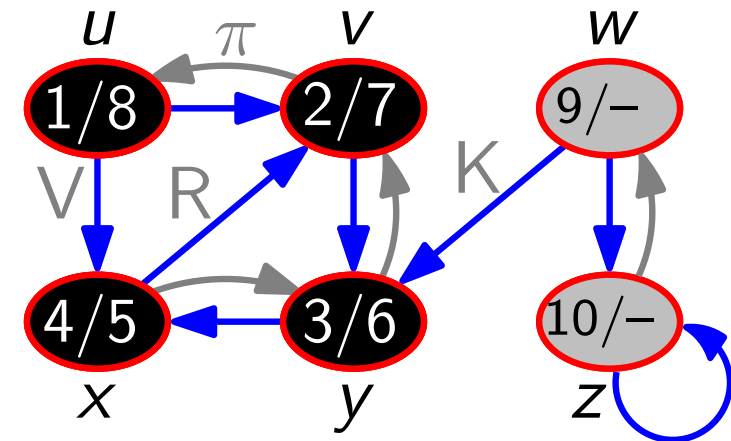
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

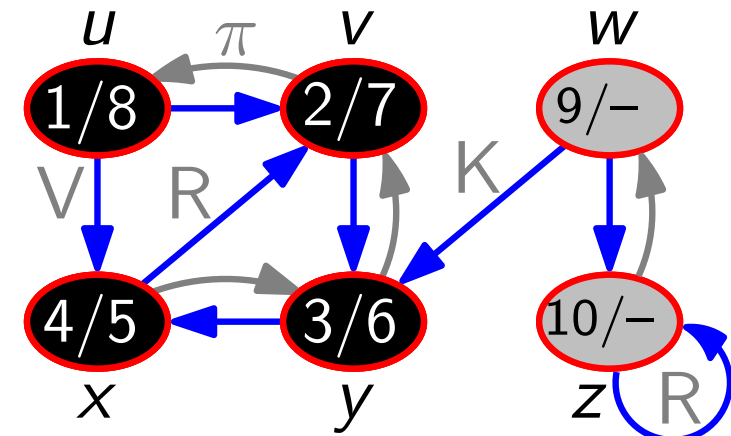
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
start.d < ziel.d

schwarz und
start.d > ziel.d

Tiefensuche

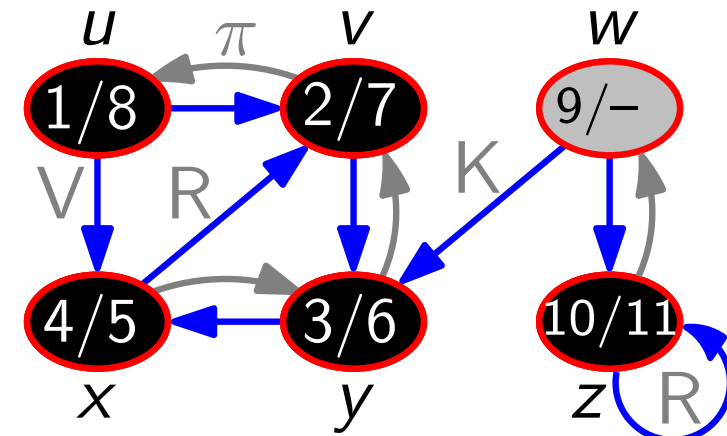
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

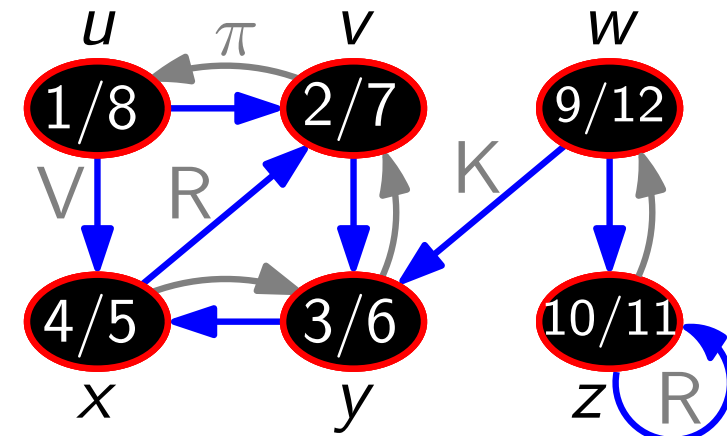
Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

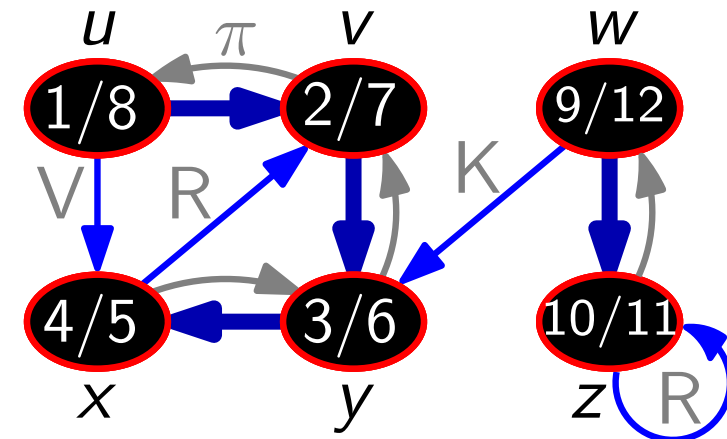
Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)
- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

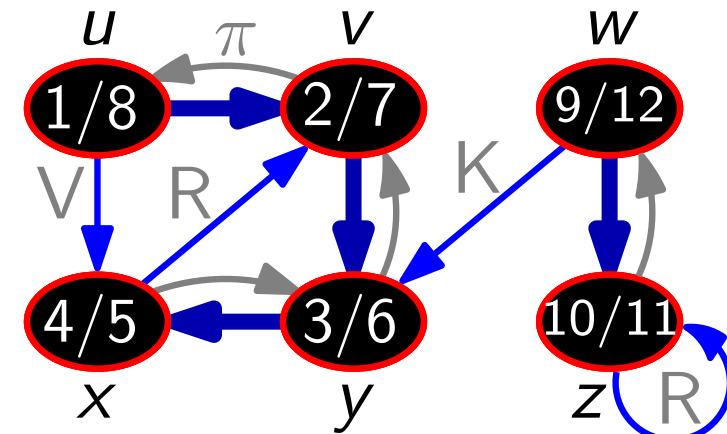
Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

- Baumkanten (Kanten von G_π)

Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

- Rückwärtskanten (R)
- Vorwärtskanten (V)
- Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
 $\text{start}.d < \text{ziel}.d$

schwarz und
 $\text{start}.d > \text{ziel}.d$

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

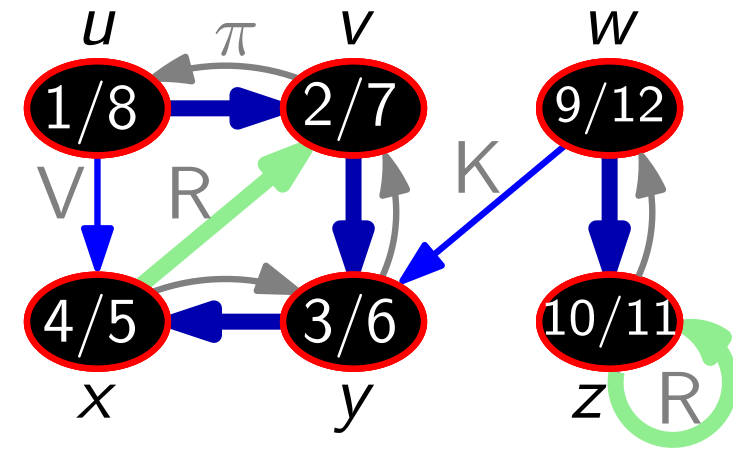
● Baumkanten (Kanten von G_π)

Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

● Rückwärtskanten (R)

● Vorwärtskanten (V)

● Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
start.d < ziel.d

schwarz und
start.d > ziel.d

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

● Baumkanten (Kanten von G_π)

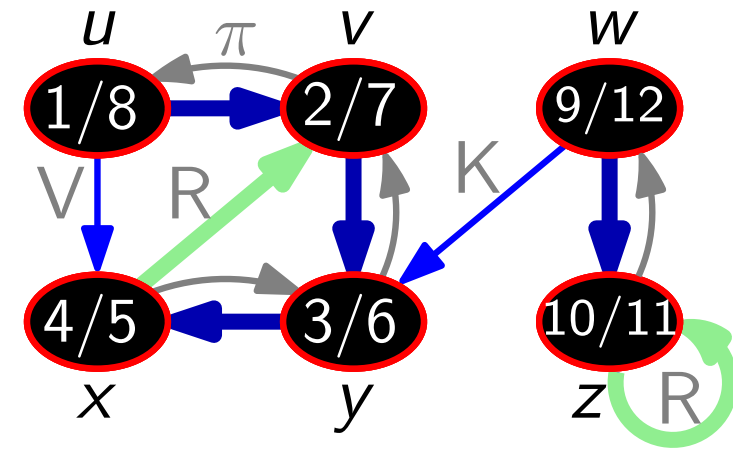
Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

● Rückwärtskanten (R)

Nicht-Baumkanten zu einem Vorgängerknoten

● Vorwärtskanten (V)

● Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
start.d < ziel.d

schwarz und
start.d > ziel.d

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

● Baumkanten (Kanten von G_π)

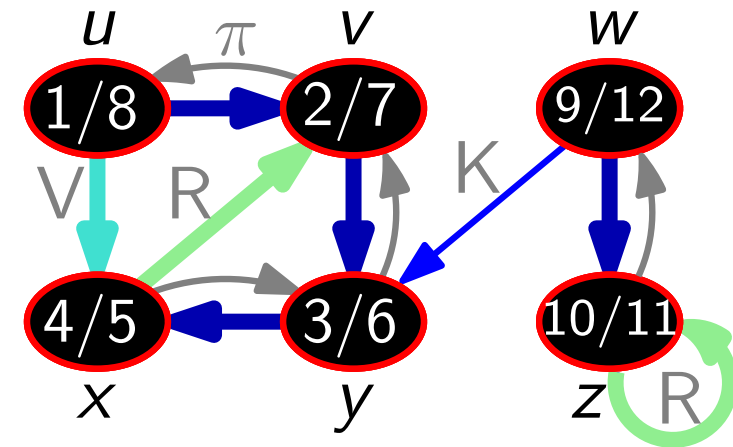
Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

● Rückwärtskanten (R)

Nicht-Baumkanten zu einem Vorgängerknoten

● Vorwärtskanten (V)

● Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
start.d < ziel.d

schwarz und
start.d > ziel.d

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
discovery time finish time

– DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

● Baumkanten (Kanten von G_π)

Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

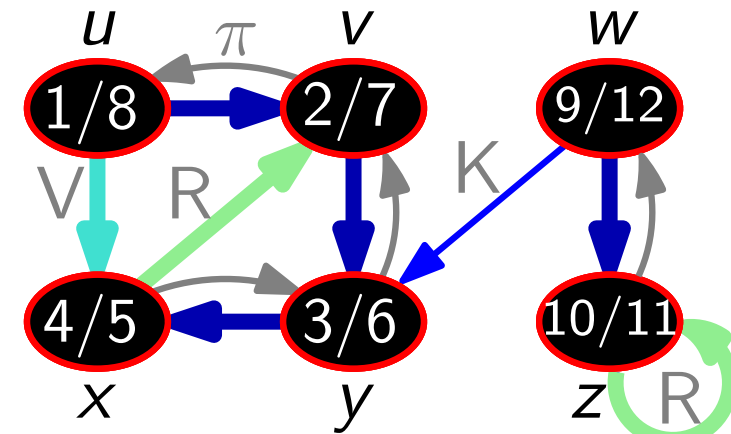
● Rückwärtskanten (R)

Nicht-Baumkanten zu einem Vorgängerknoten

● Vorwärtskanten (V)

Nicht-Baumkanten zu einem Nachfolgerknoten

● Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

schwarz und
start.d < ziel.d

schwarz und
start.d > ziel.d

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)
 – Klassifizierung der Graphkanten:

● Baumkanten (Kanten von G_π)

Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

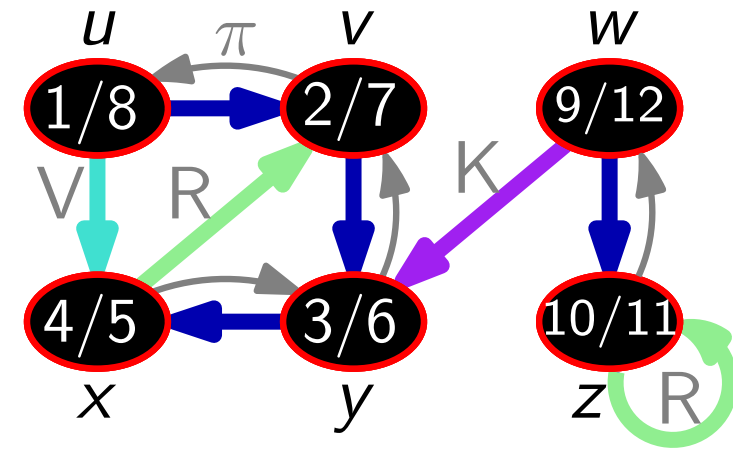
● Rückwärtskanten (R)

Nicht-Baumkanten zu einem Vorgängerknoten

● Vorwärtskanten (V)

Nicht-Baumkanten zu einem Nachfolgerknoten

● Kreuzkanten (K)



Farbe Zielknoten:

weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche

Eingabe: (un)gerichteter Graph G

Ausgabe: – Besuchsintervalle ($u.d/u.f$)
 – DFS-Wald ($\leftarrow \pi$)

– Klassifizierung der Graphkanten:

● Baumkanten (Kanten von G_π)

Kanten des DFS-Waldes (entgegen π gerichtet)

● Rückwärtskanten (R)

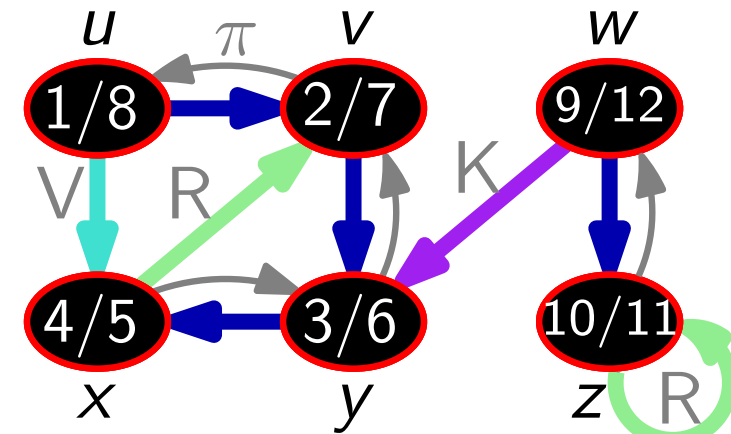
Nicht-Baumkanten zu einem Vorgängerknoten

● Vorwärtskanten (V)

Nicht-Baumkanten zu einem Nachfolgerknoten

● Kreuzkanten (K)

Kanten, bei denen kein Endpunkt Vorgänger des anderen ist.



Farbe Zielknoten:

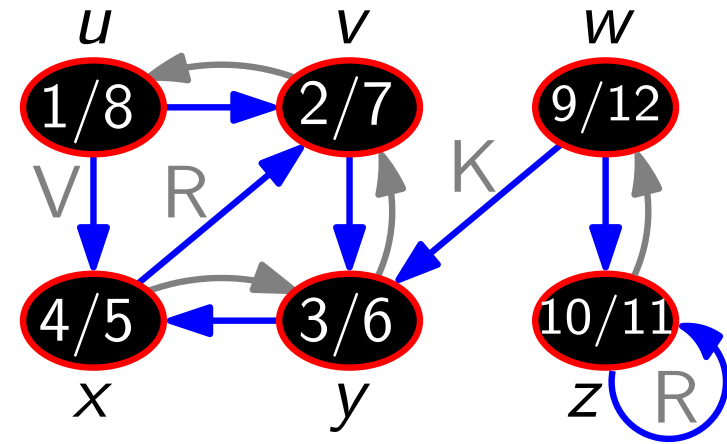
weiss

grau

*schwarz und
start.d < ziel.d*

*schwarz und
start.d > ziel.d*

Tiefensuche – Pseudocode



Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

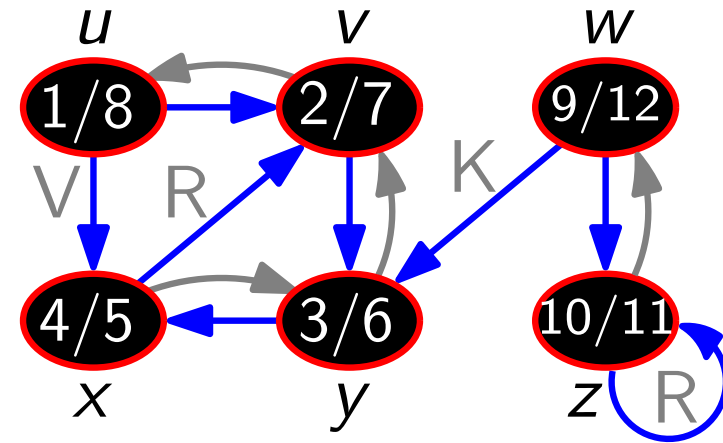
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

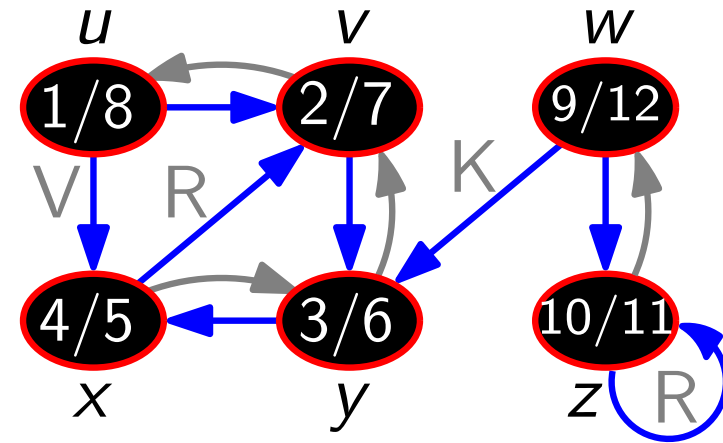
```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time; u.color = gray$ 
```



Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

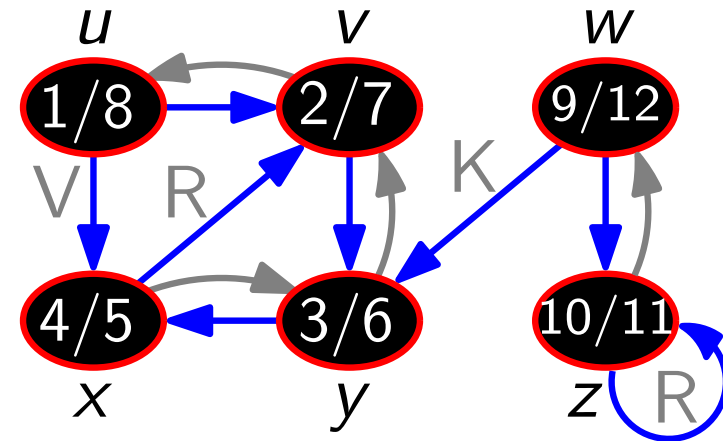
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

Für jeden Knoten u von G ist

- $u.d$ der Zeitpunkt der Entdeckung,
 - $u.f$ der Abschluss-Zeitpunkt;
- Besuchsintervall von u ist $[u.d, u.f]$.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

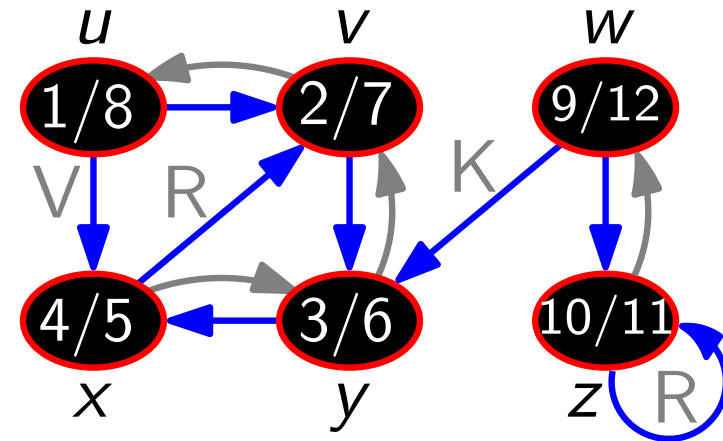
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    |
```

Für jeden Knoten u von G ist

- $u.d$ der Zeitpunkt der Entdeckung,
 - $u.f$ der Abschluss-Zeitpunkt;
- Besuchsintervall von u ist $[u.d, u.f]$.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

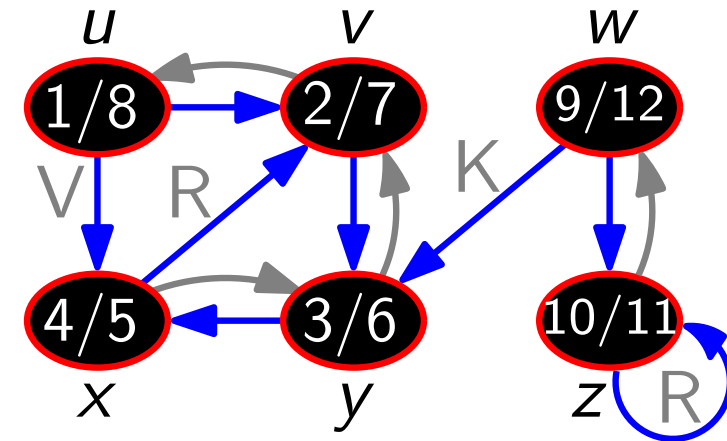
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

*Ergänzen Sie den Code
in und nach der foreach-Schleife!
Benutzen Sie Rekursion.*

Für jeden Knoten u von G ist

- $u.d$ der Zeitpunkt der Entdeckung,
- $u.f$ der Abschluss-Zeitpunkt;

Besuchsintervall von u ist $[u.d, u.f]$.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

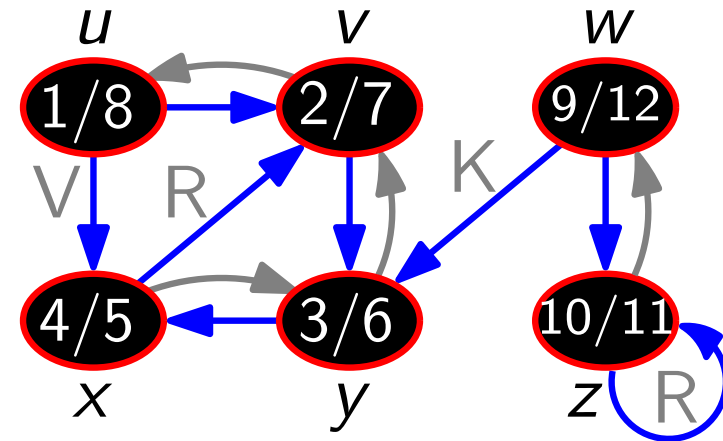
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```

Für jeden Knoten u von G ist

- $u.d$ der Zeitpunkt der Entdeckung,
 - $u.f$ der Abschluss-Zeitpunkt;
- Besuchsintervall von u ist $[u.d, u.f]$.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

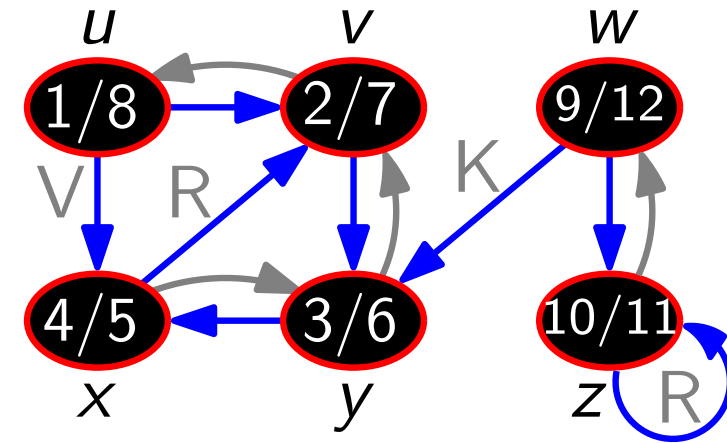
```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```



Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

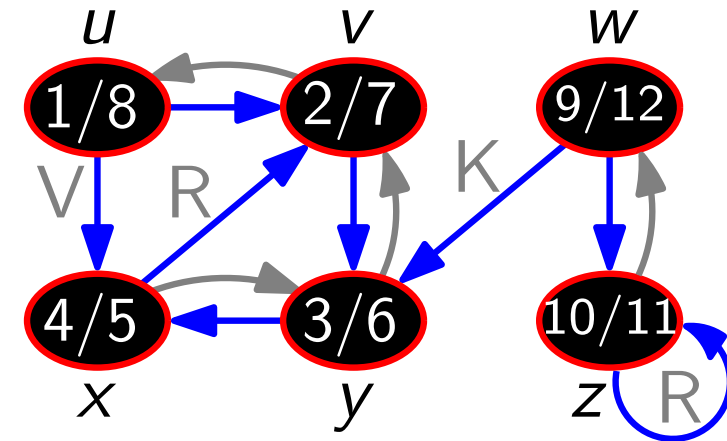
```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```



**Laufzeit
von DFS?**

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

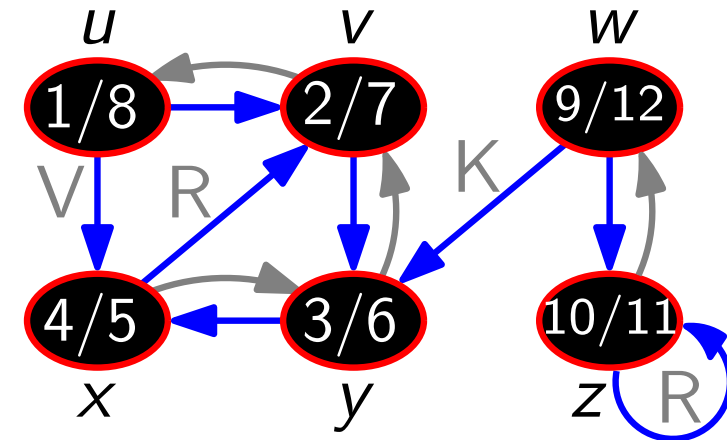
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



**Laufzeit
von DFS?**

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```

- DFSVisit wird nur für weiße Knoten aufgerufen.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

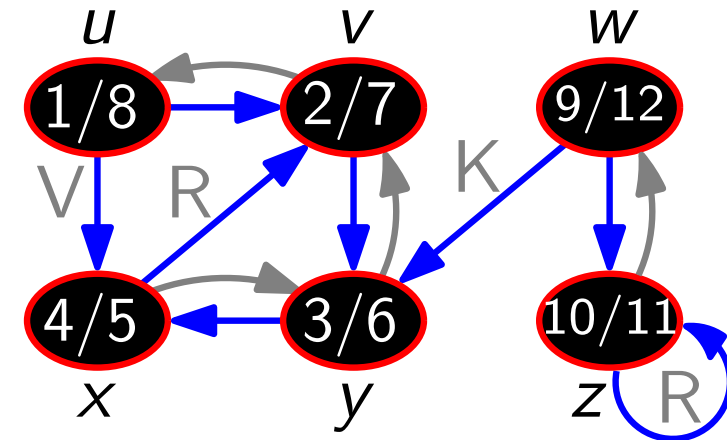
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



**Laufzeit
von DFS?**

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```

- DFSVisit wird nur für weiße Knoten aufgerufen.
- In DFSVisit wird der neue Knoten sofort grau gefärbt.

Tiefensuche – Pseudocode

```
DFS(Graph  $G = (V, E)$ )
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

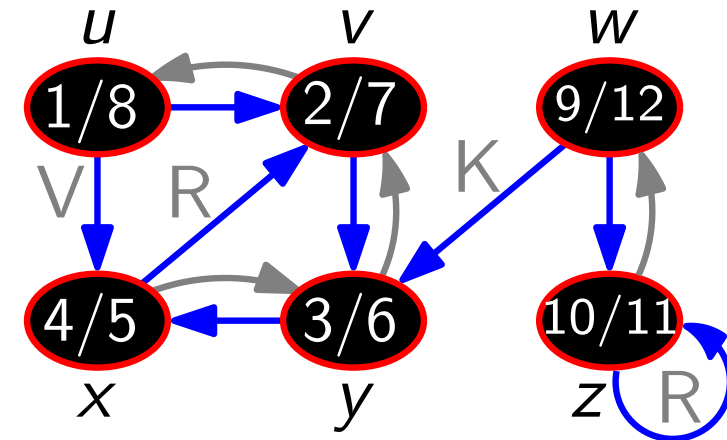
```
     $u.color = white$ 
```

```
     $u.\pi = nil$ 
```

```
   $time = 0$  // globale Variable!
```

```
  foreach  $u \in V$  do
```

```
    if  $u.color == white$  then DFSVisit( $G, u$ )
```



**Laufzeit
von DFS?**

```
DFSVisit(Graph  $G$ , Vertex  $u$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

```
   $u.d = time$ ;  $u.color = gray$ 
```

```
  foreach  $v \in Adj[u]$  do
```

```
    if  $v.color == white$  then
```

```
       $v.\pi = u$ ; DFSVisit( $G, v$ )
```

```
   $time = time + 1$ 
```

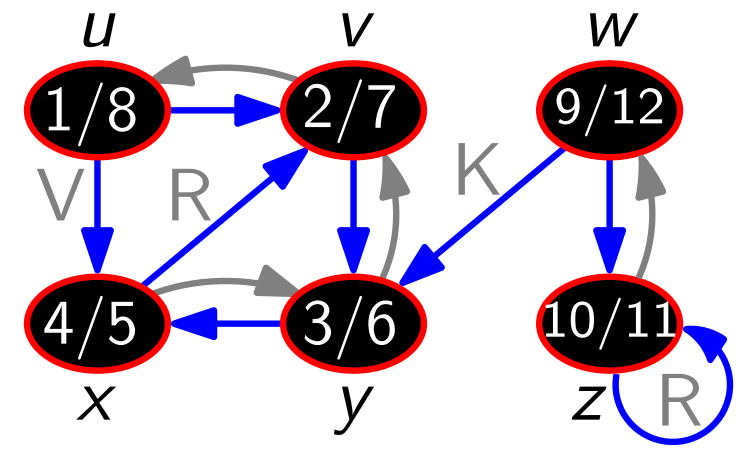
```
   $u.f = time$ ;  $u.color = black$ 
```

- DFSVisit wird nur für weiße Knoten aufgerufen.
 - In DFSVisit wird der neue Knoten sofort grau gefärbt.
- ⇒ DFSVisit wird für jeden Knoten genau 1× aufgerufen.

Tiefensuche – Pseudocode

```

DFS(Graph G = (V, E))
  foreach u ∈ V do
    u.color = white
    u.π = nil
  time = 0 // globale Variable!
  foreach u ∈ V do
    if u.color == white then DFSVisit(G, u)
    
```



**Laufzeit
von DFS?**

```

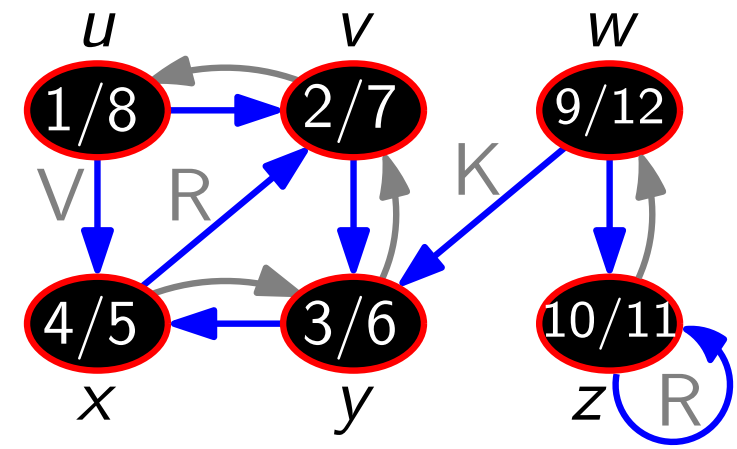
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u; DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
    
```

- DFSVisit wird nur für weiße Knoten aufgerufen.
- In DFSVisit wird der neue Knoten sofort grau gefärbt.
- ⇒ DFSVisit wird für jeden Knoten genau 1× aufgerufen.
- DFS ohne if $O(V)$ Zeit
DFSVisit ohne Rek. $O(\deg^{(out)} u)$

Tiefensuche – Pseudocode

```

DFS(Graph G = (V, E))
  foreach u ∈ V do
    | u.color = white
    | u.π = nil
  time = 0 // globale Variable!
  foreach u ∈ V do
    | if u.color == white then DFSVisit(G, u)
    
```



**Laufzeit
von DFS?**

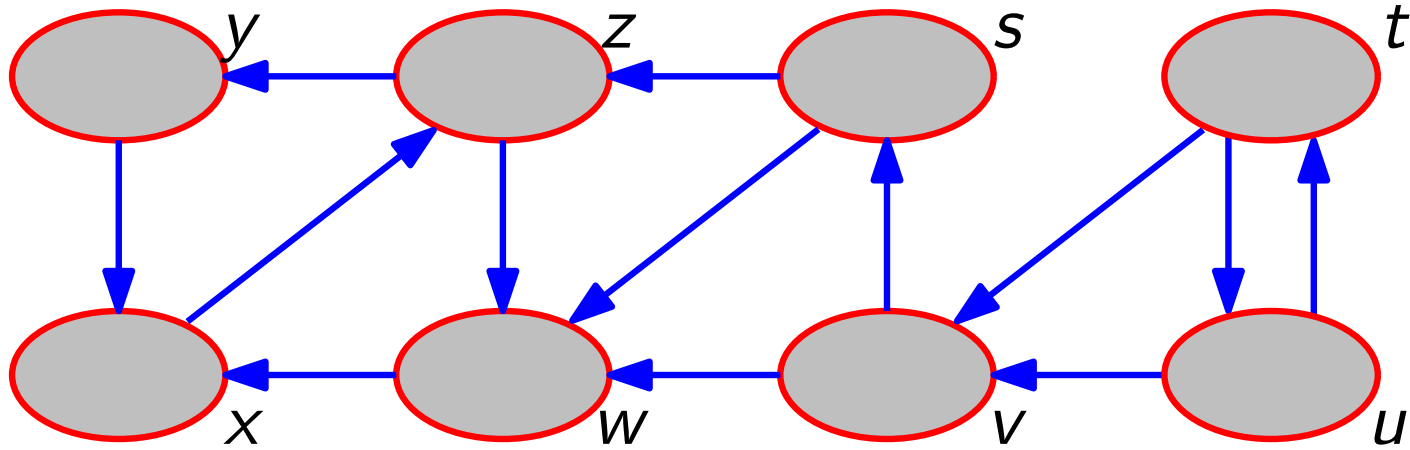
```

DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    | if v.color == white then
      | | v.π = u; DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
    
```

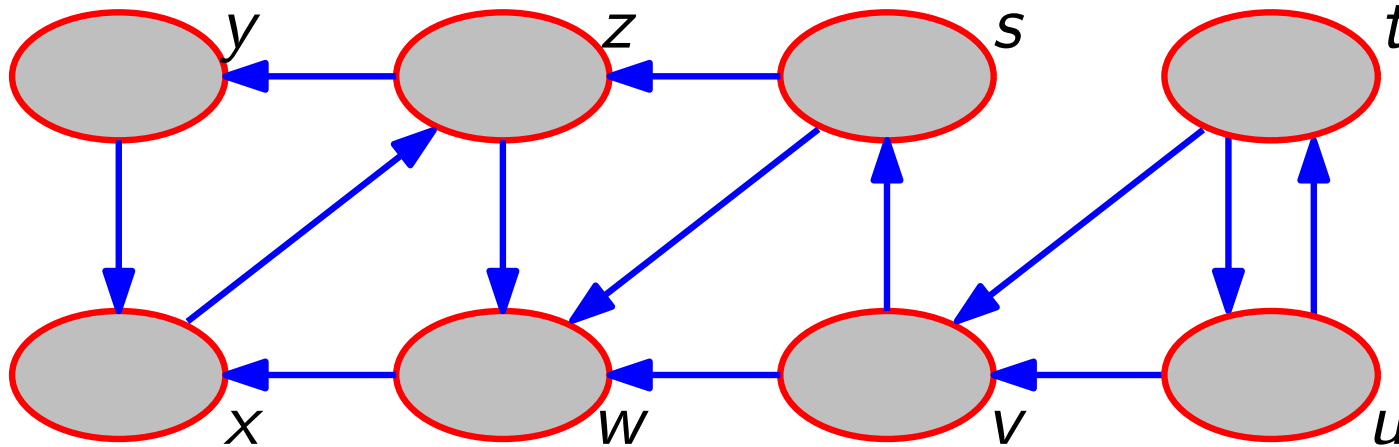
- DFSVisit wird nur für weiße Knoten aufgerufen.
- In DFSVisit wird der neue Knoten sofort grau gefärbt.
- ⇒ DFSVisit wird für jeden Knoten genau 1× aufgerufen.
- DFS ohne if $O(V)$ Zeit
 DFSVisit ohne Rek. $O(\text{deg } u)$

 DFS gesamt $O(V + E)$ Zeit

Tiefensuche – Eigenschaften



Tiefensuche – Eigenschaften

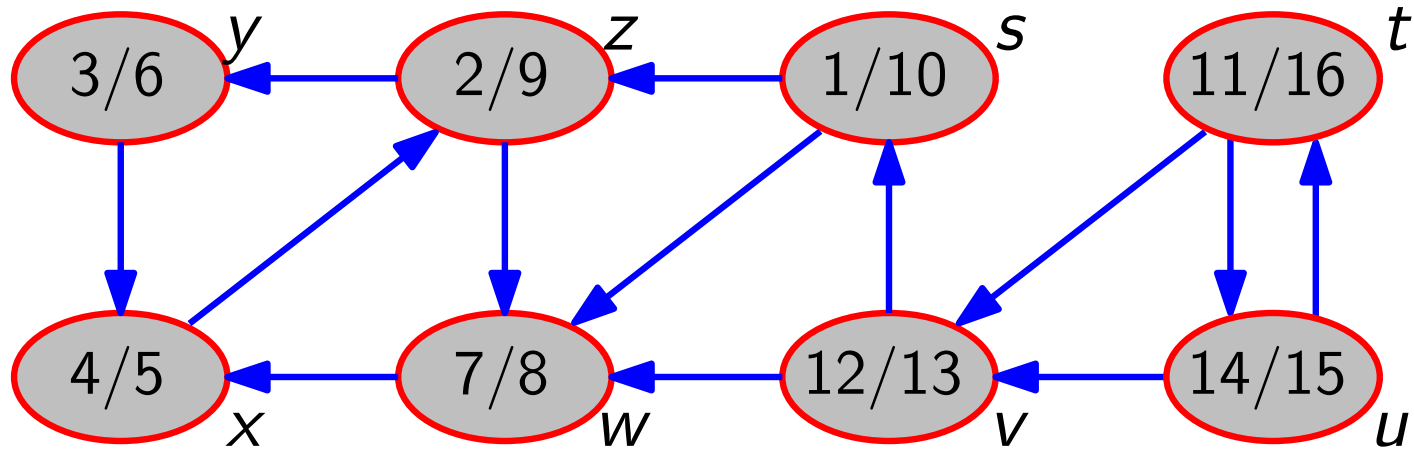


Aufgabe: Kopieren Sie obigen Graphen.

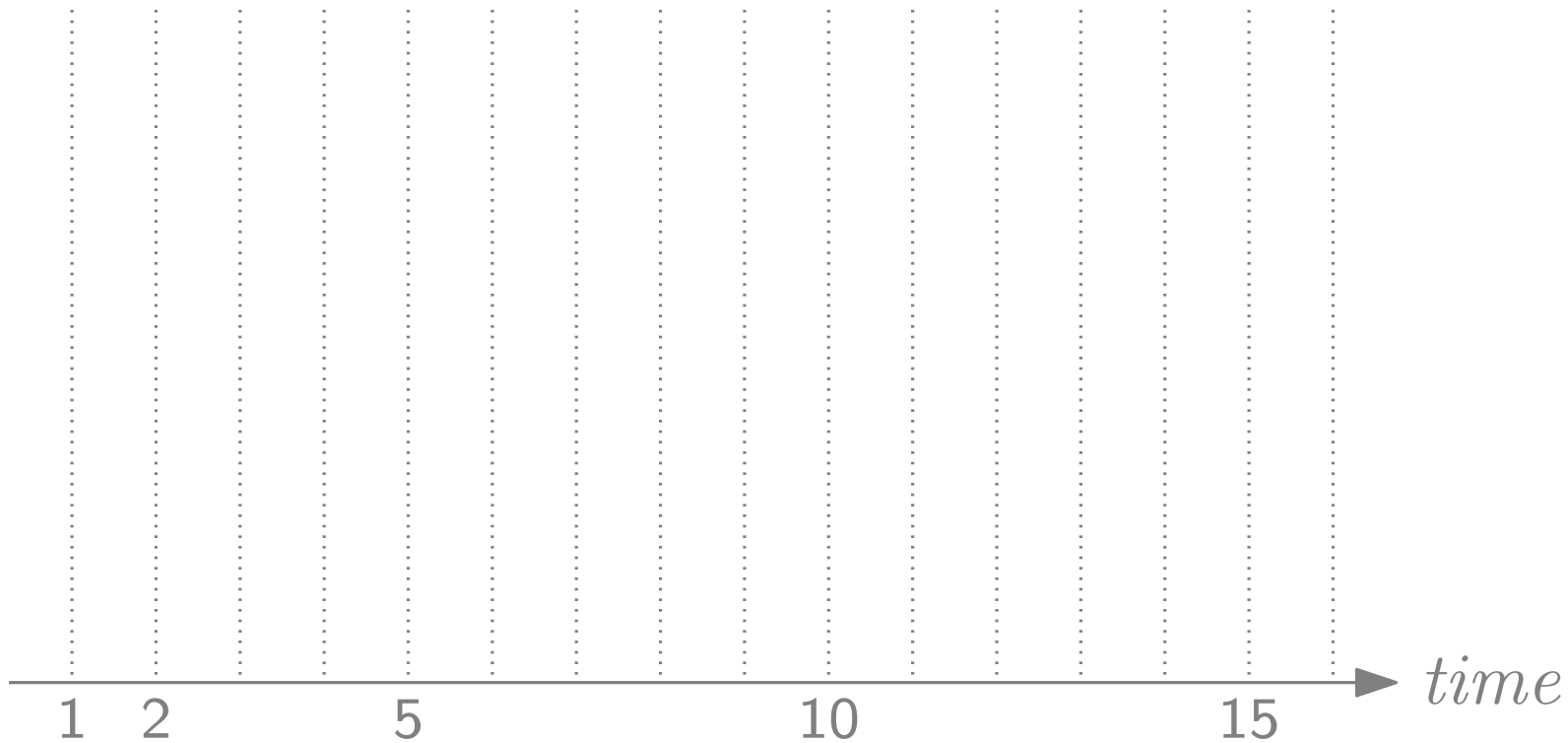
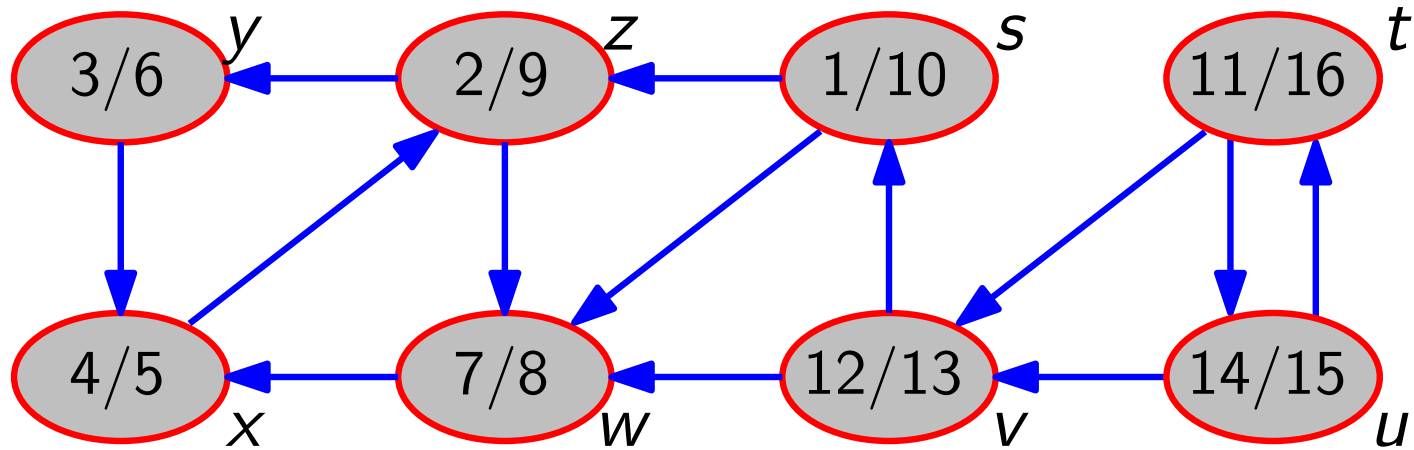
Berechnen Sie dann mit DFS alle Besuchsintervalle.

Beginnen Sie mit s . Wenn Sie eine Wahl haben, nehmen Sie zuerst den *obersten* verfügbaren Knoten.

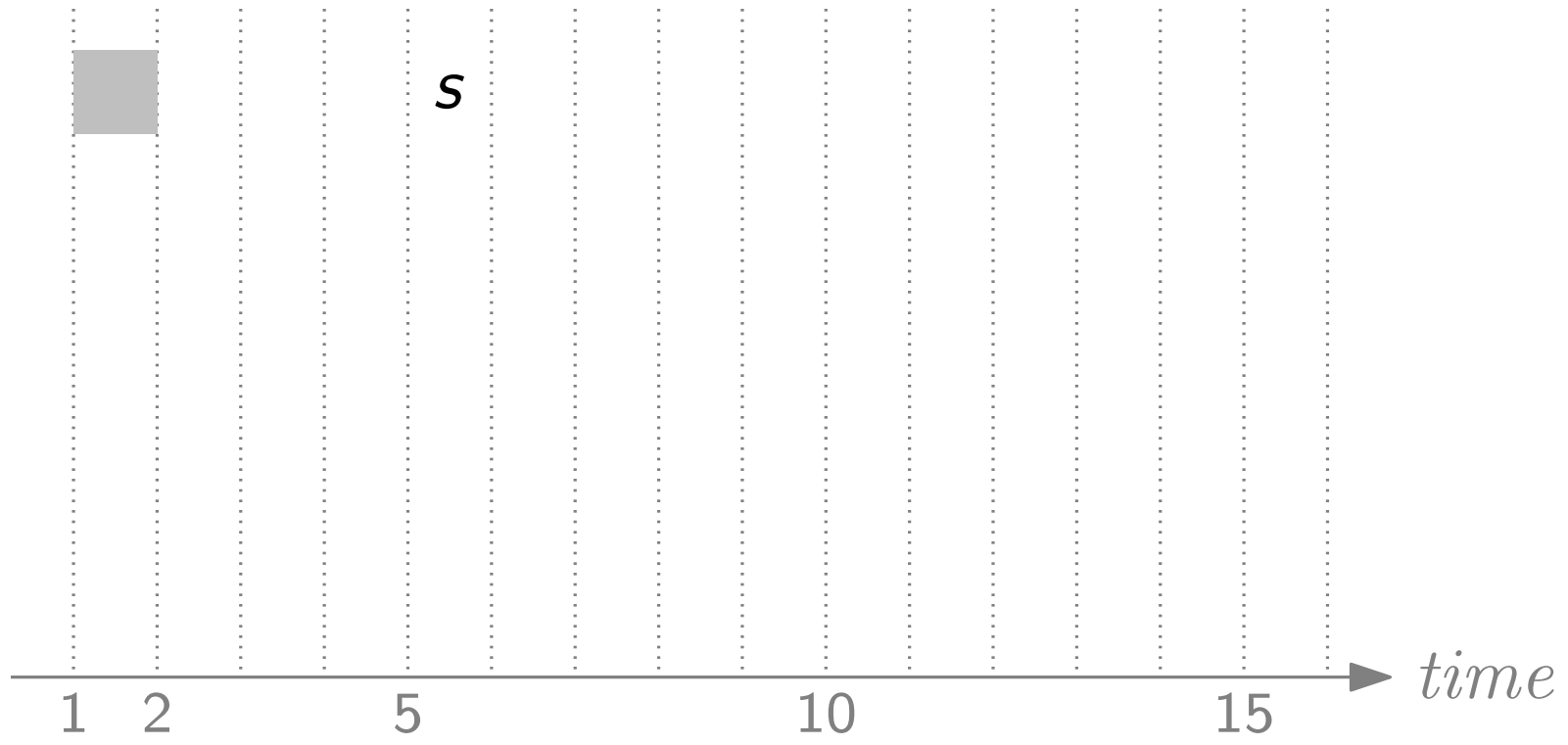
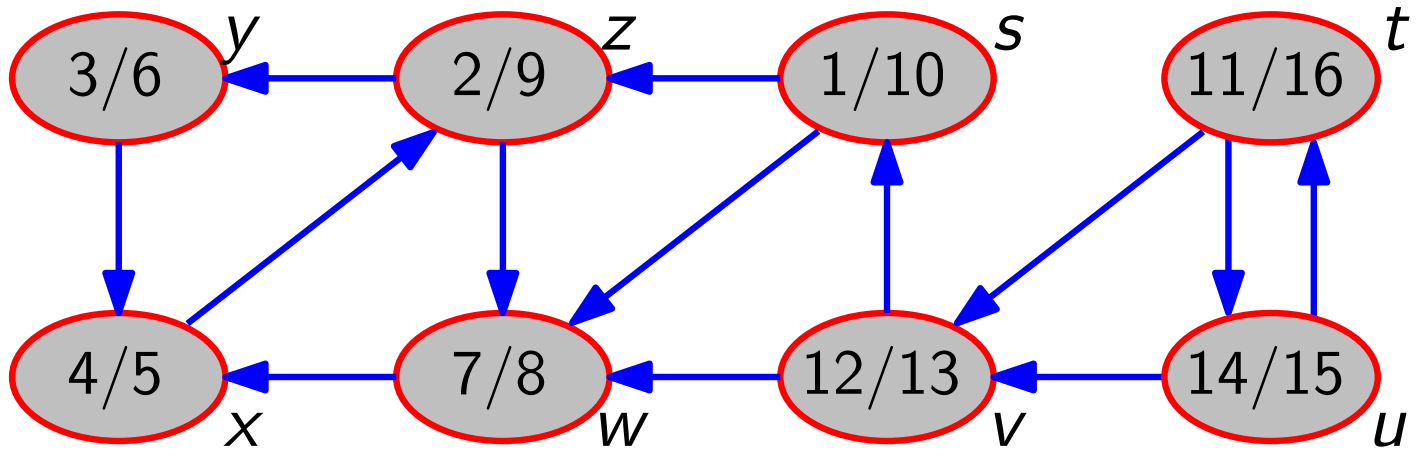
Tiefensuche – Eigenschaften



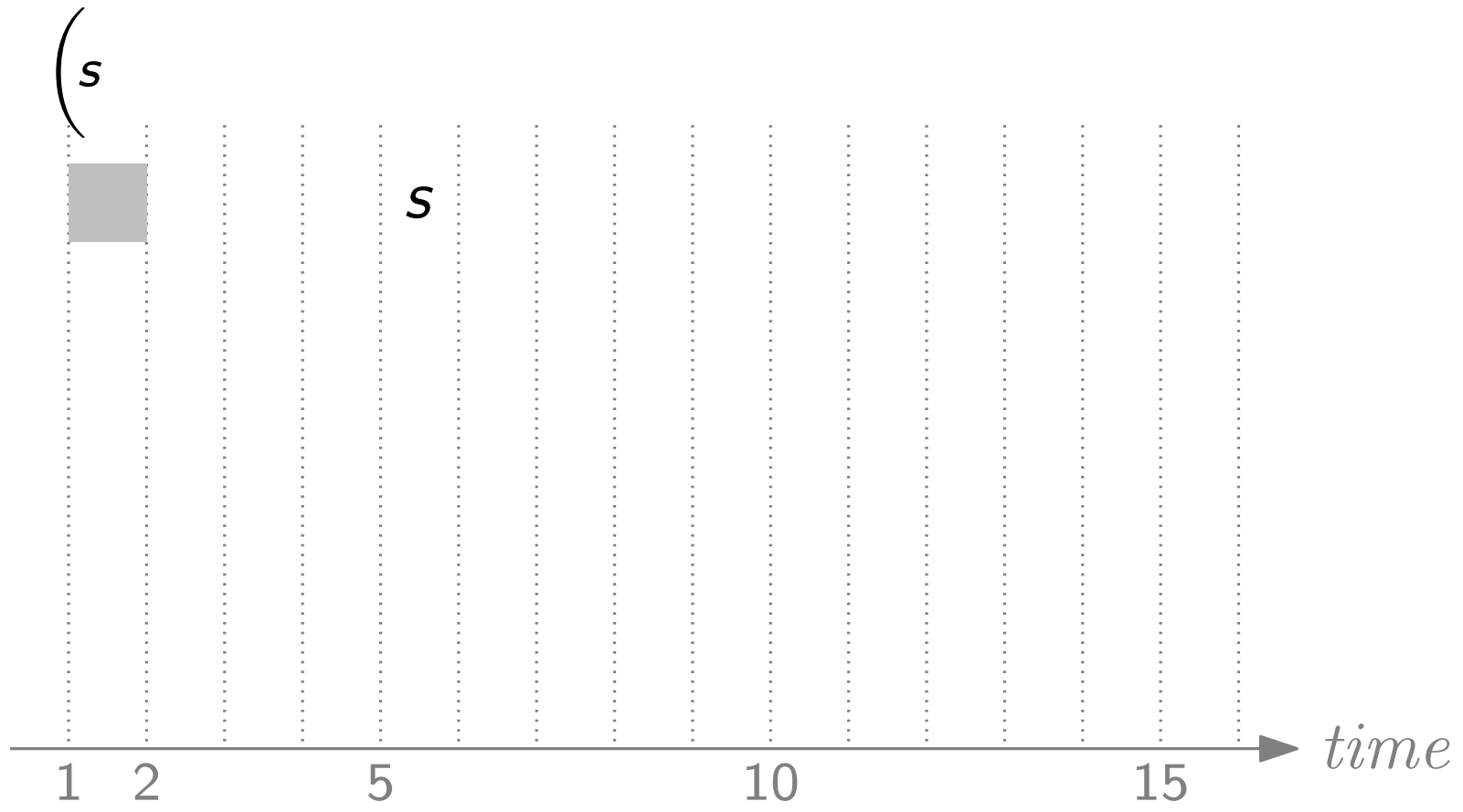
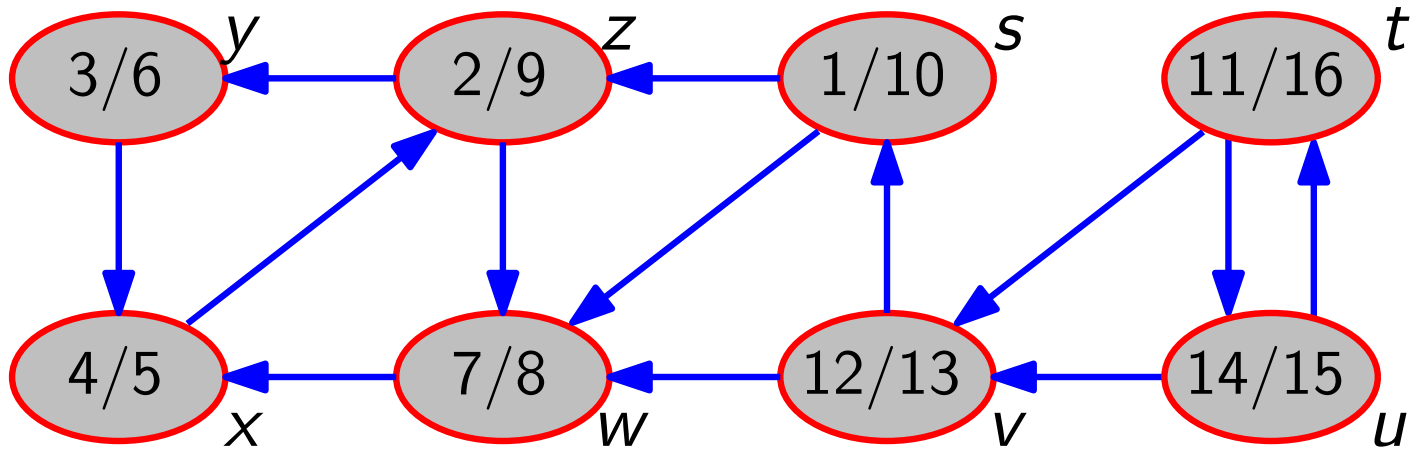
Tiefensuche – Eigenschaften



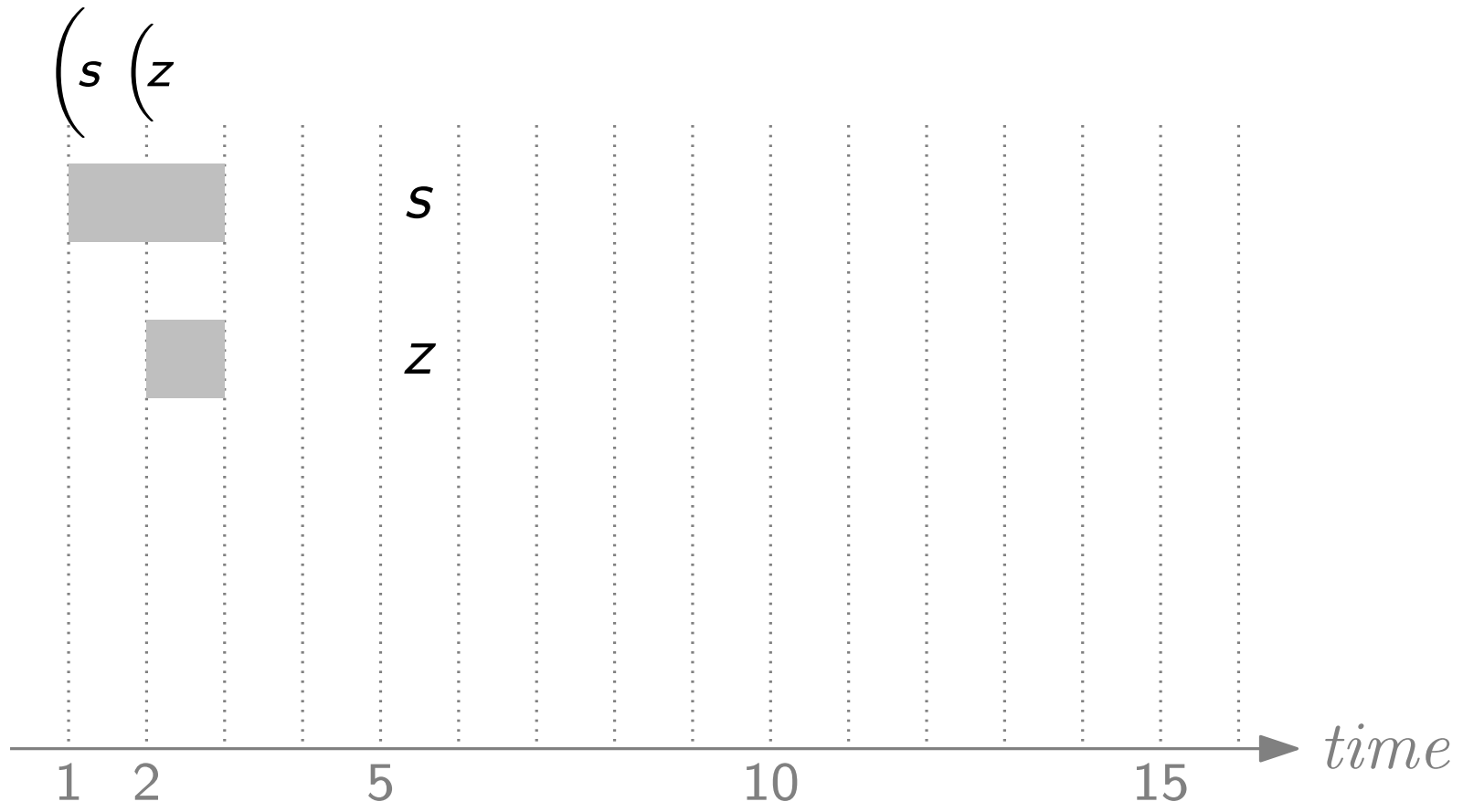
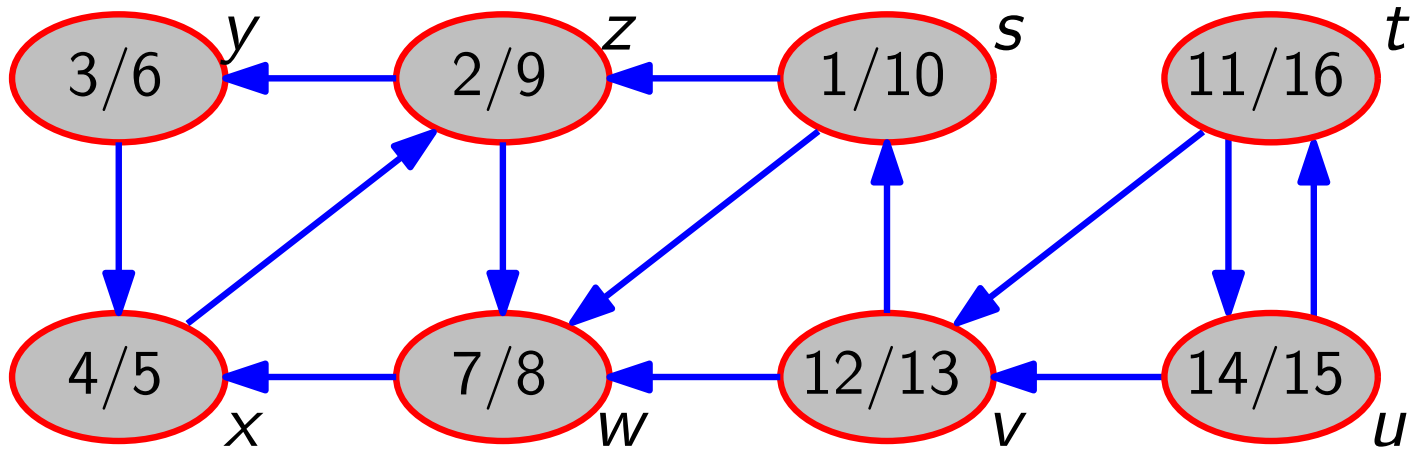
Tiefensuche – Eigenschaften



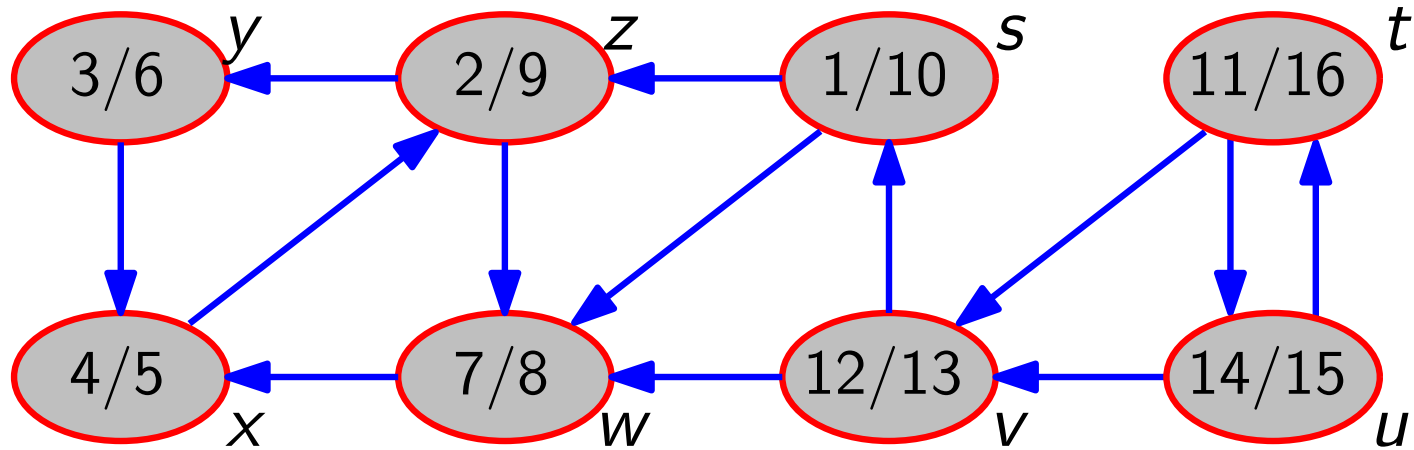
Tiefensuche – Eigenschaften



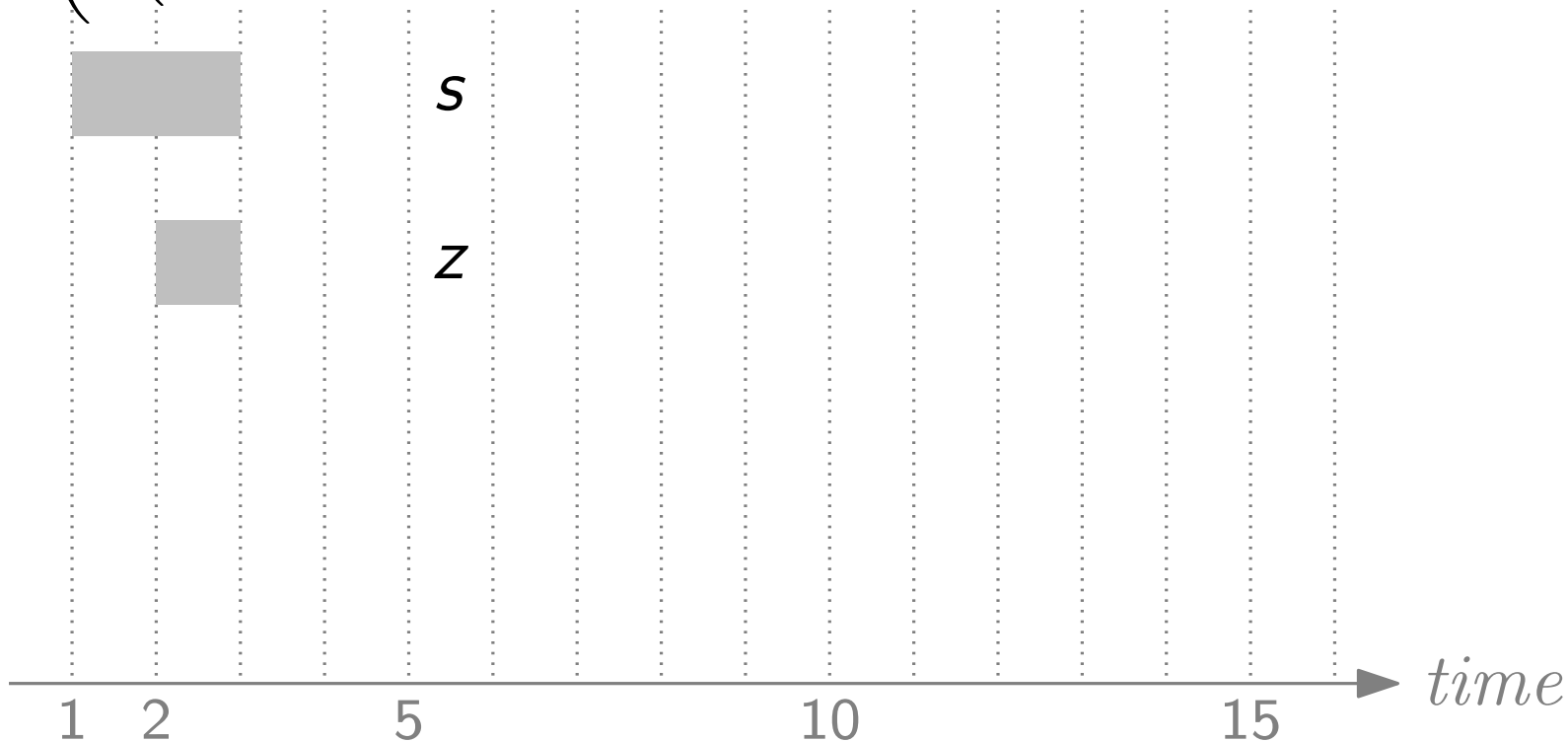
Tiefensuche – Eigenschaften



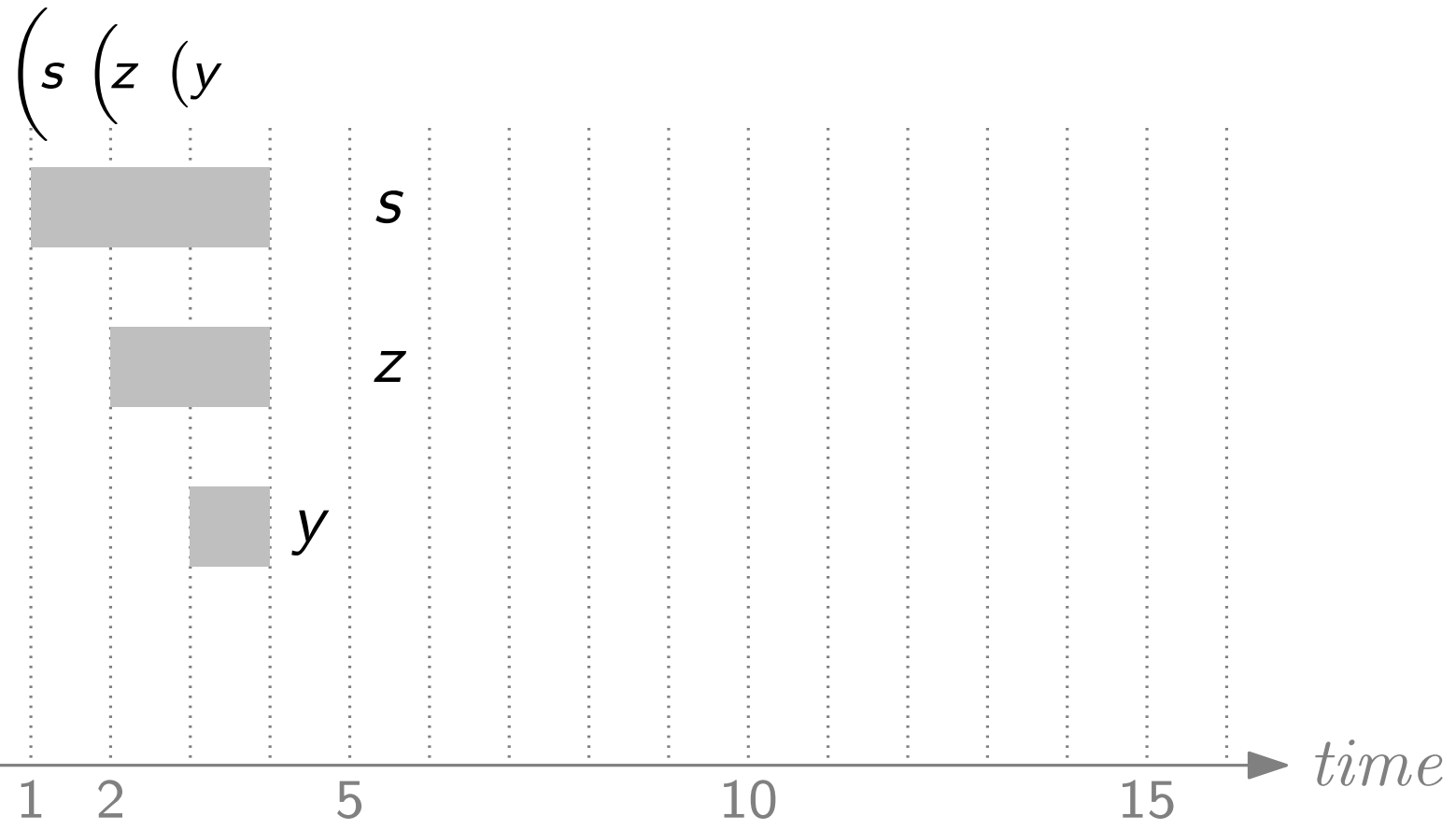
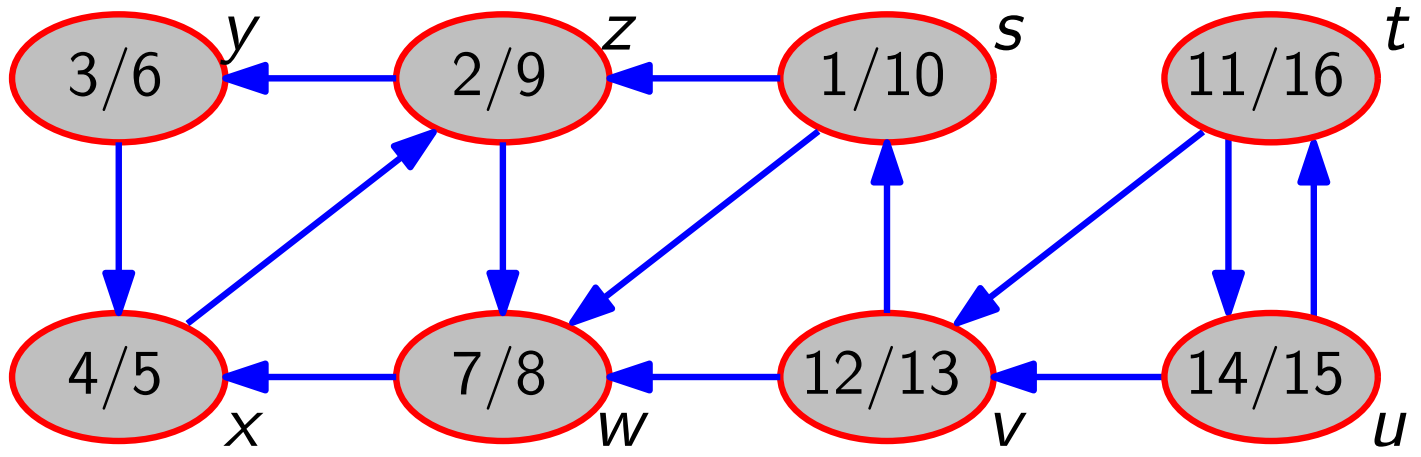
Tiefensuche – Eigenschaften



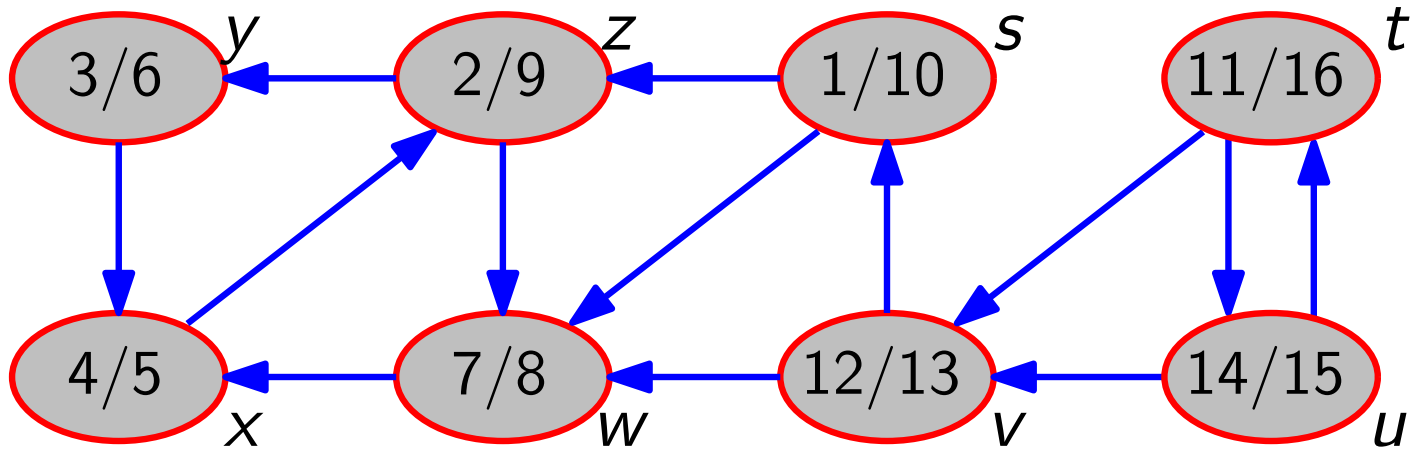
$(s (z (y$



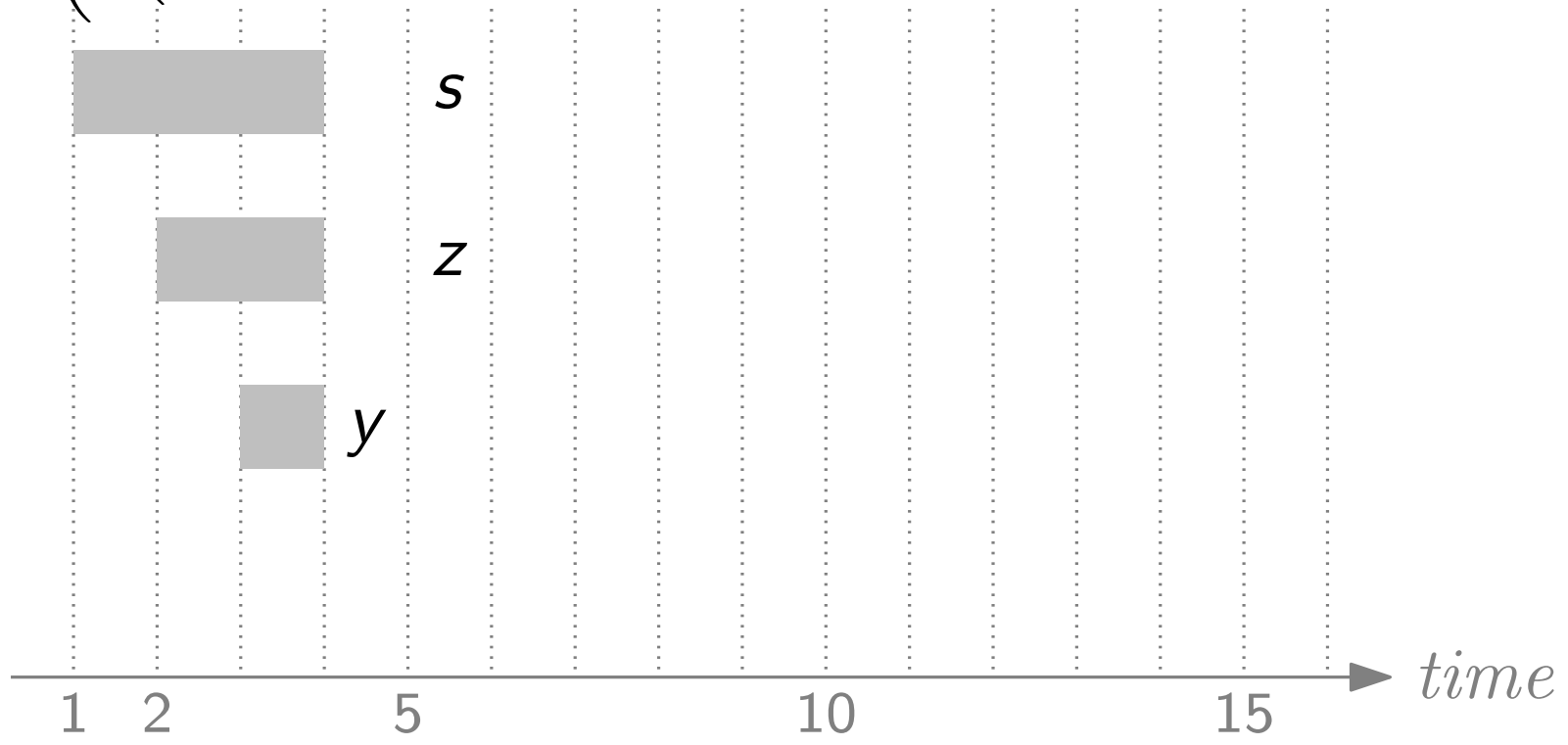
Tiefensuche – Eigenschaften



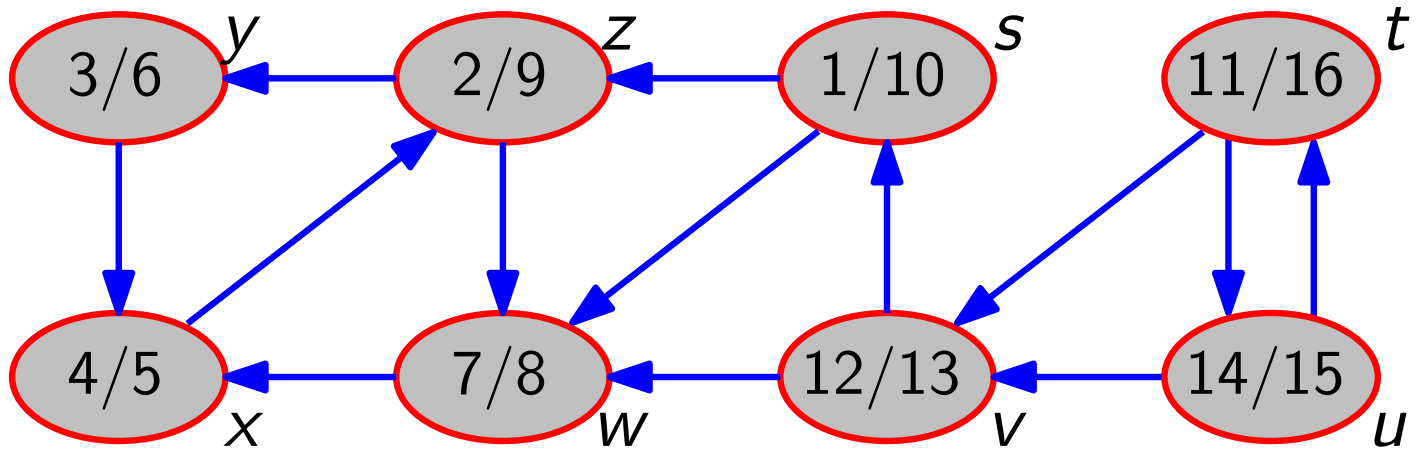
Tiefensuche – Eigenschaften



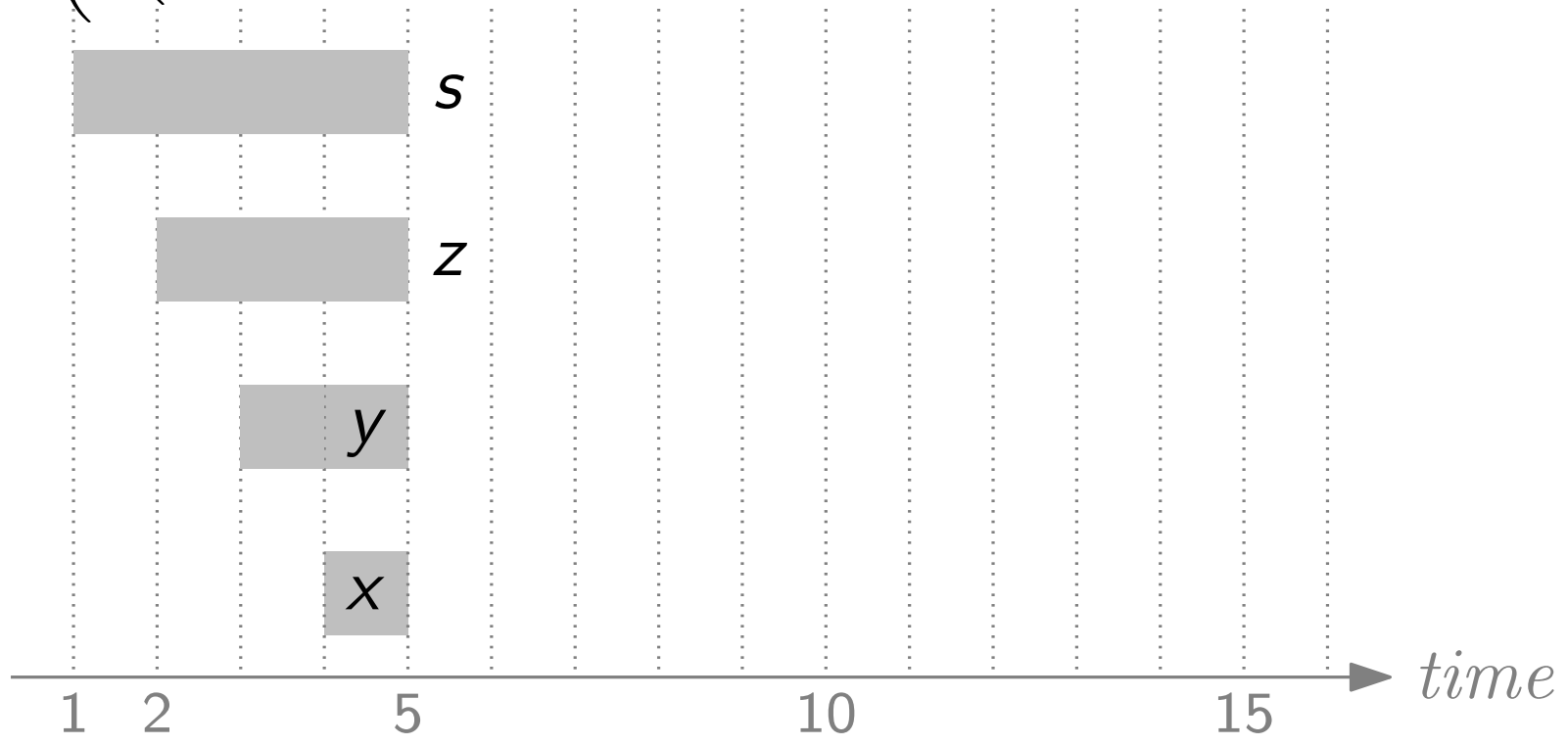
$(s (z (y (x$



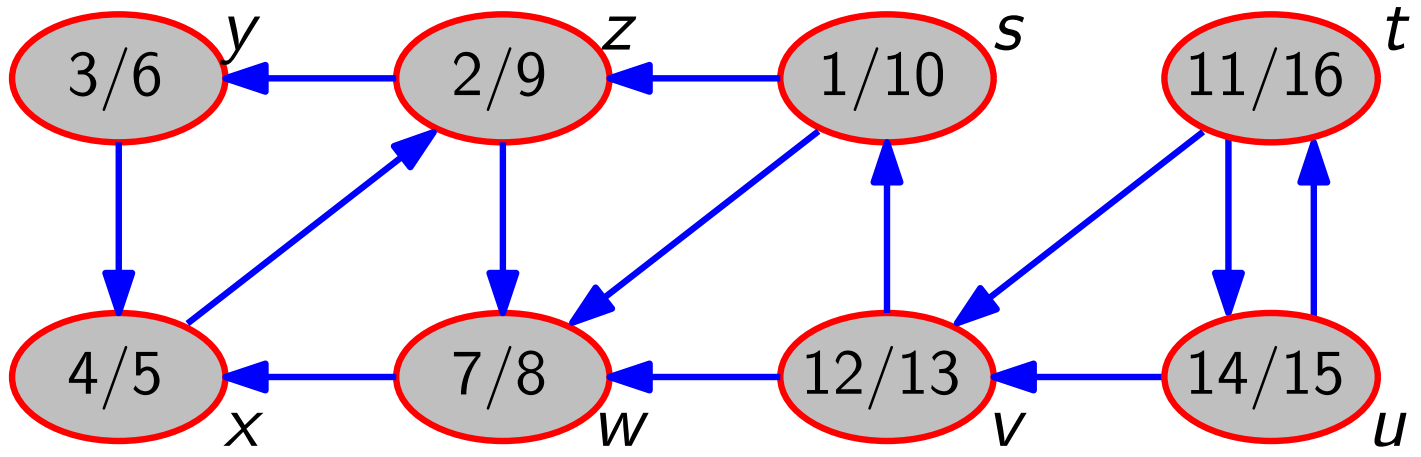
Tiefensuche – Eigenschaften



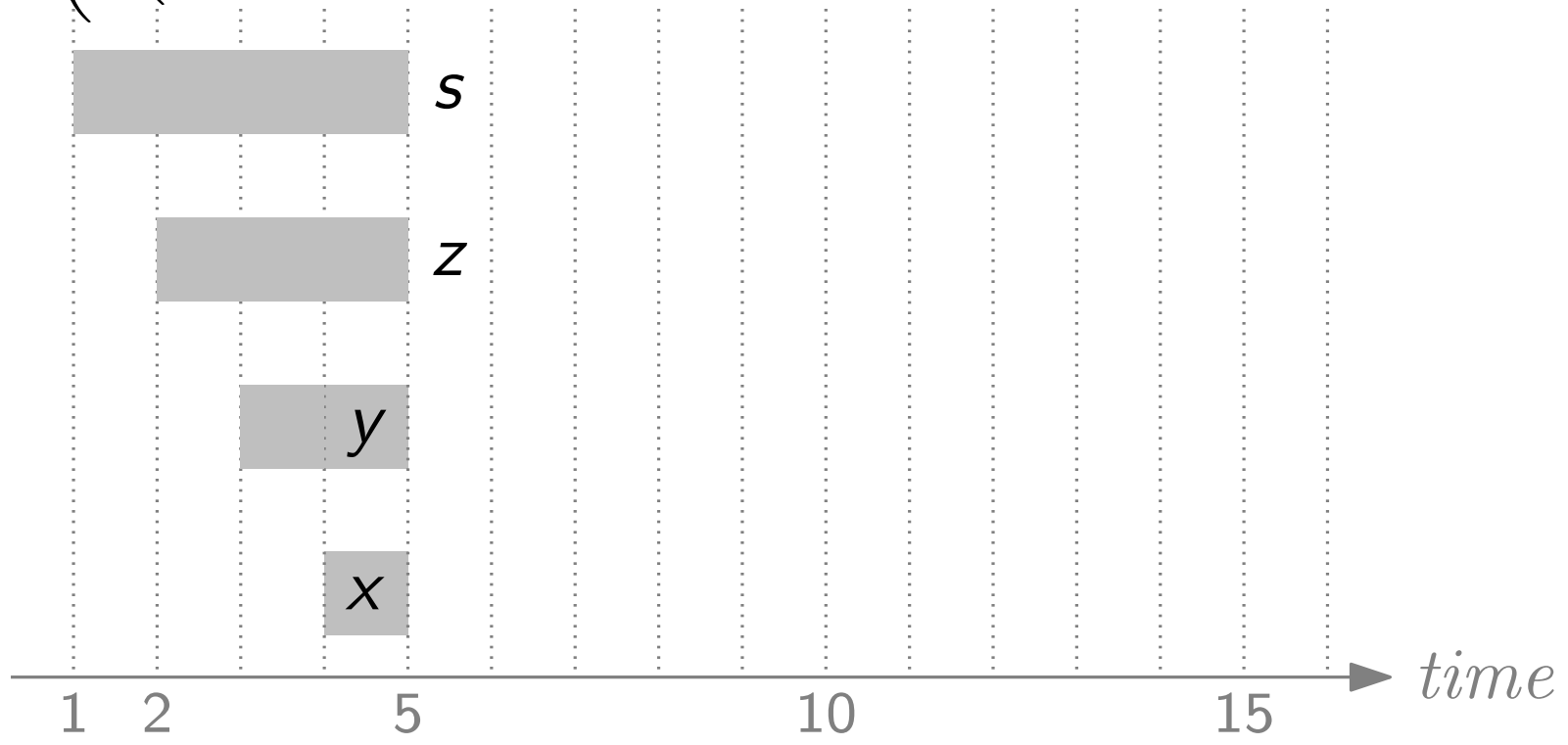
$(s (z (y (x$



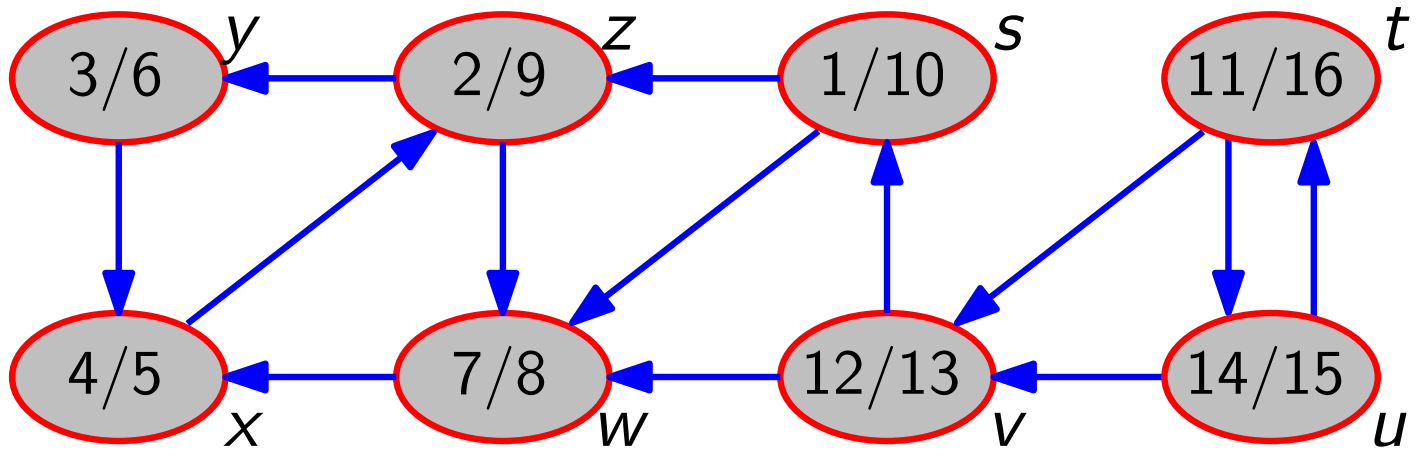
Tiefensuche – Eigenschaften



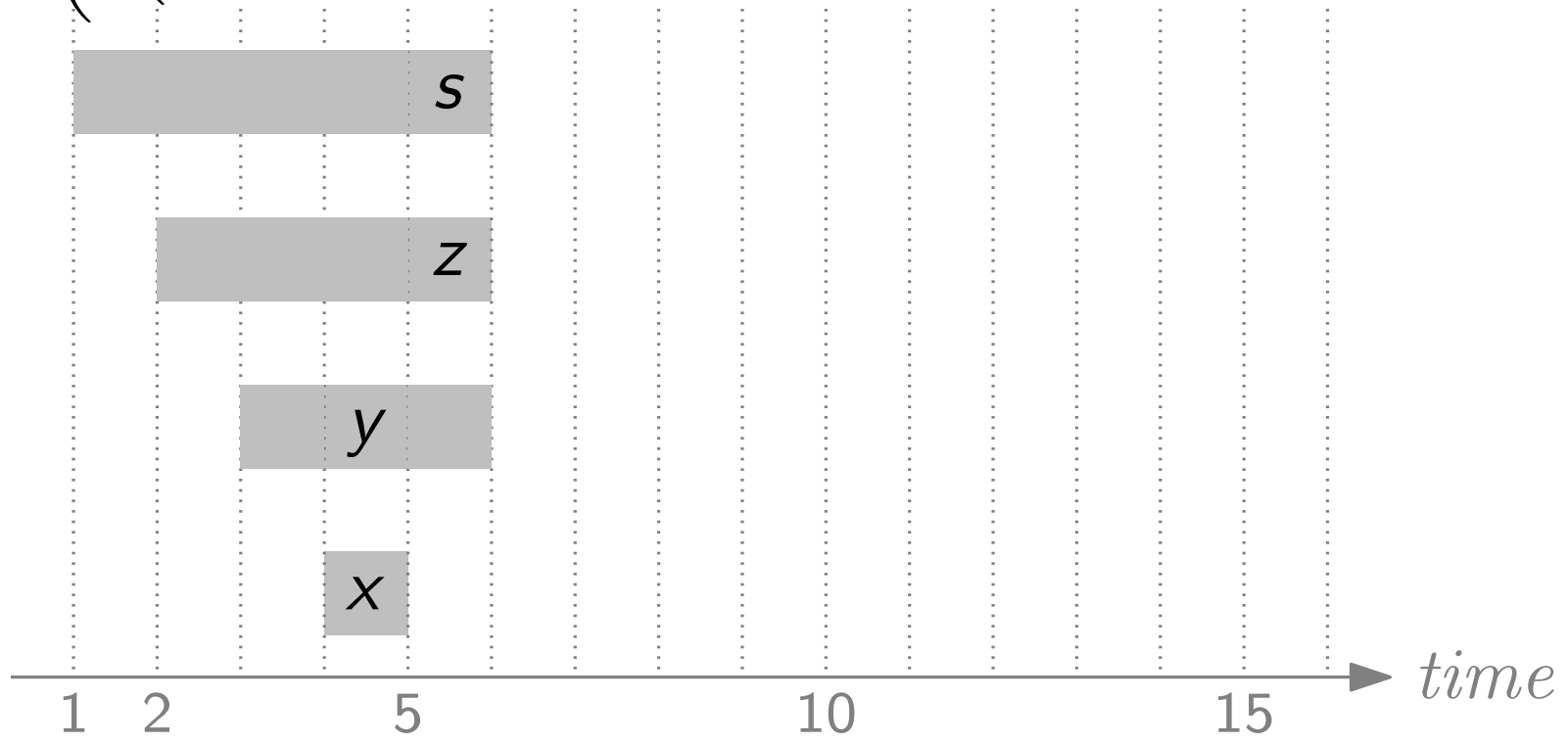
$(s (z (y (x x)$



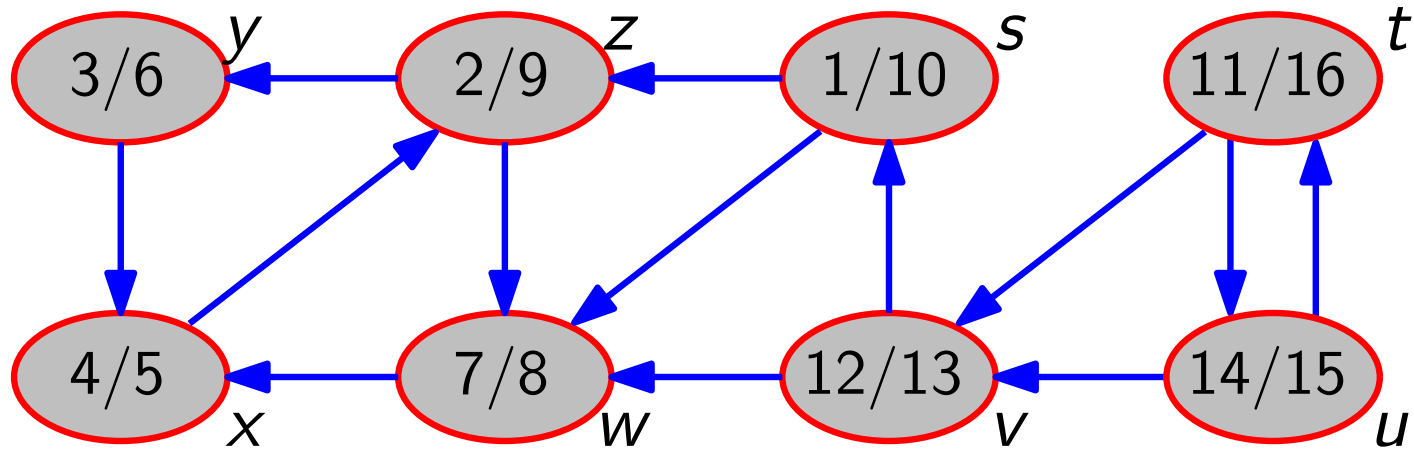
Tiefensuche – Eigenschaften



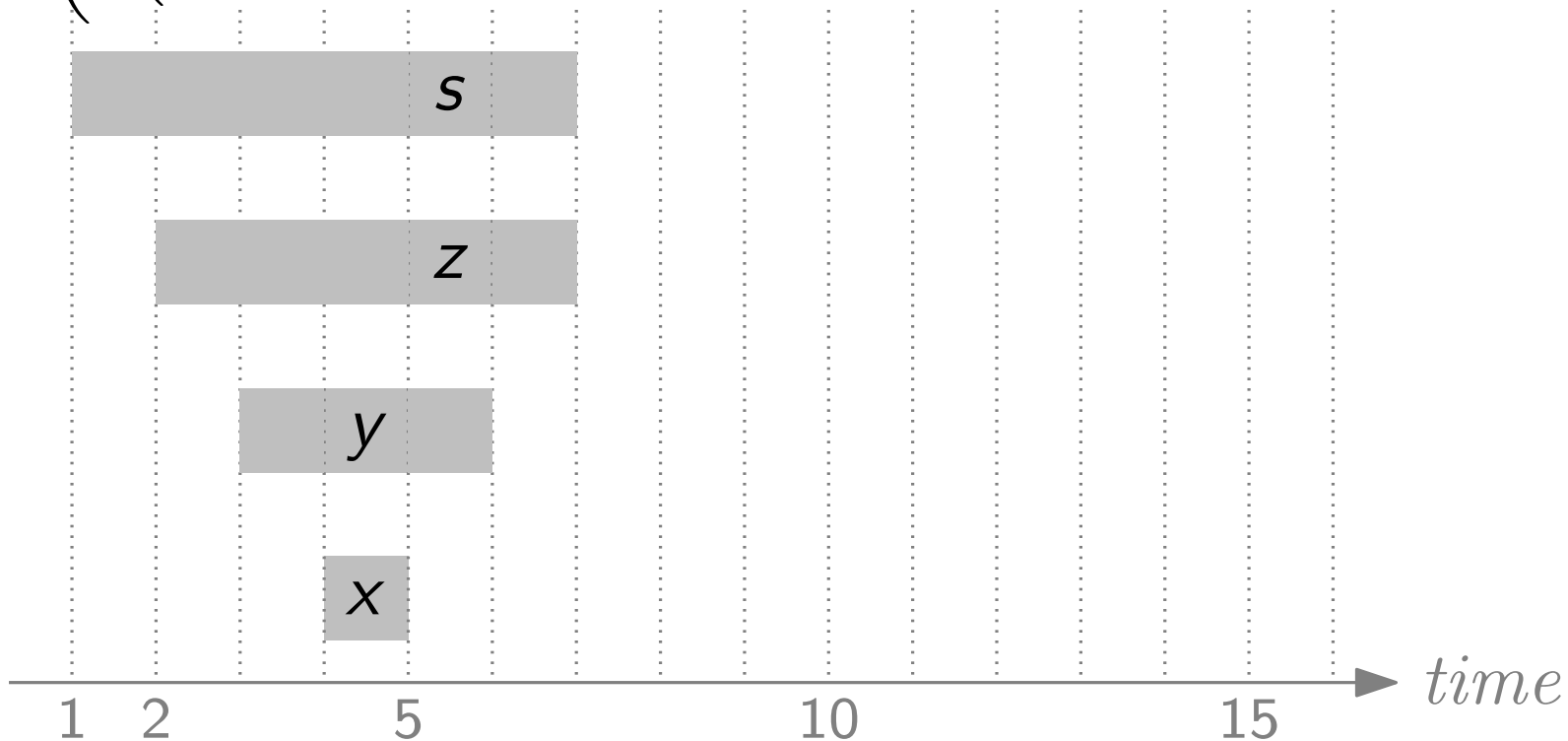
$(s (z (y (x x) y))$



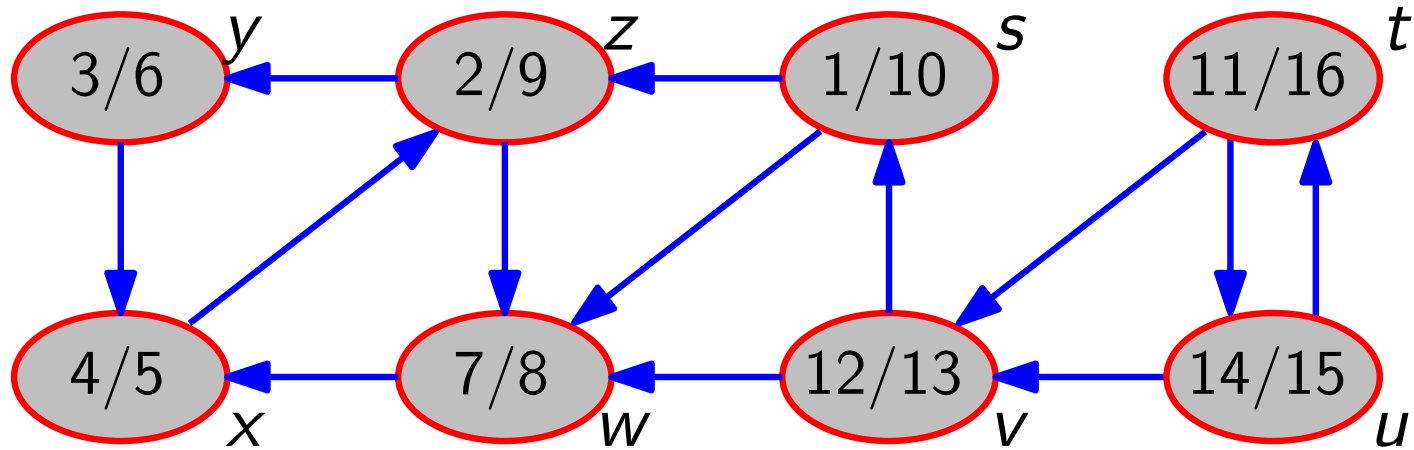
Tiefensuche – Eigenschaften



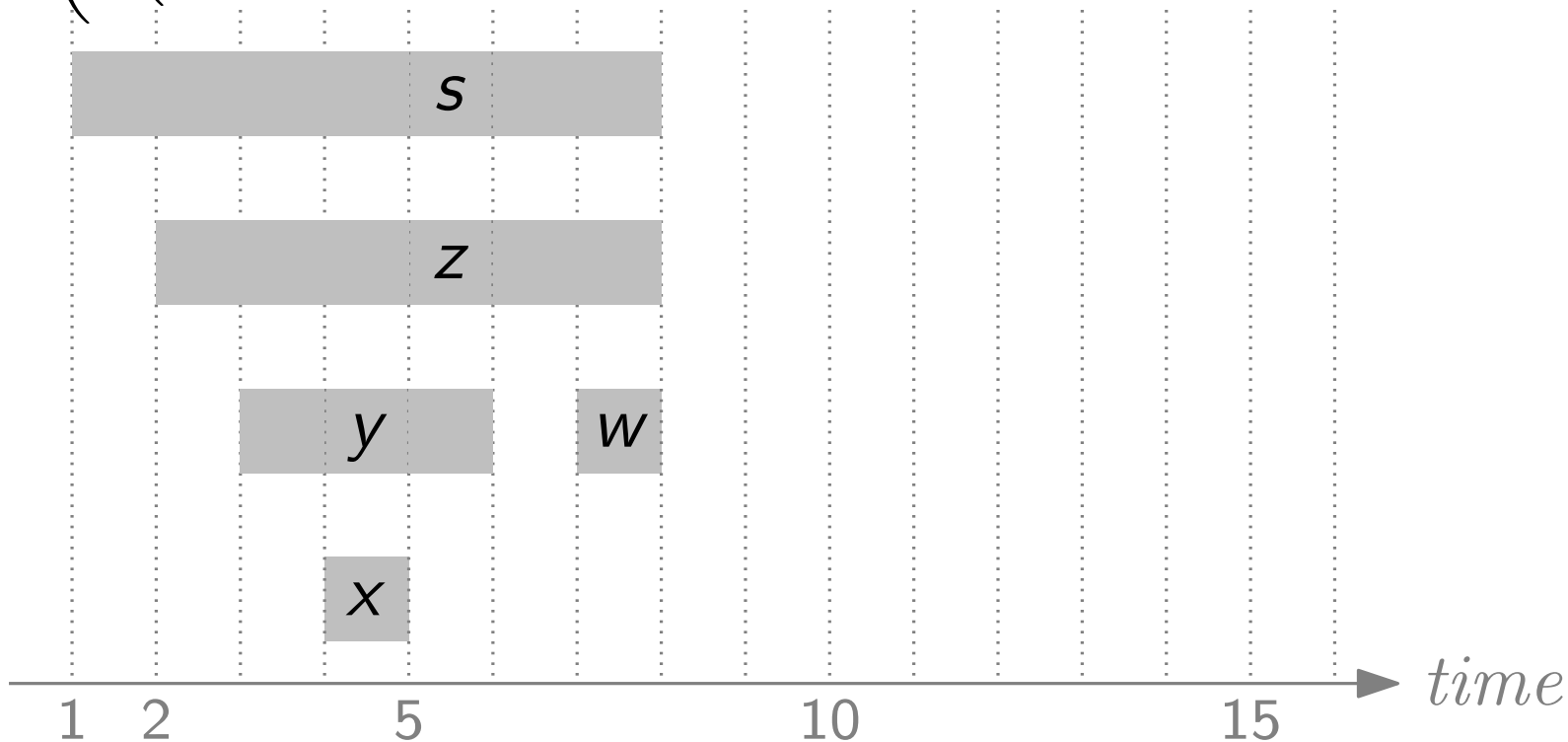
$(s (z (y (x x) y))$



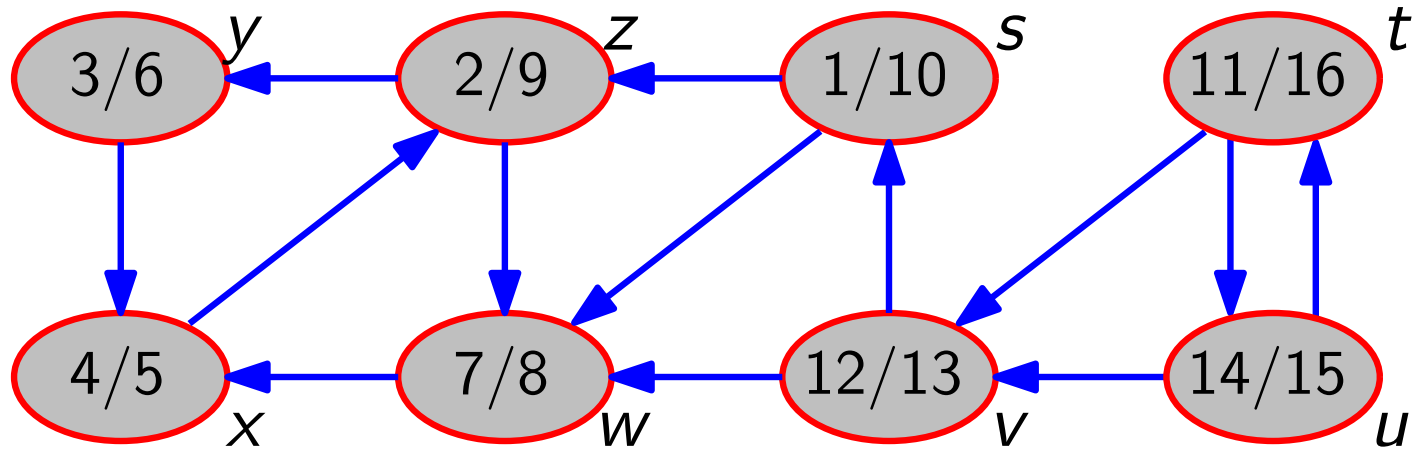
Tiefensuche – Eigenschaften



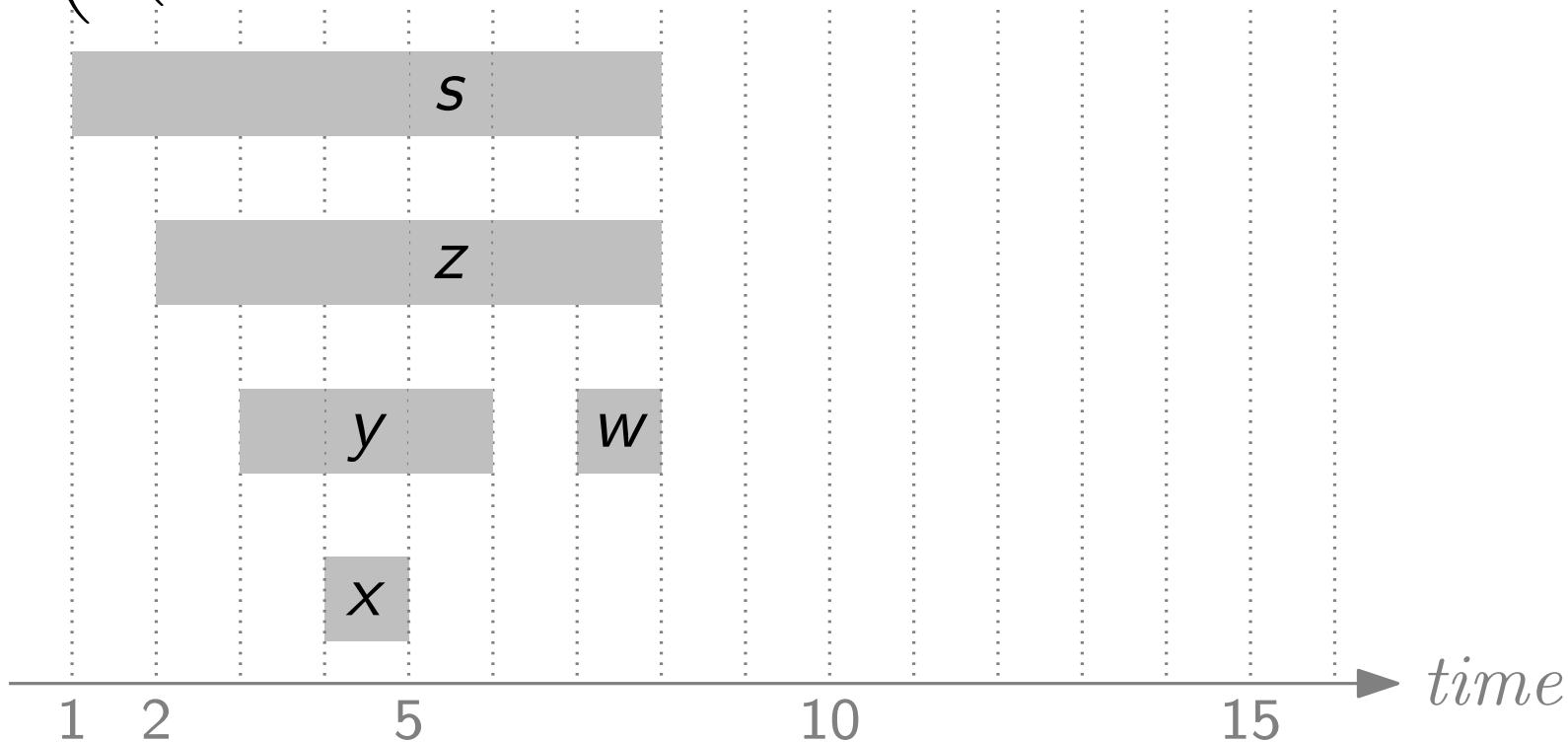
$(s (z (y (x x) y) (w$



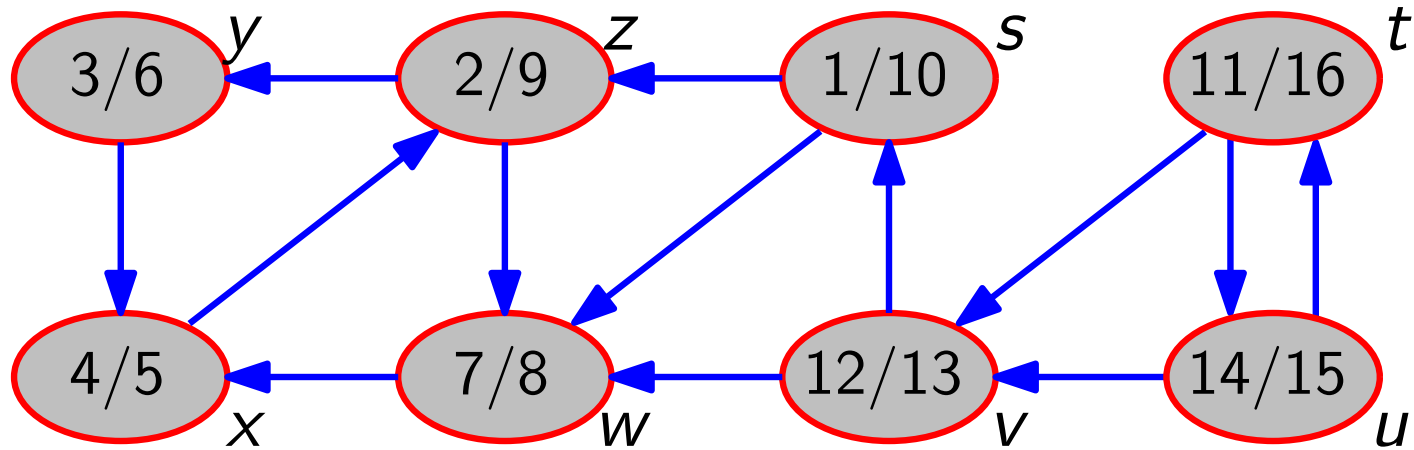
Tiefensuche – Eigenschaften



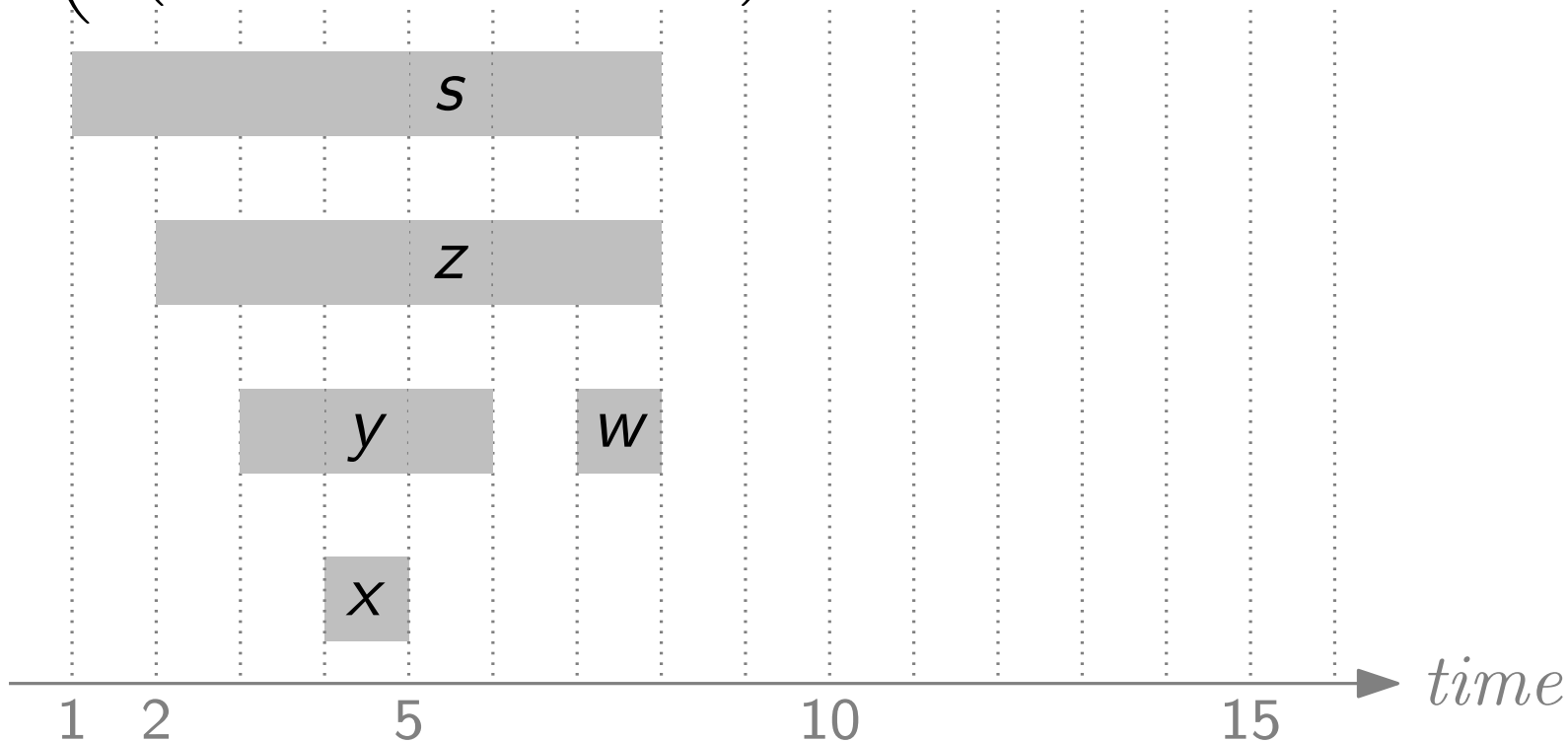
$(s (z (y (x x) y) (w w)))$



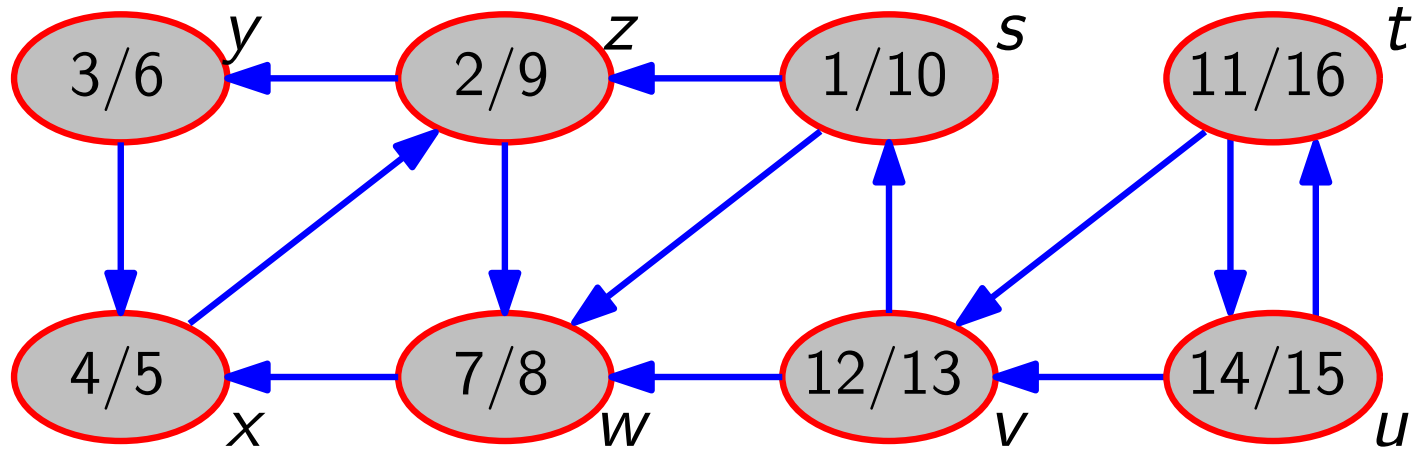
Tiefensuche – Eigenschaften



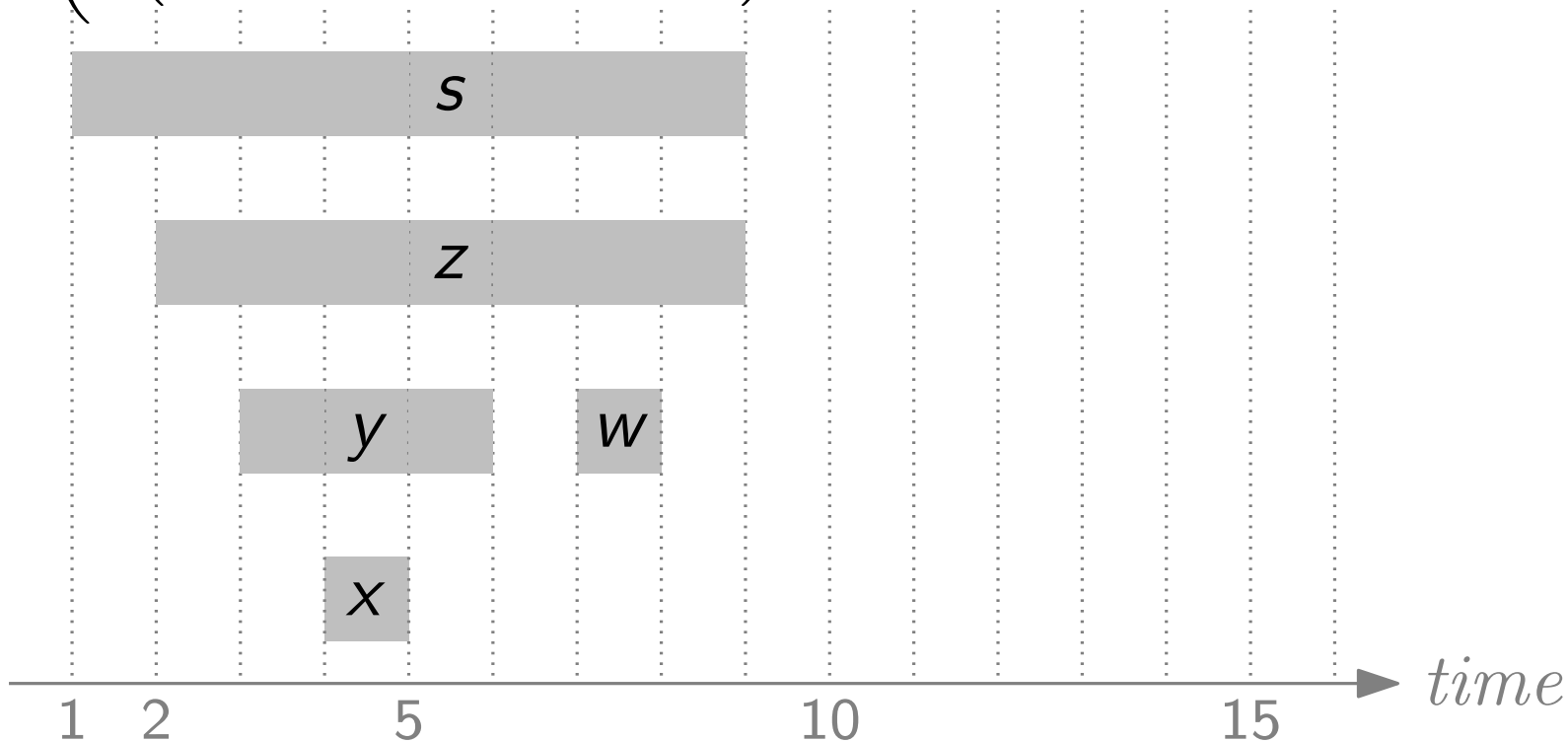
$(s (z (y (x x) y) (w w) z))$



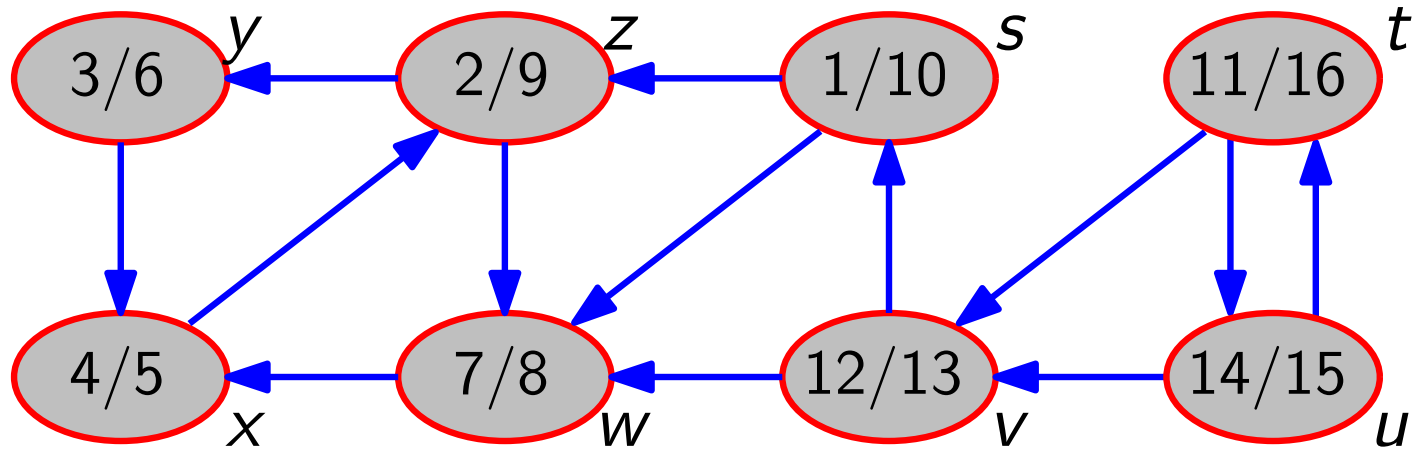
Tiefensuche – Eigenschaften



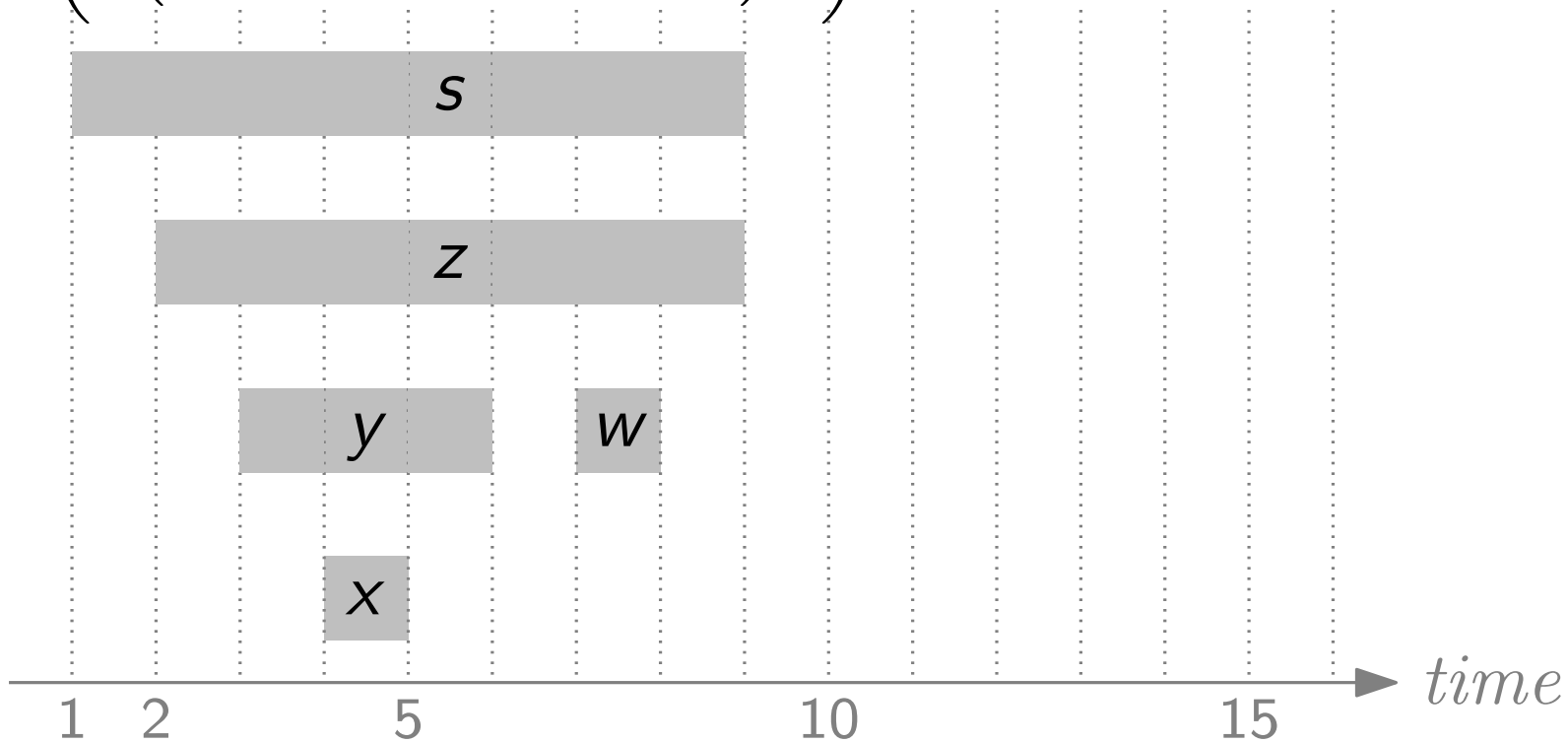
$(s (z (y (x x) y) (w w) z))$



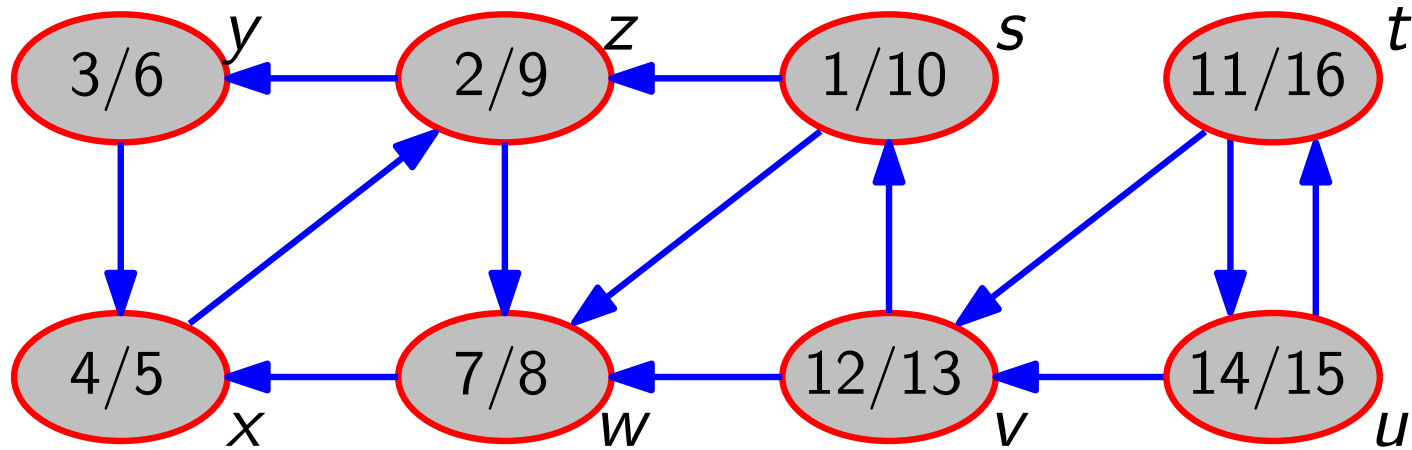
Tiefensuche – Eigenschaften



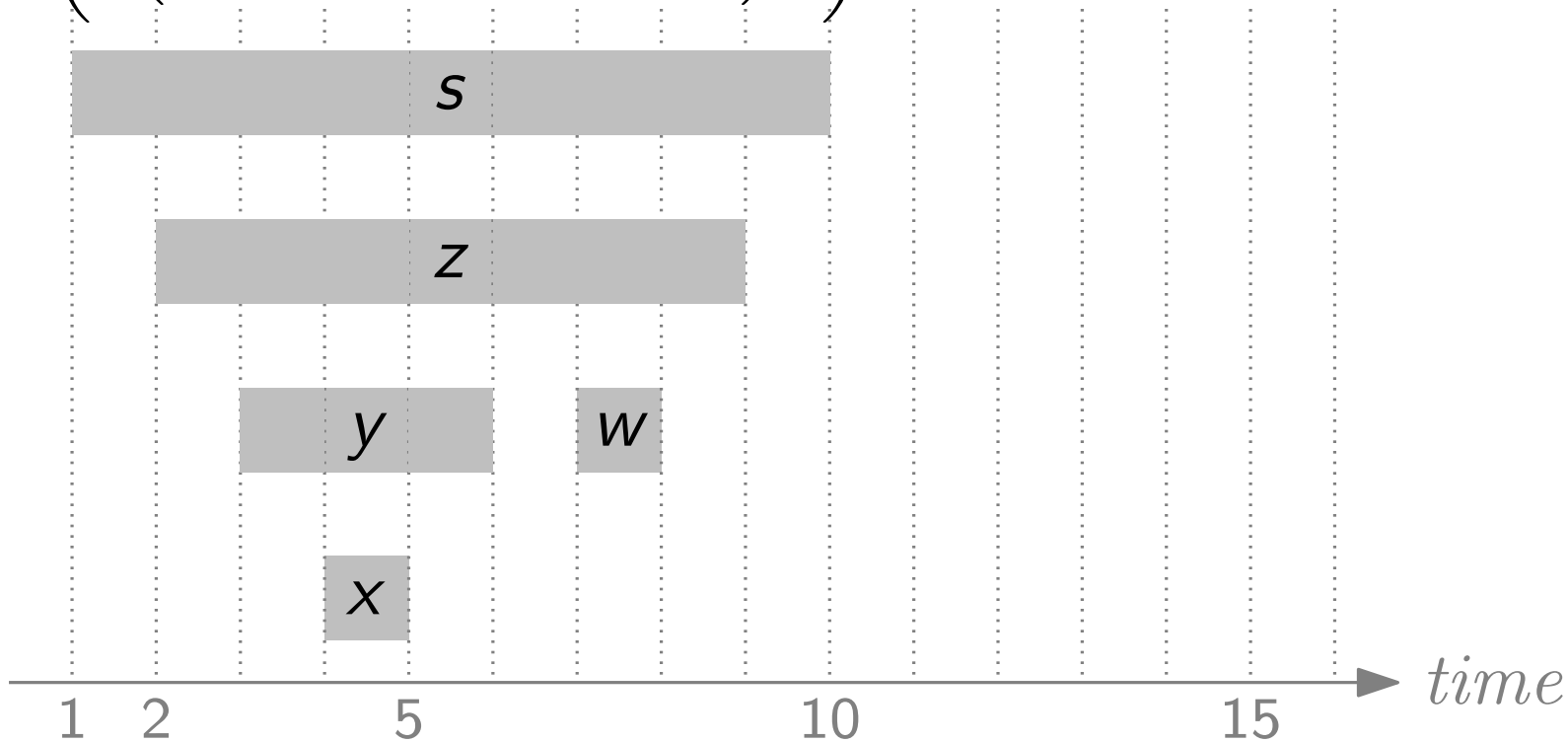
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s)$



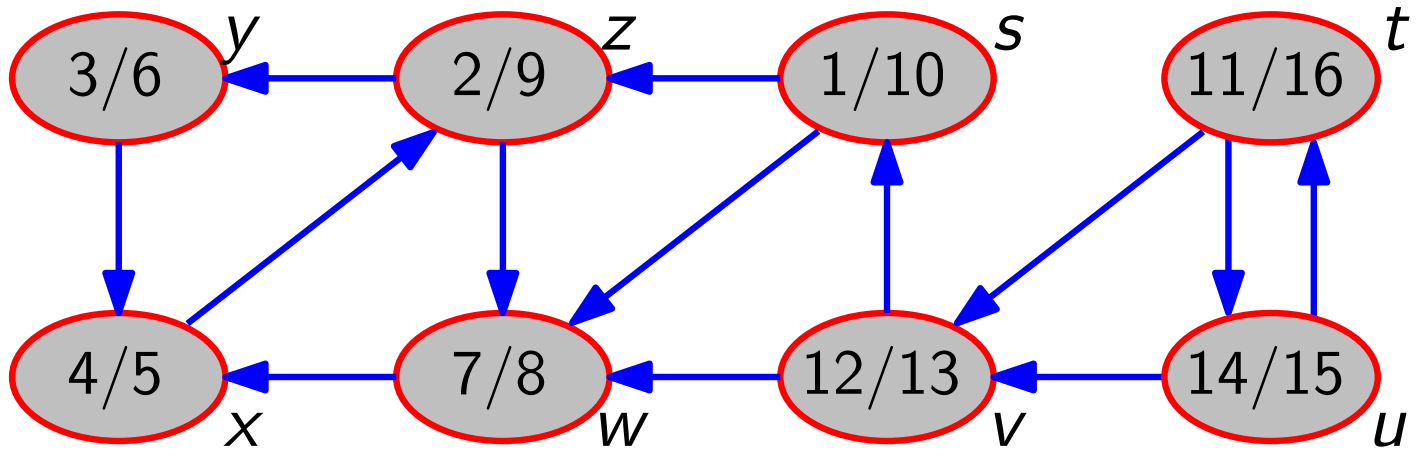
Tiefensuche – Eigenschaften



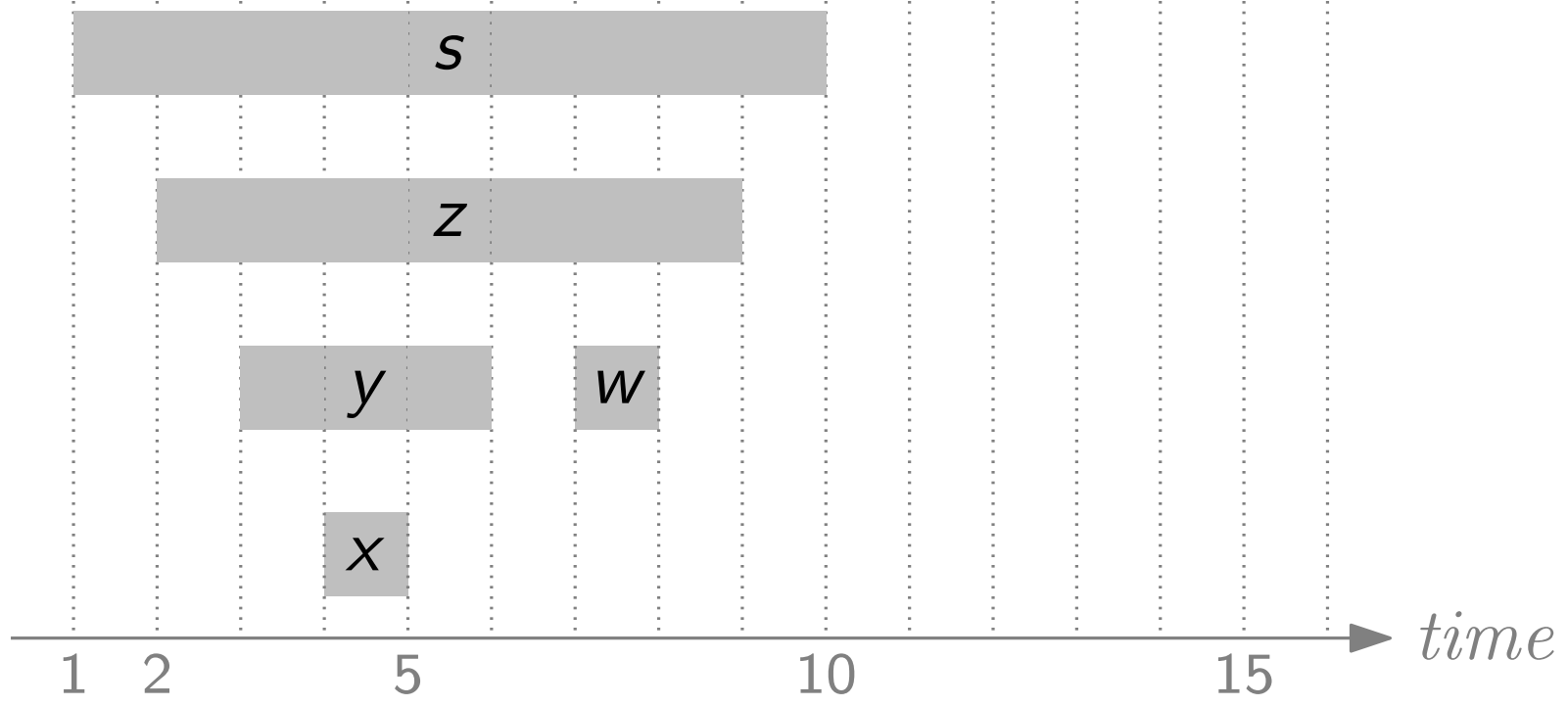
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s)$



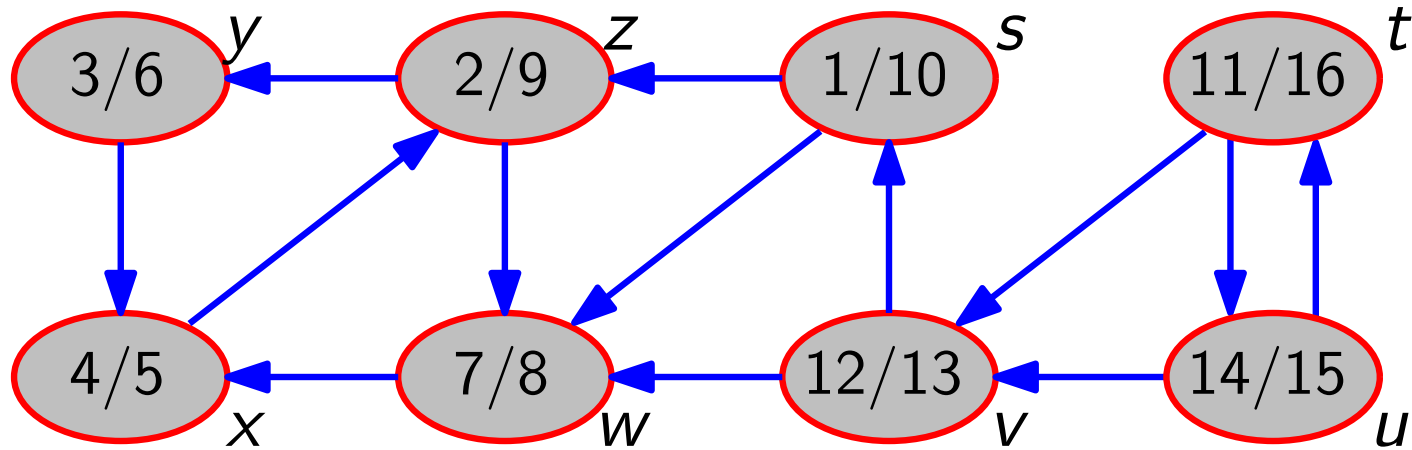
Tiefensuche – Eigenschaften



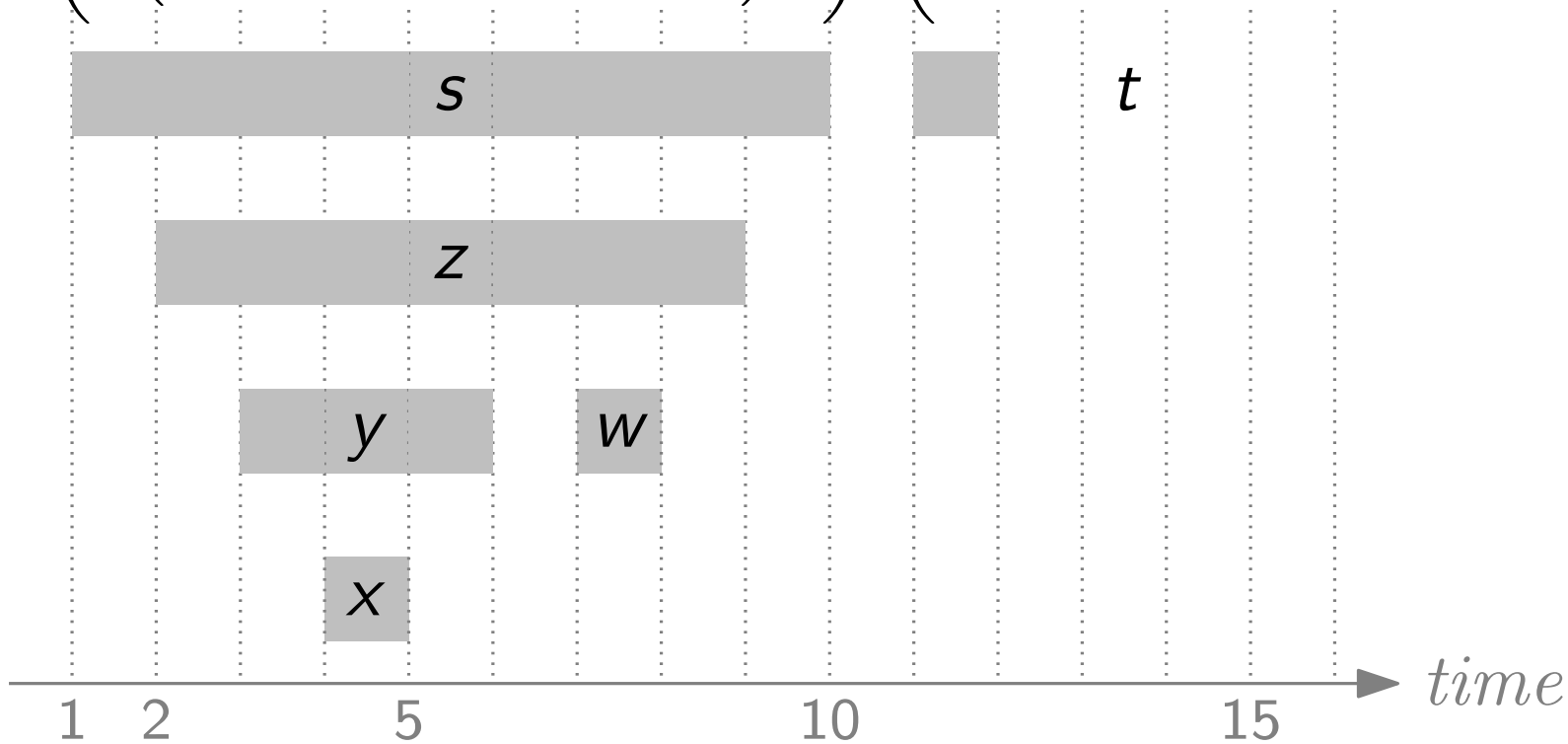
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t$



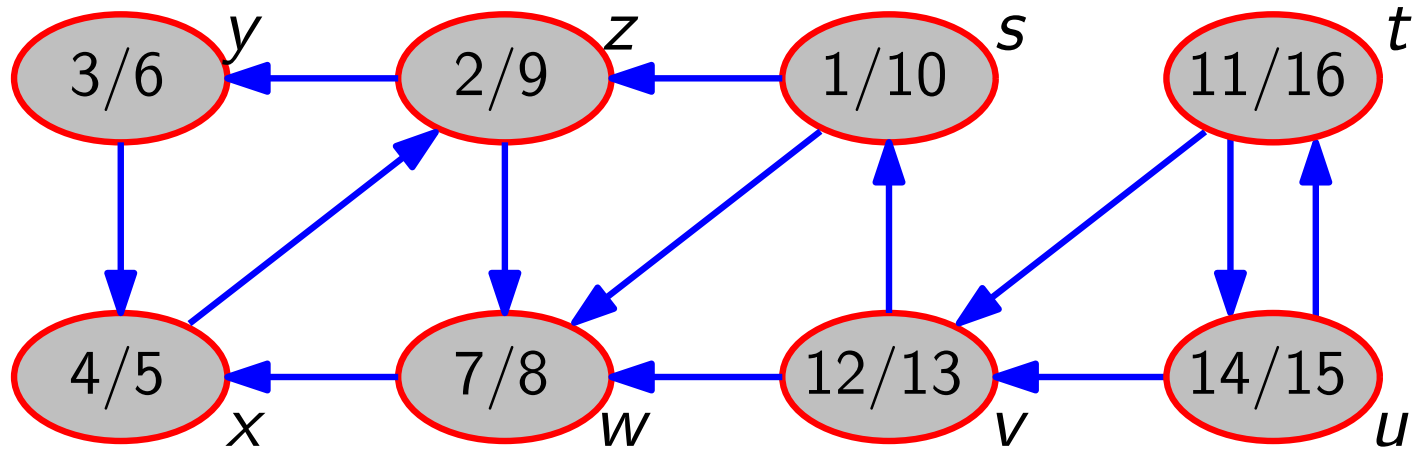
Tiefensuche – Eigenschaften



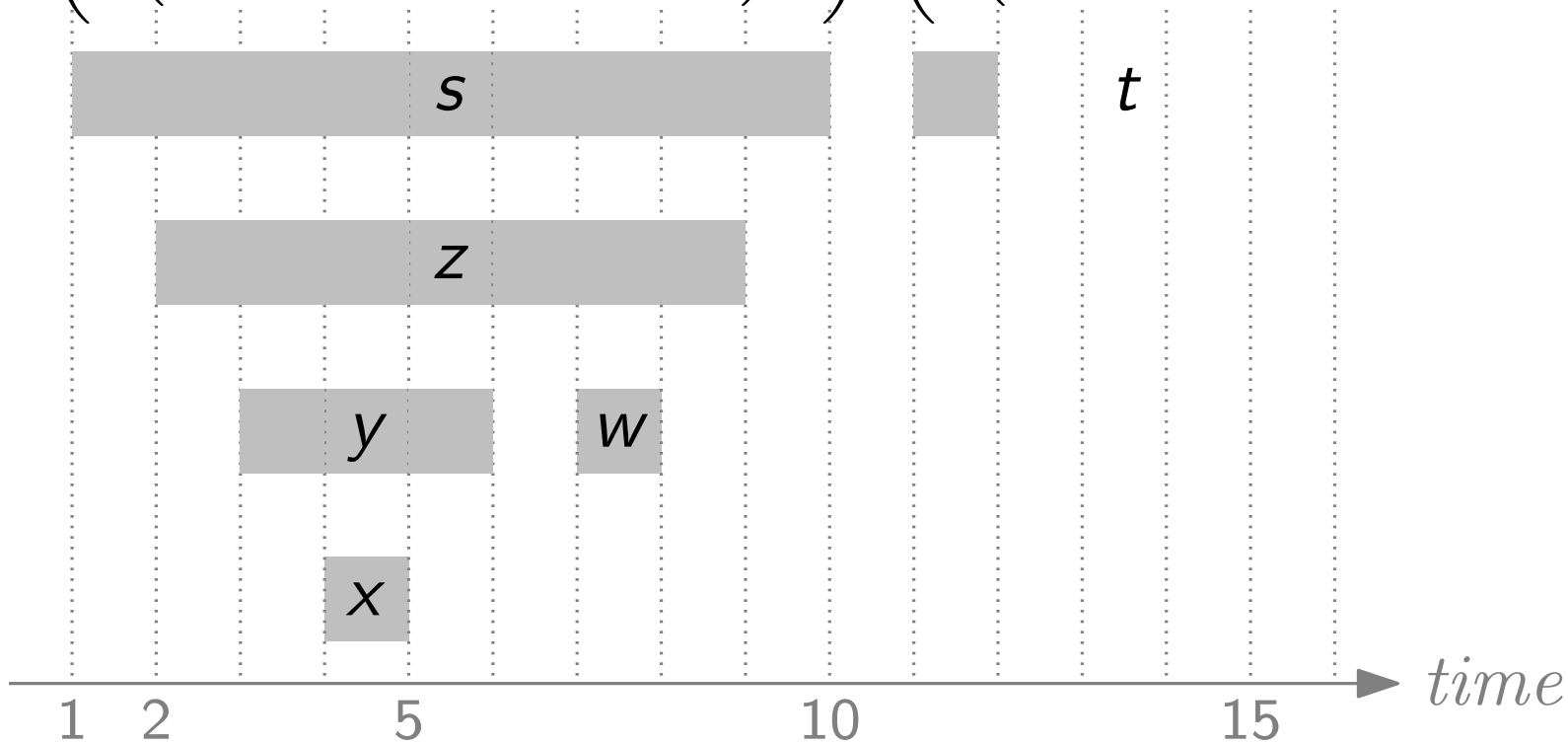
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t$



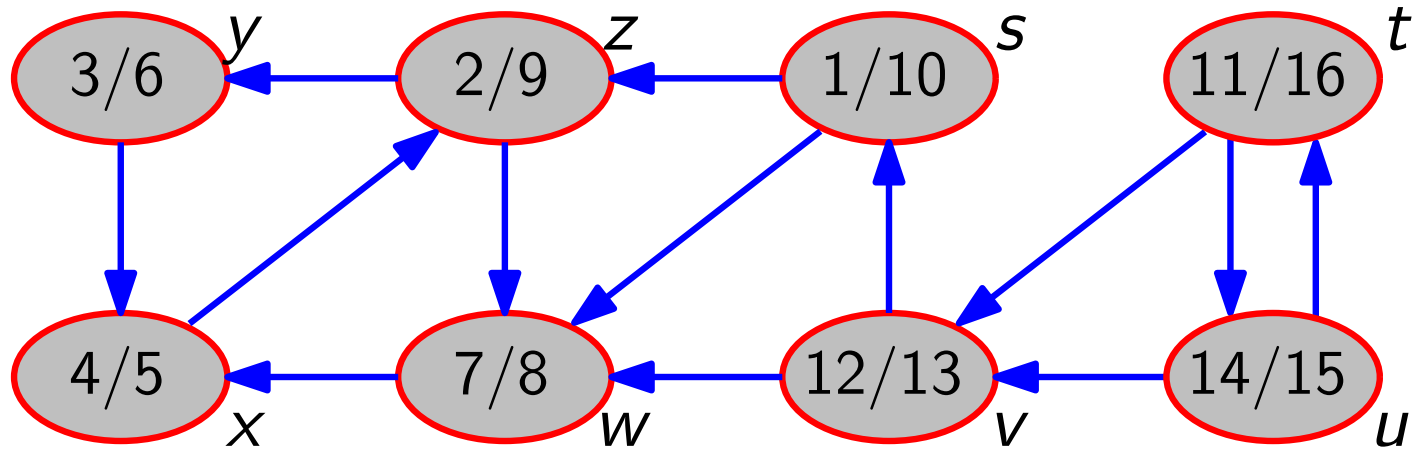
Tiefensuche – Eigenschaften



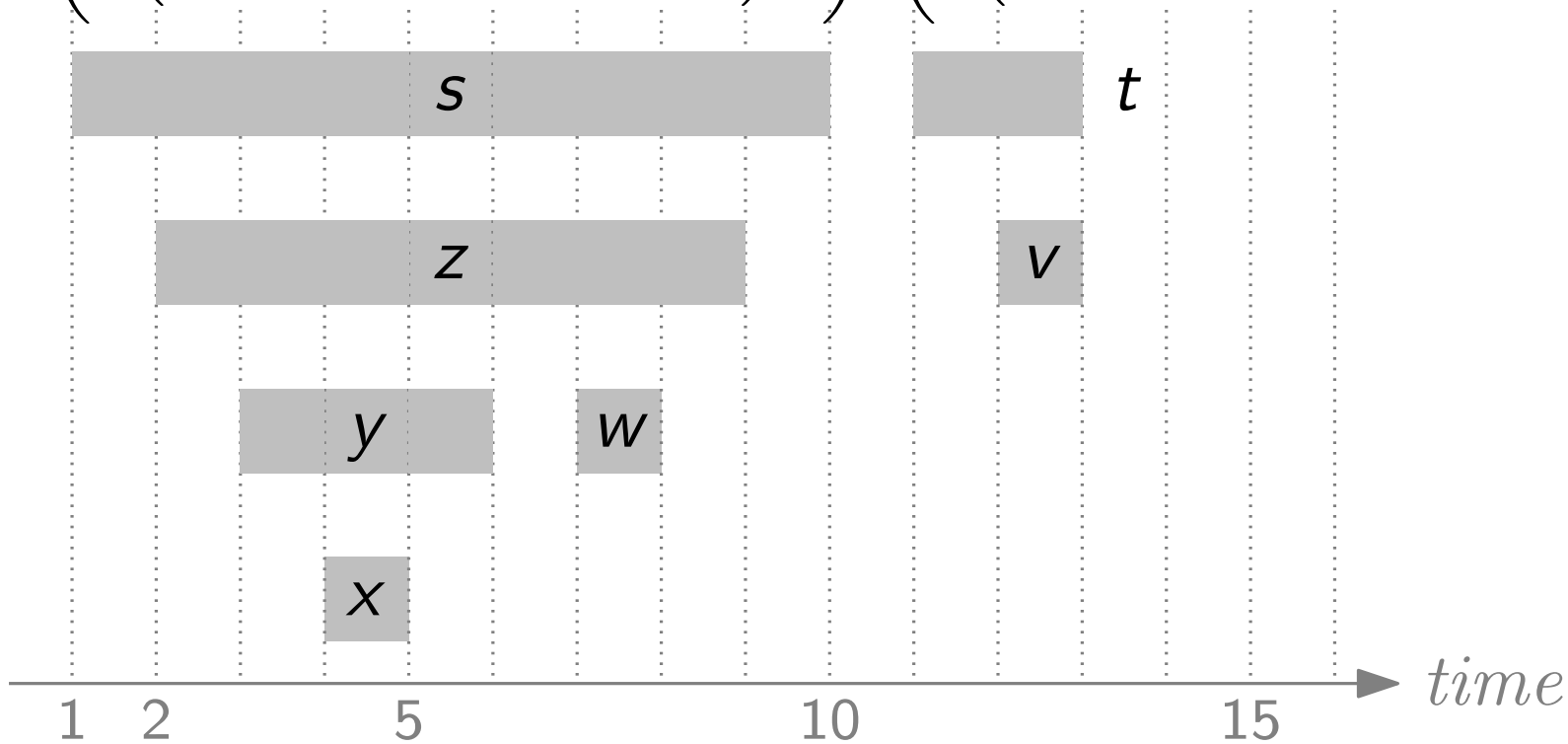
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v$



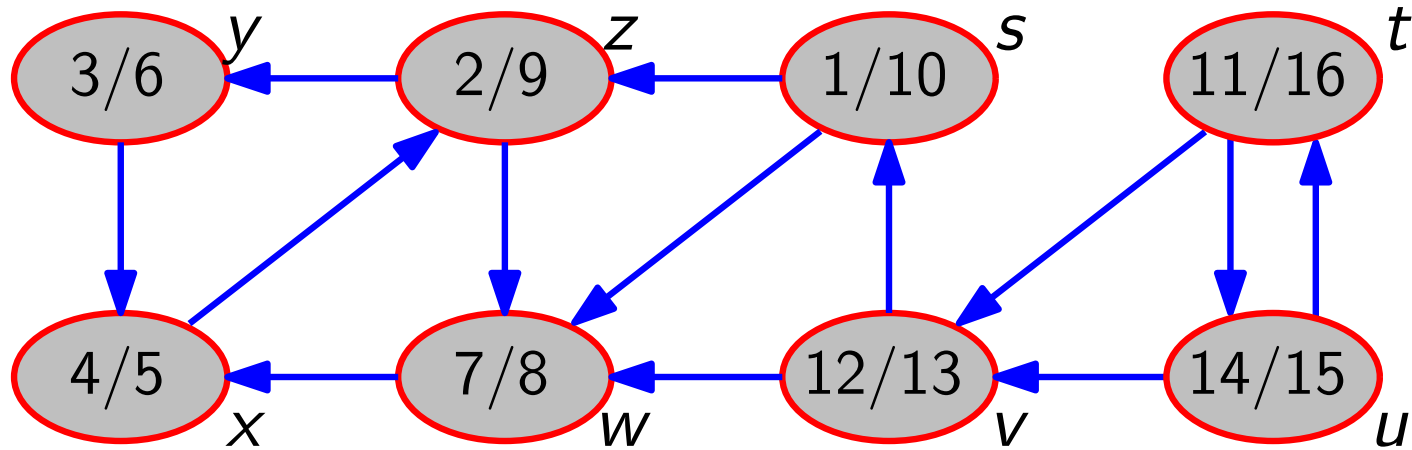
Tiefensuche – Eigenschaften



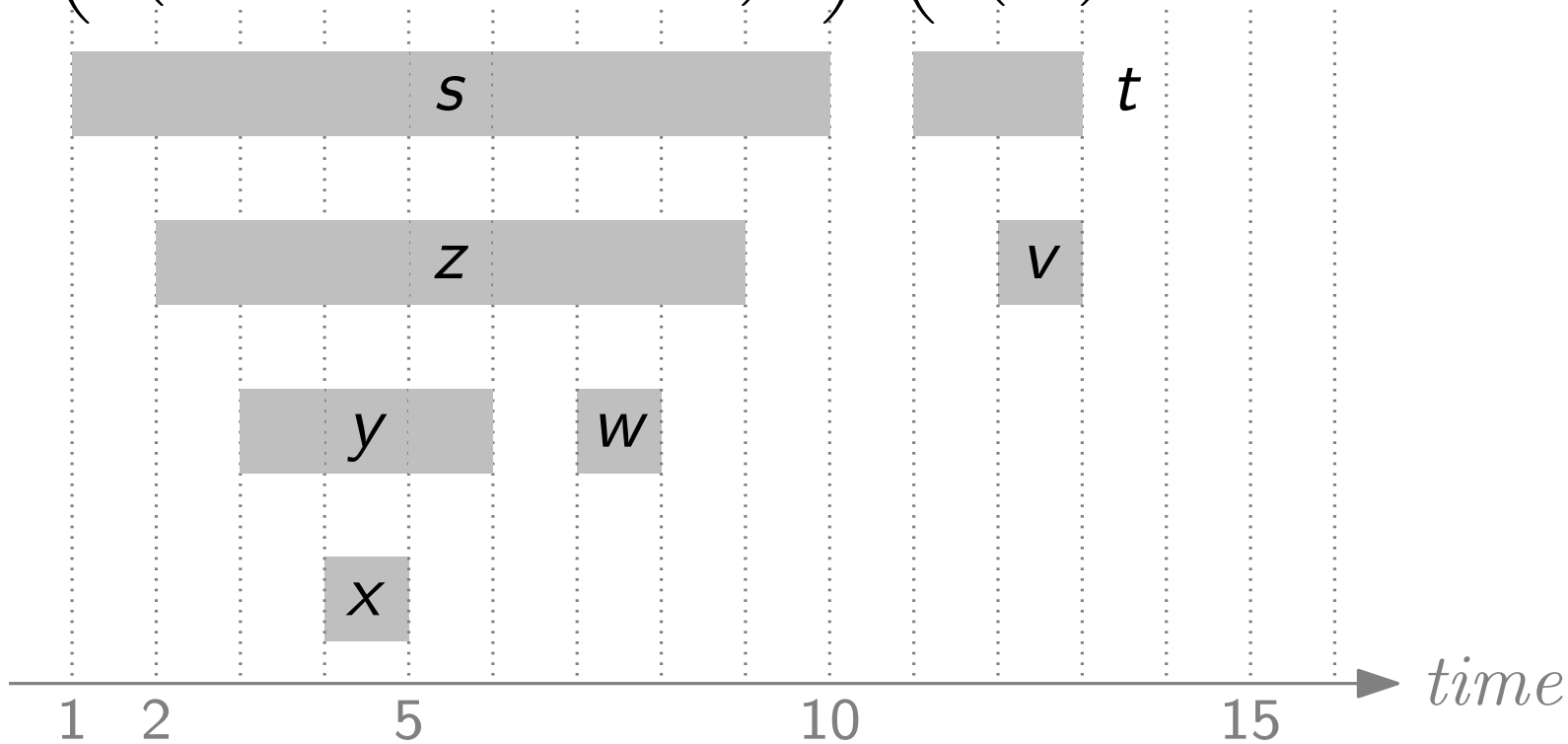
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v$



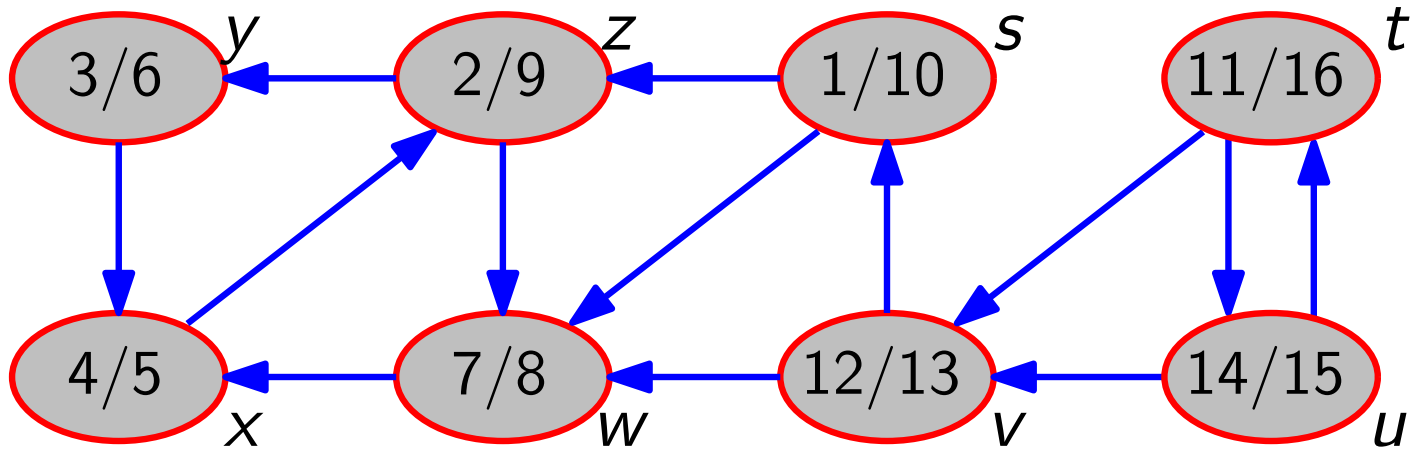
Tiefensuche – Eigenschaften



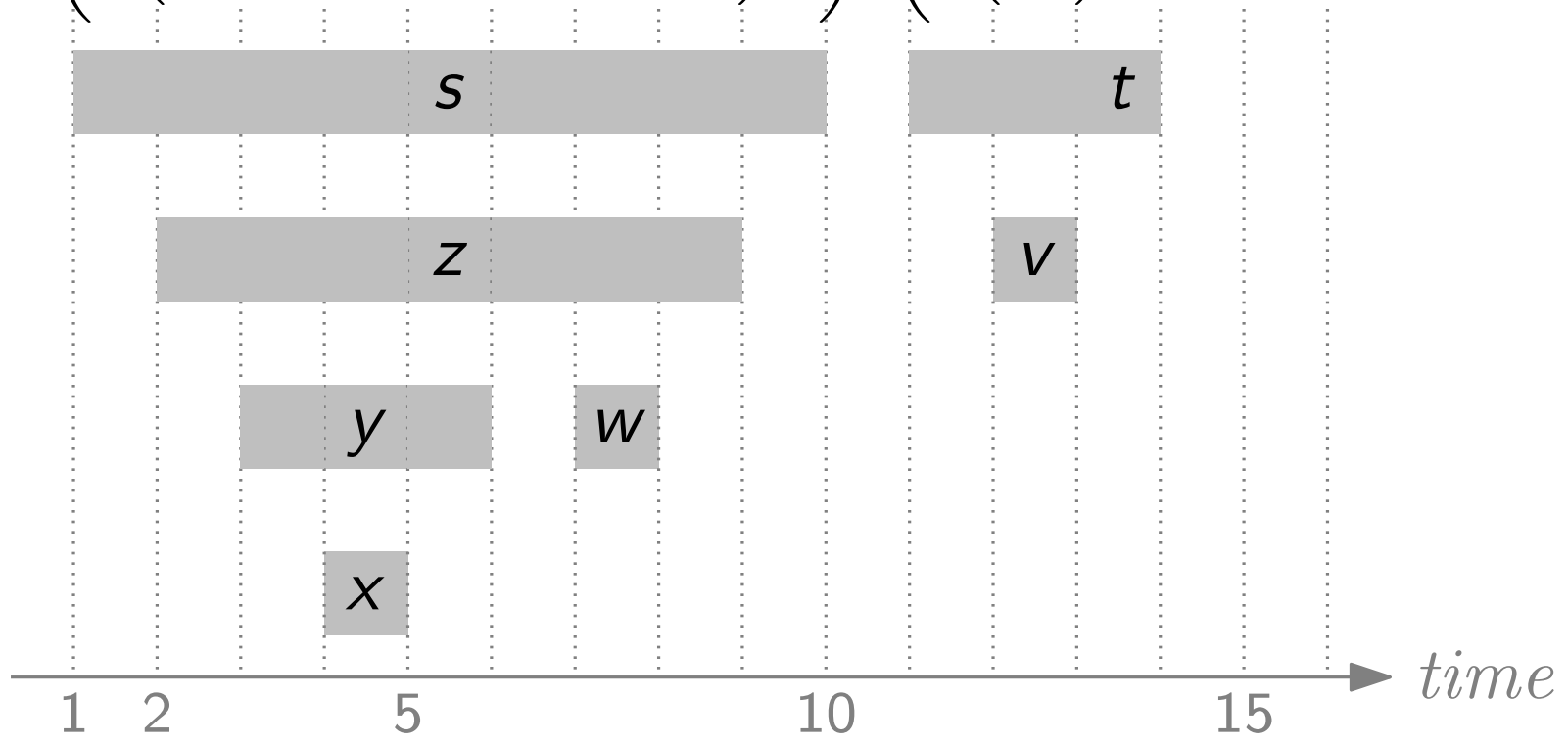
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v))$



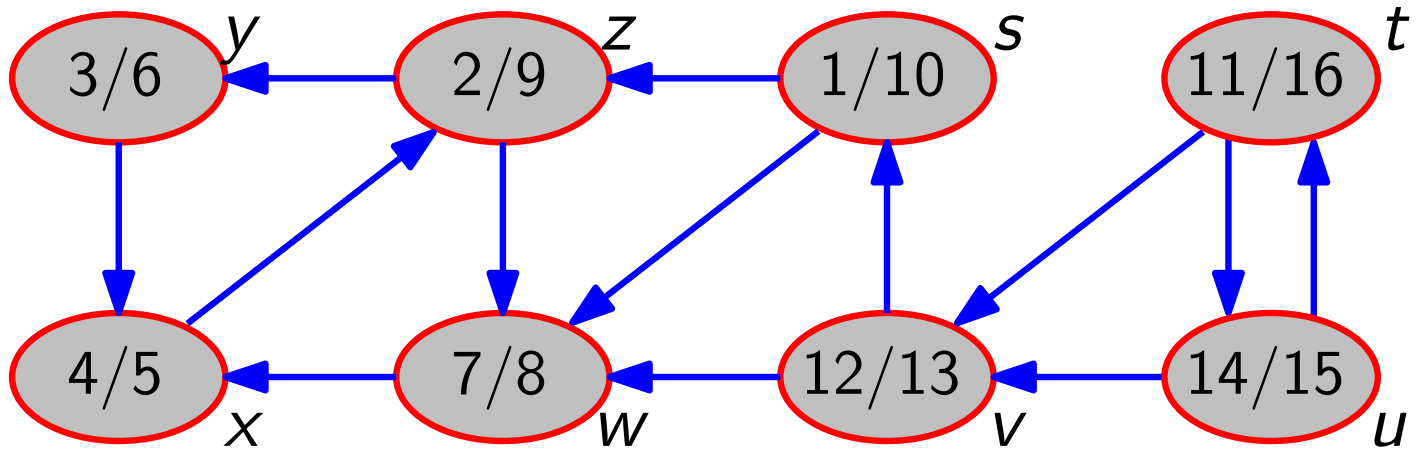
Tiefensuche – Eigenschaften



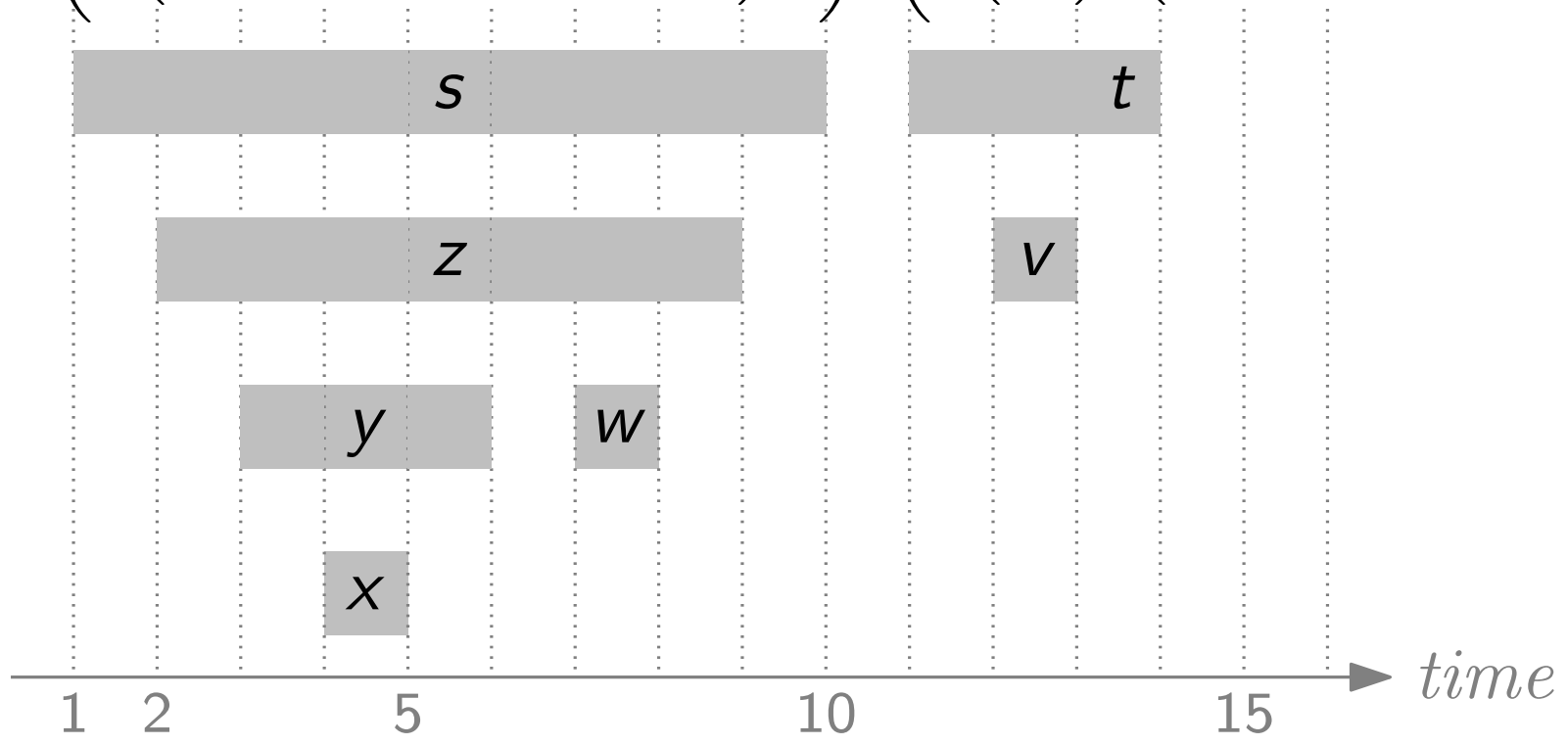
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v))$



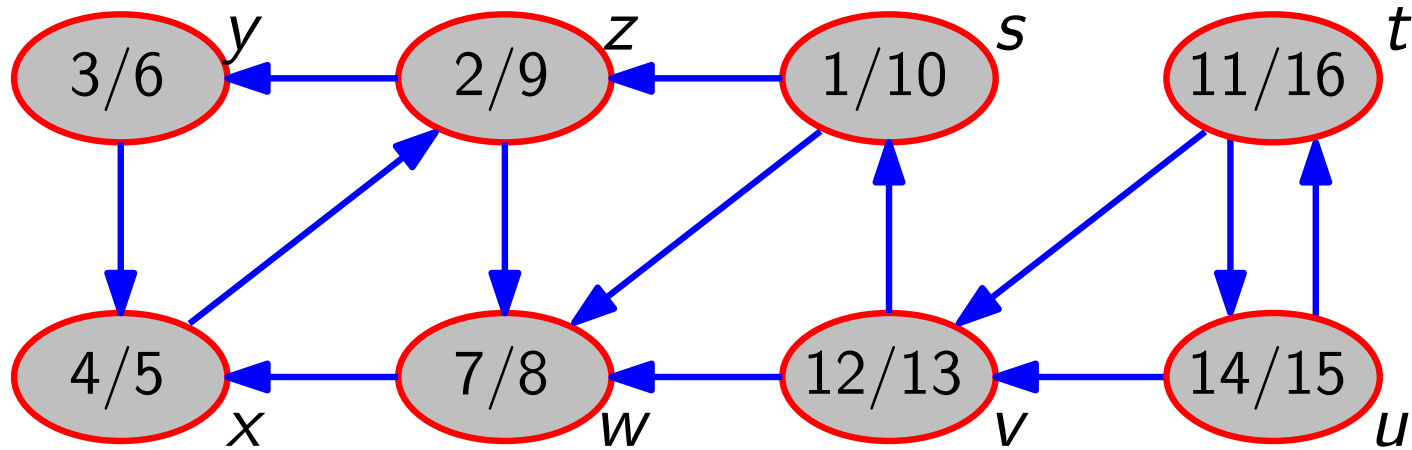
Tiefensuche – Eigenschaften



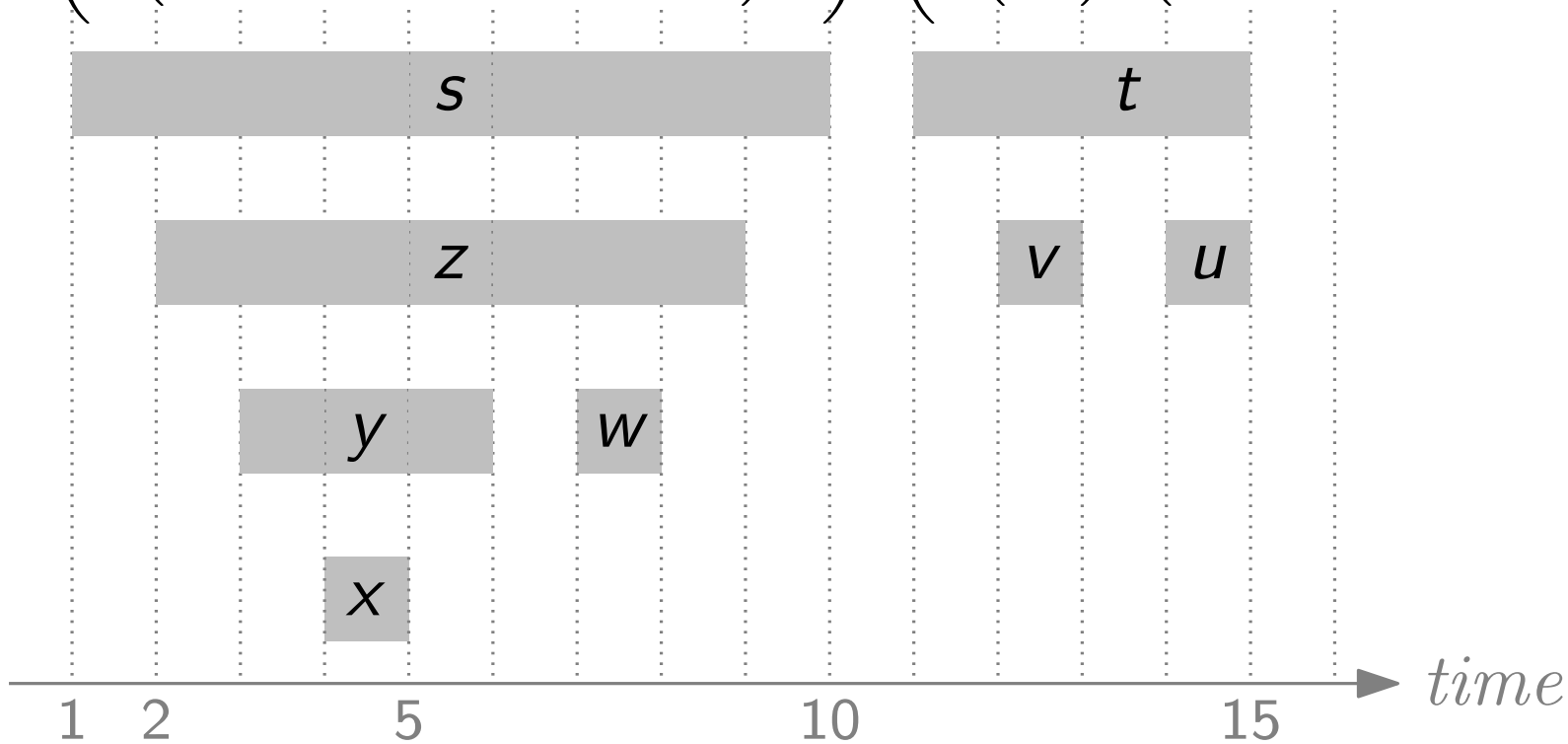
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u$



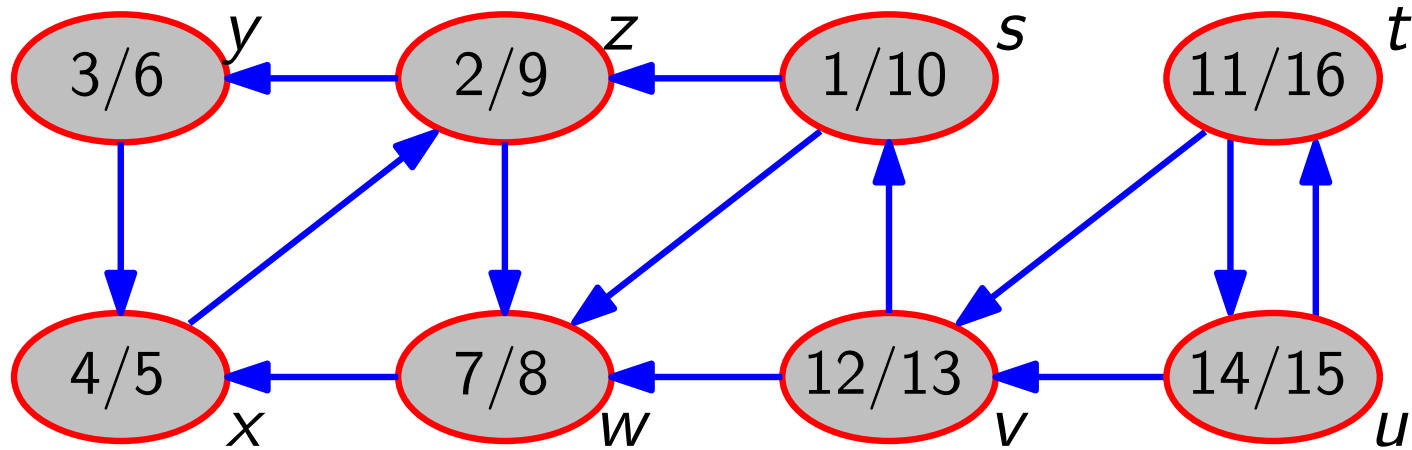
Tiefensuche – Eigenschaften



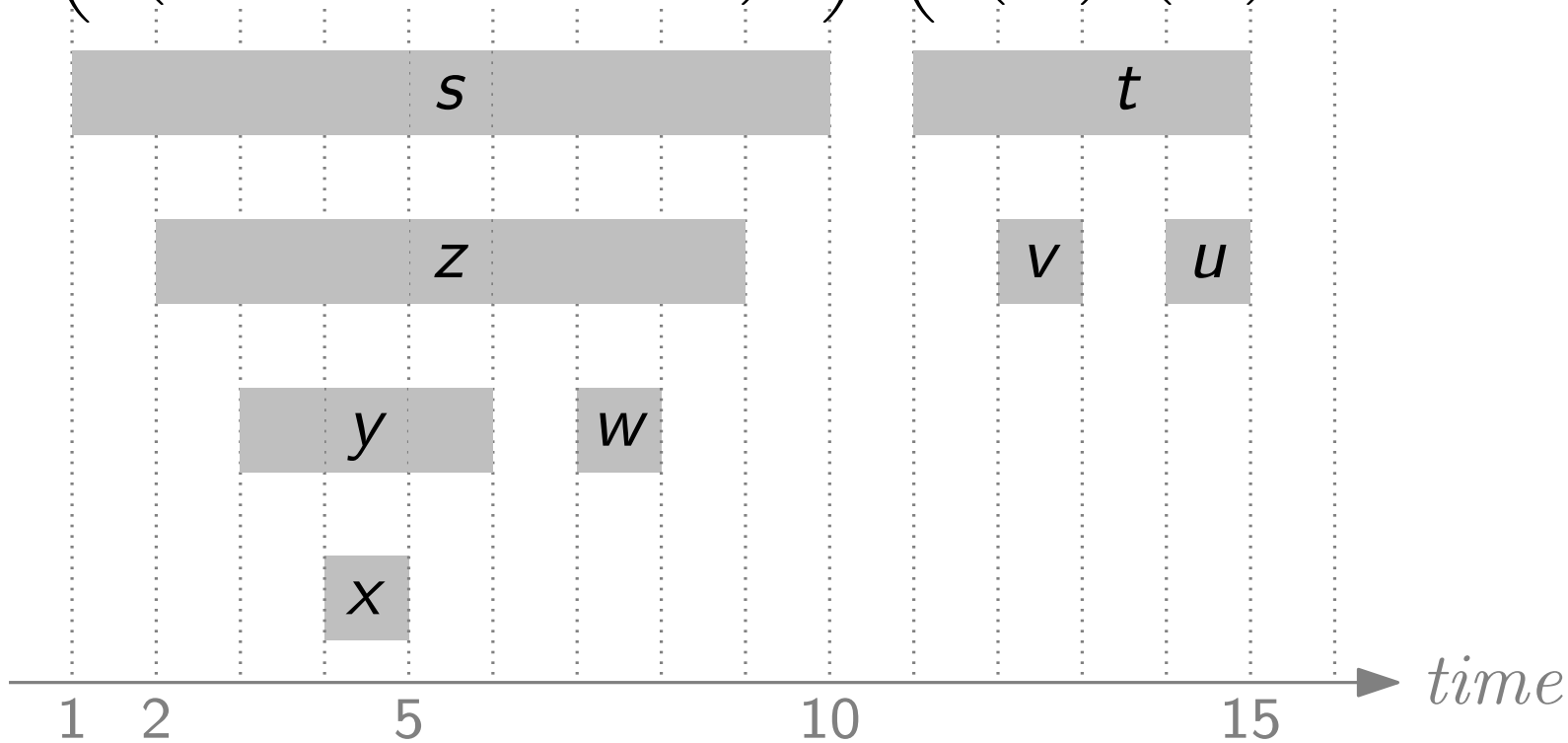
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u$



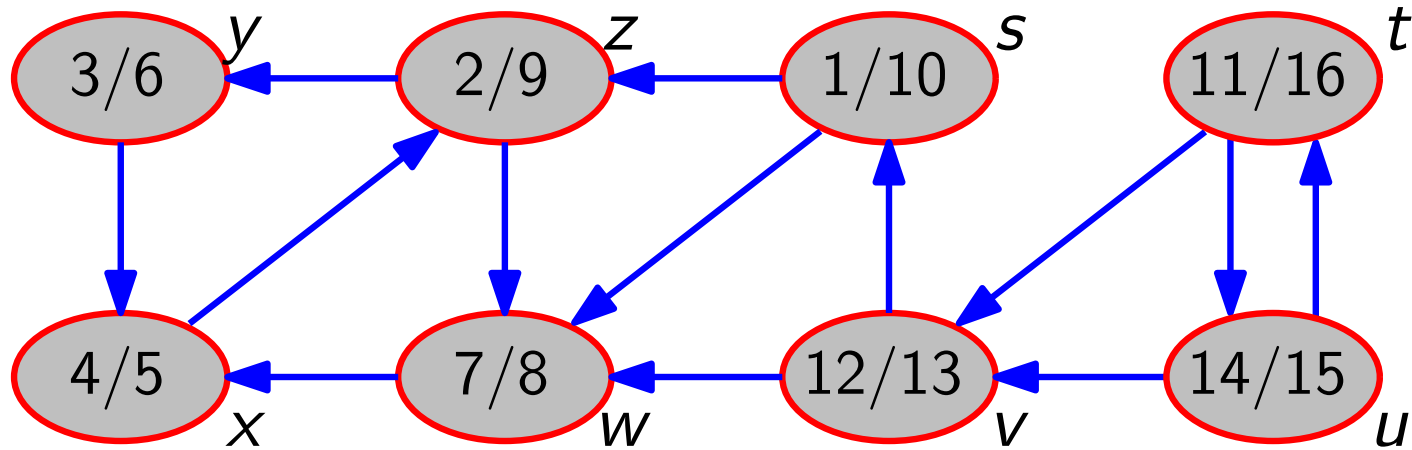
Tiefensuche – Eigenschaften



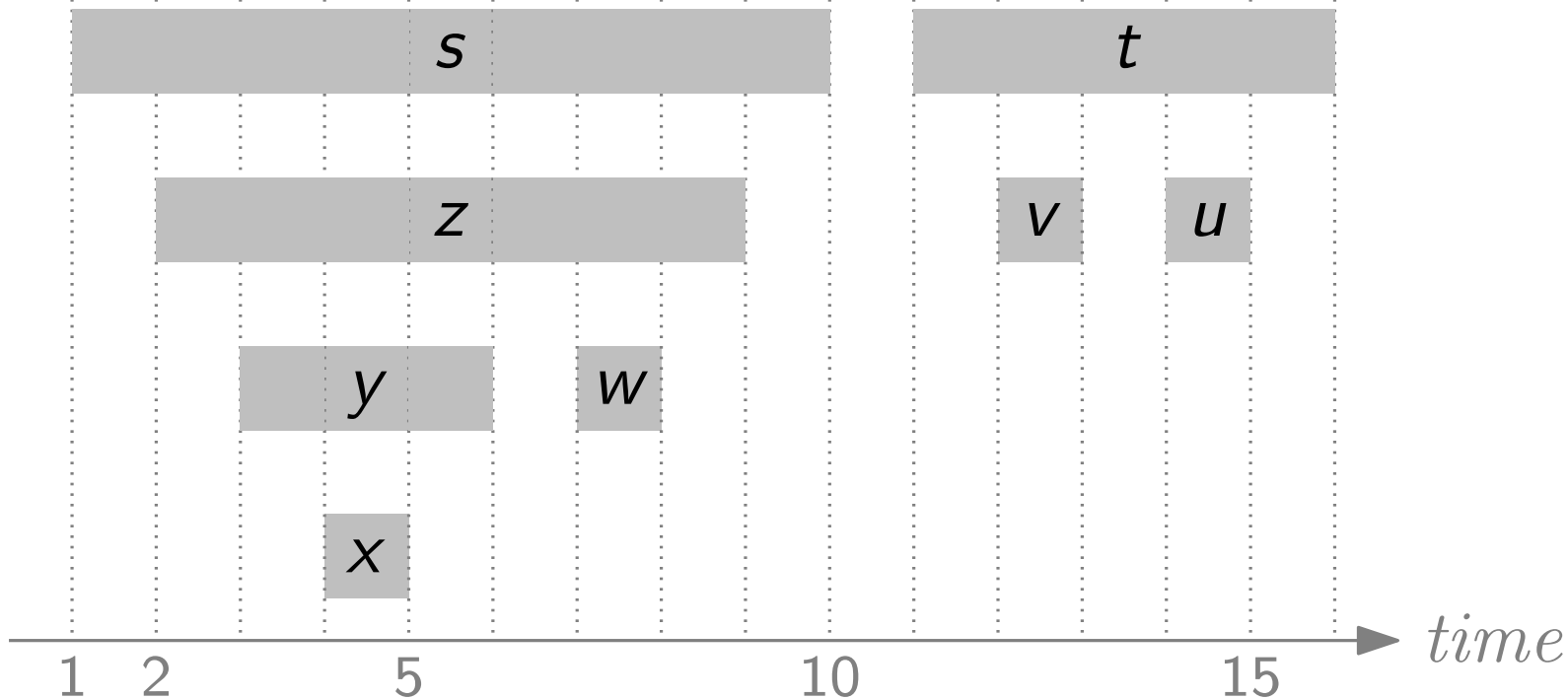
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u))$



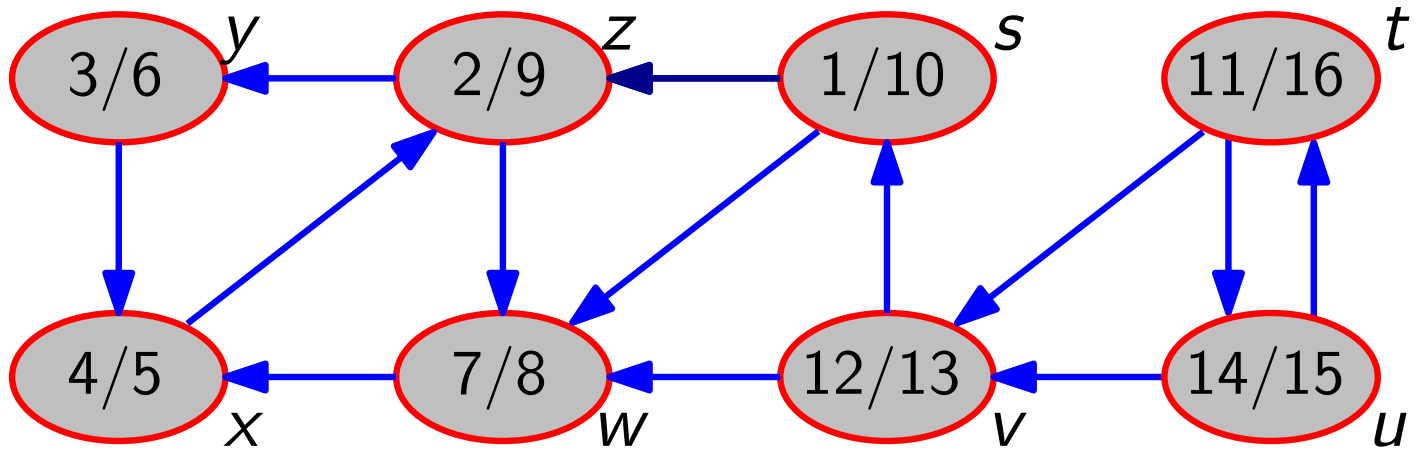
Tiefensuche – Eigenschaften



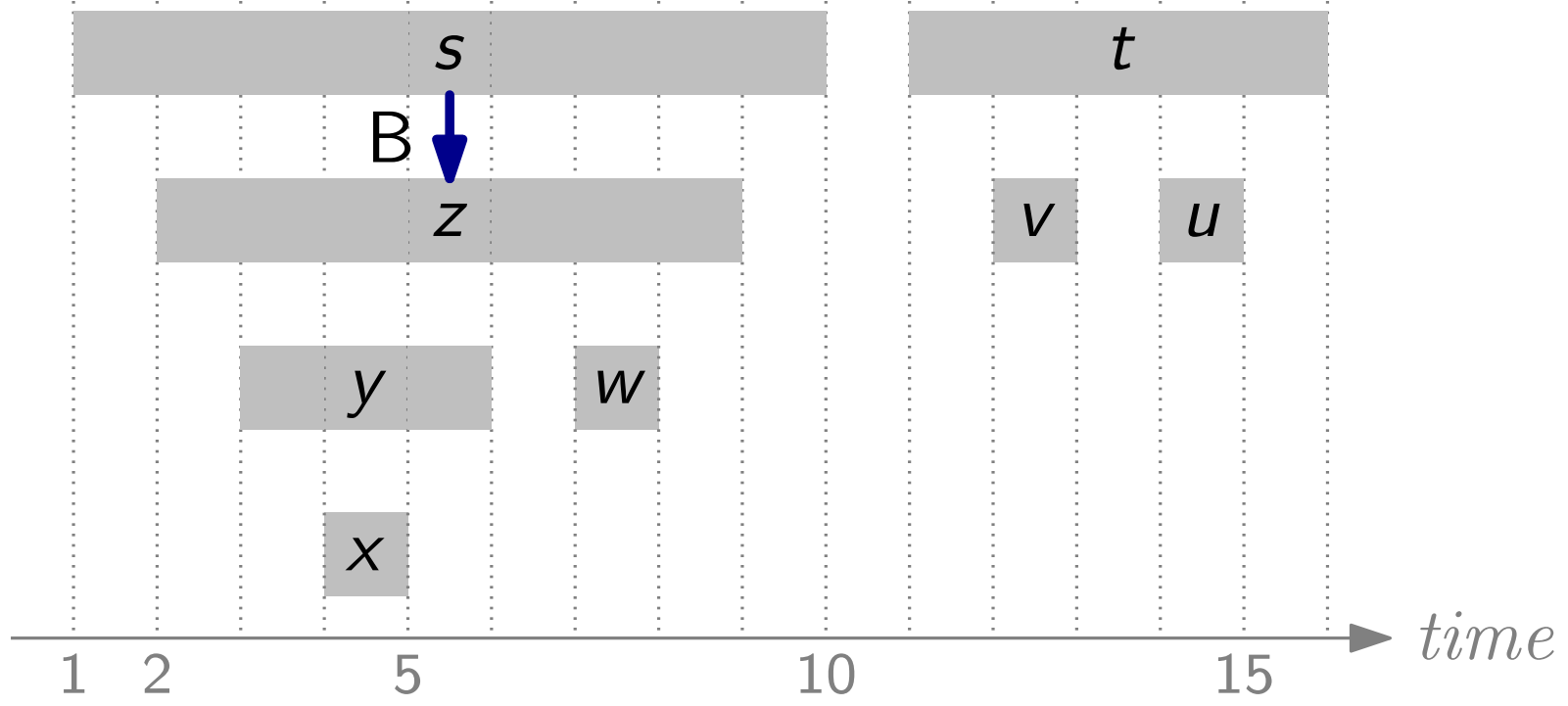
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



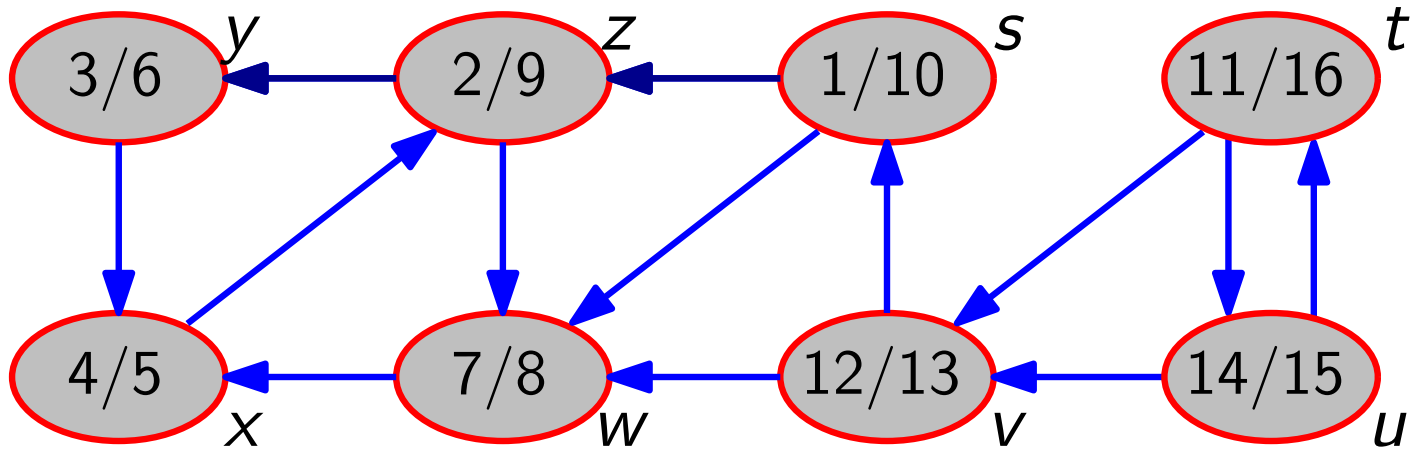
Tiefensuche – Eigenschaften



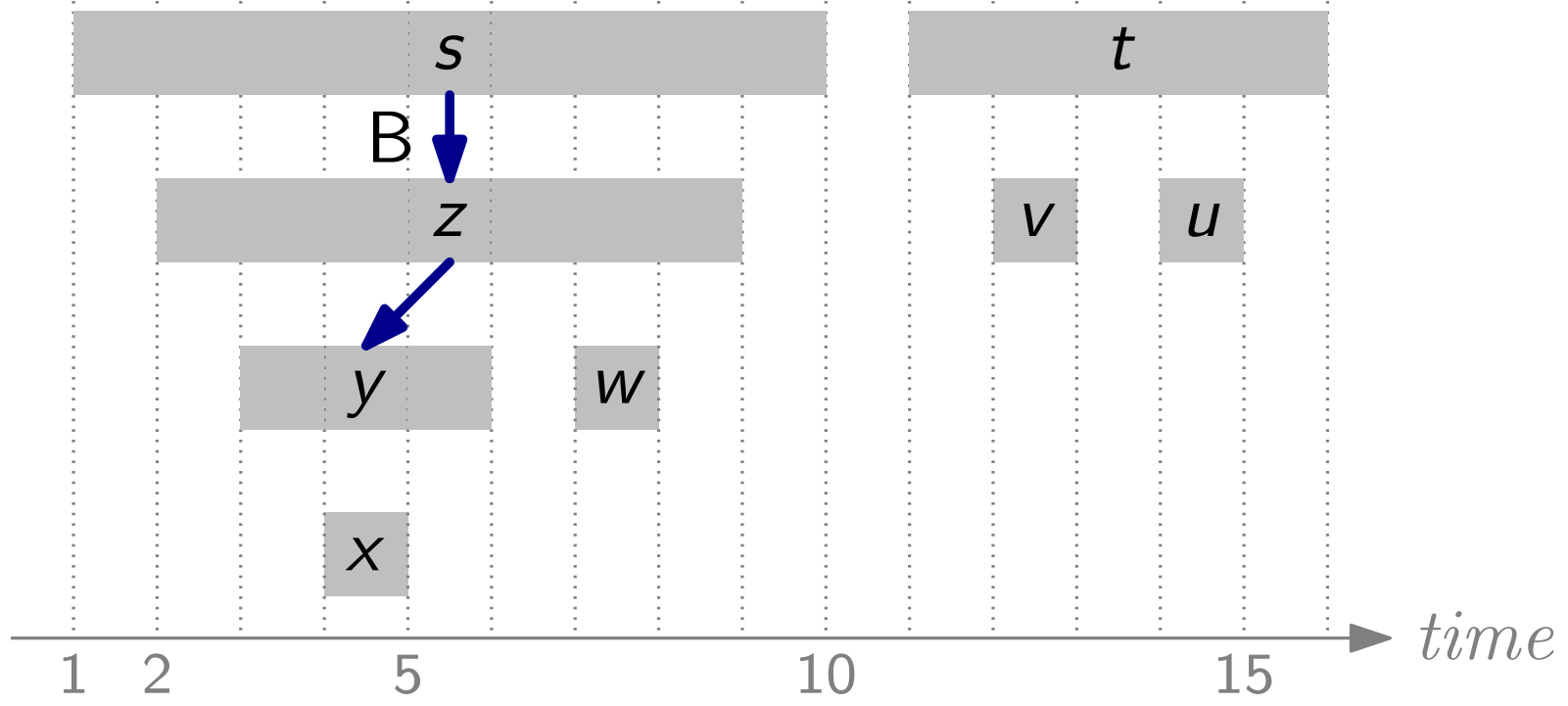
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



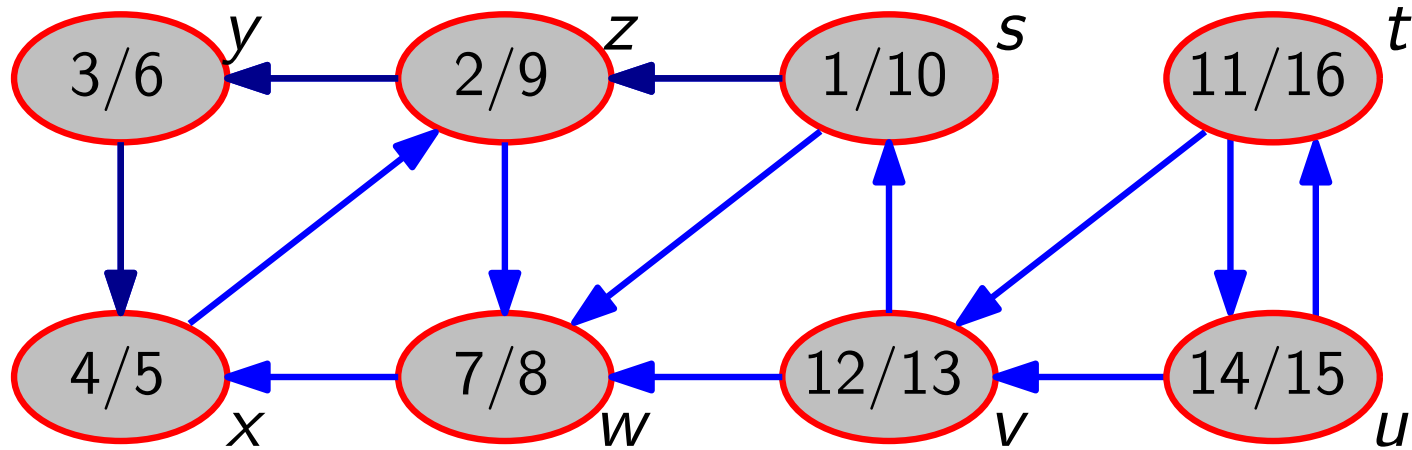
Tiefensuche – Eigenschaften



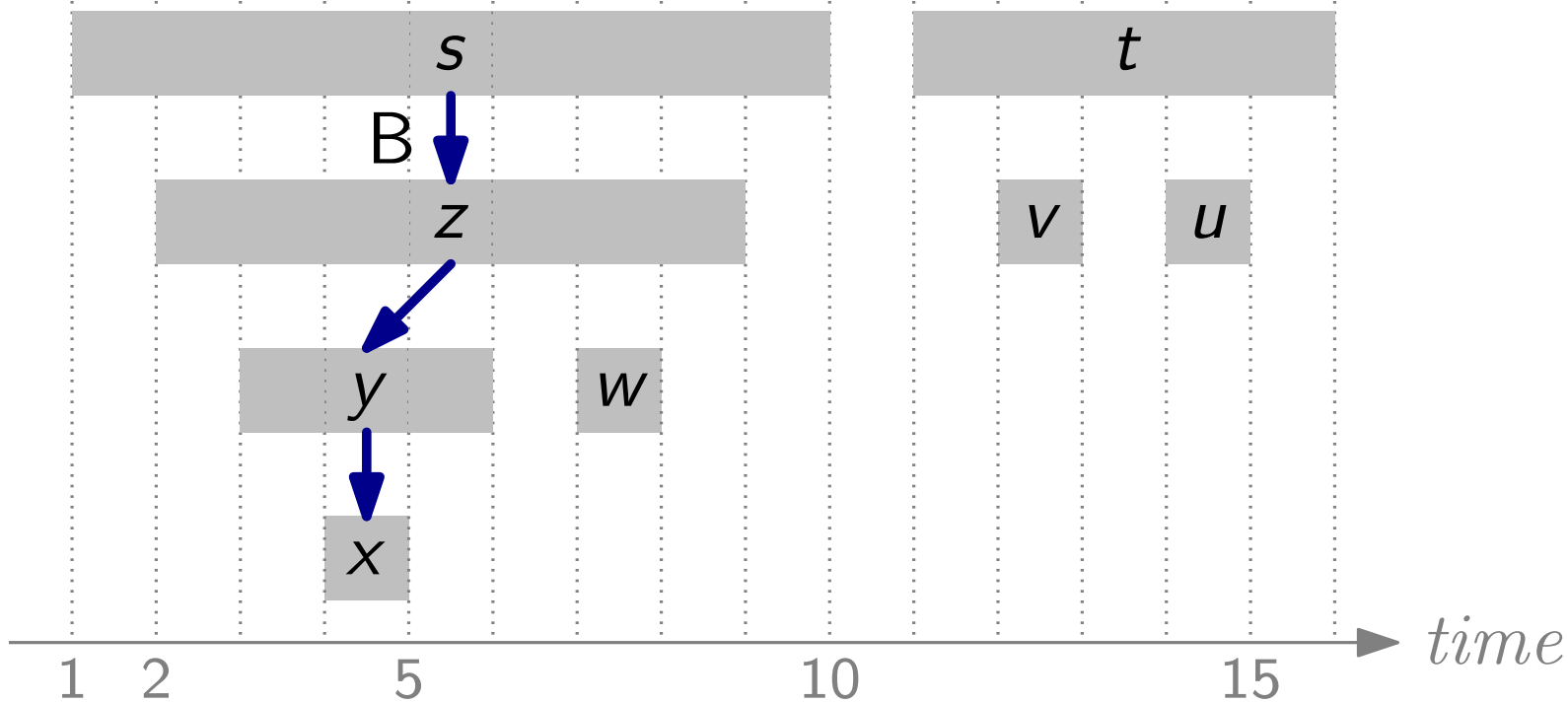
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



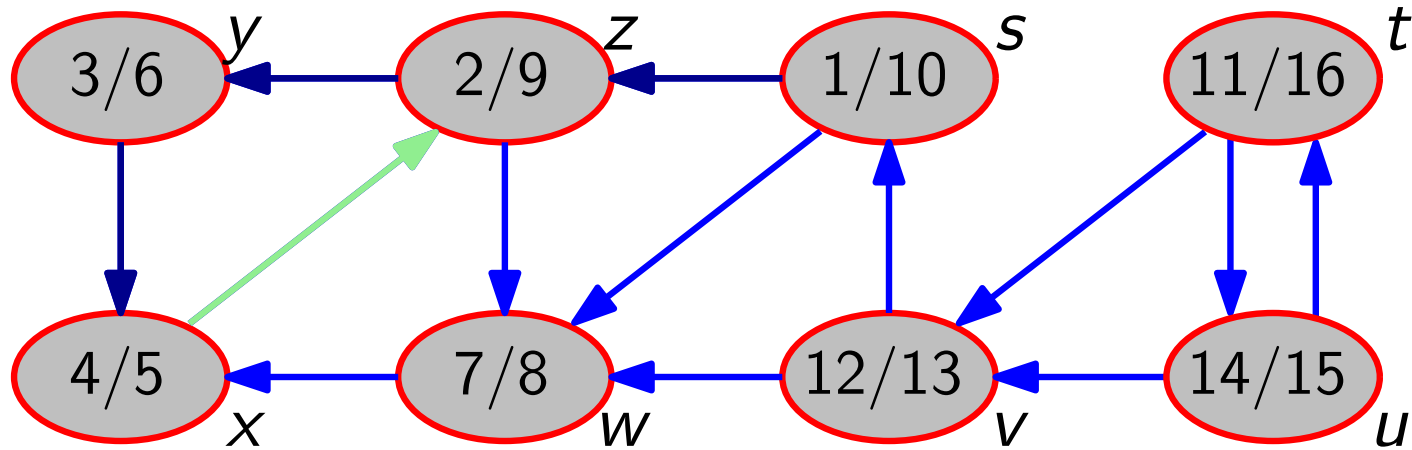
Tiefensuche – Eigenschaften



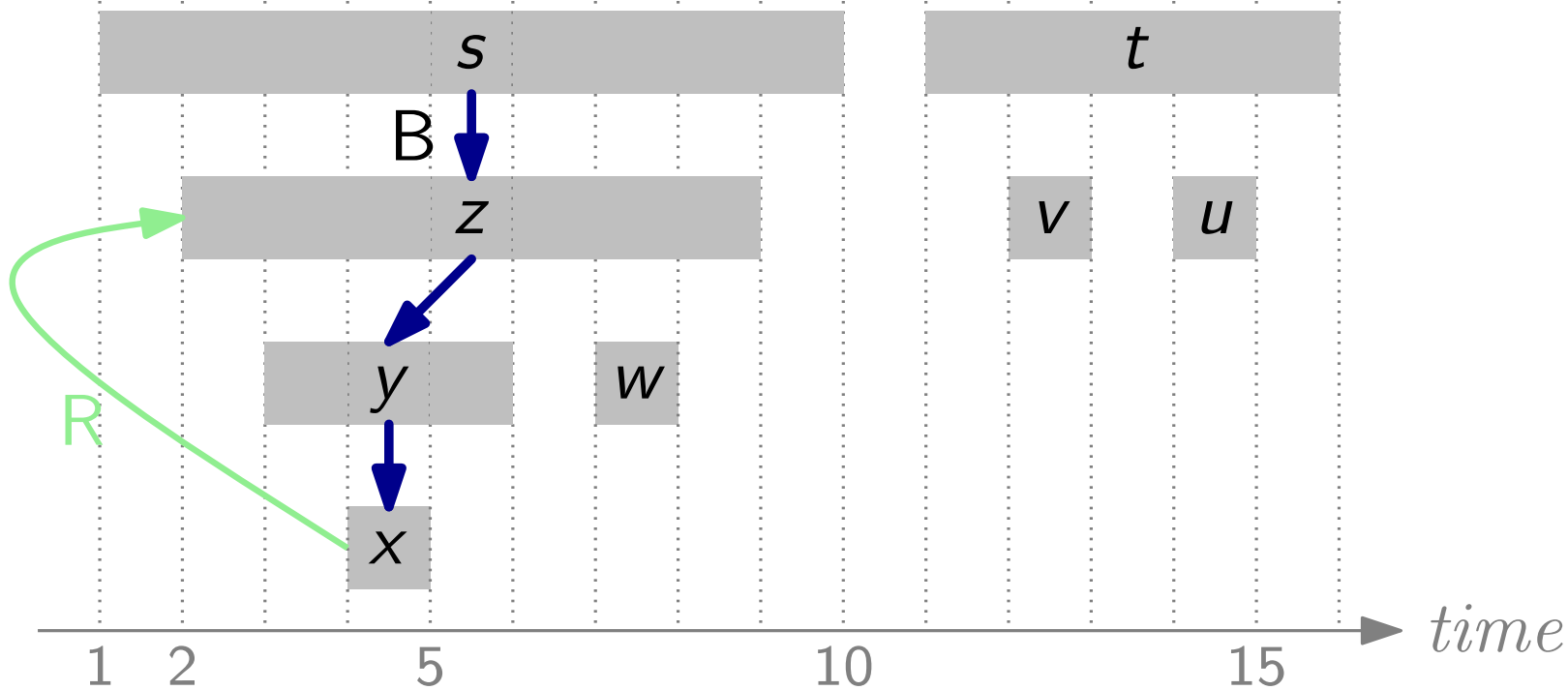
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



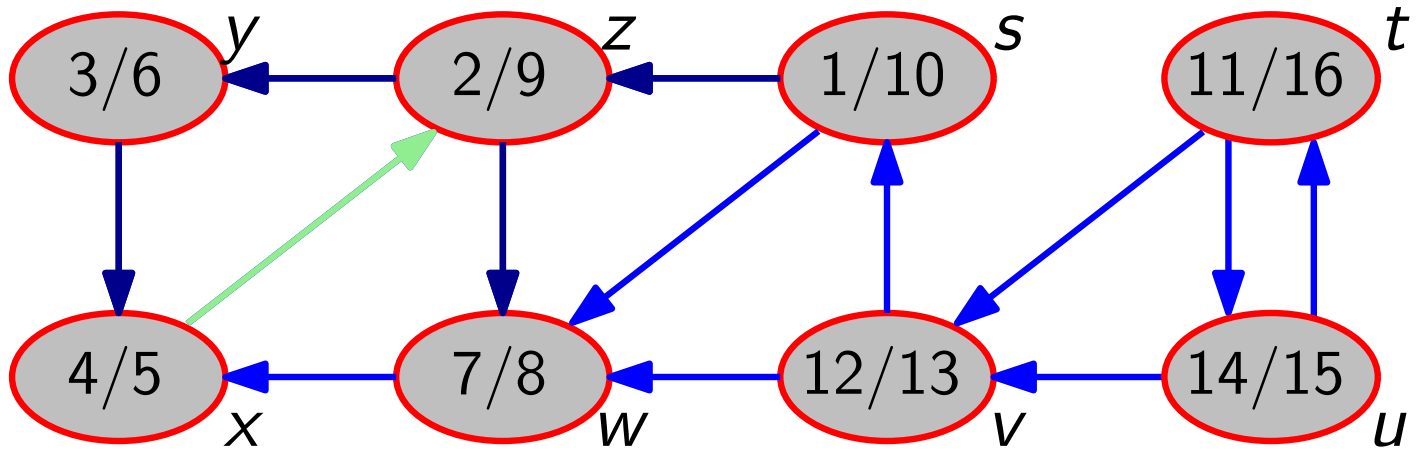
Tiefensuche – Eigenschaften



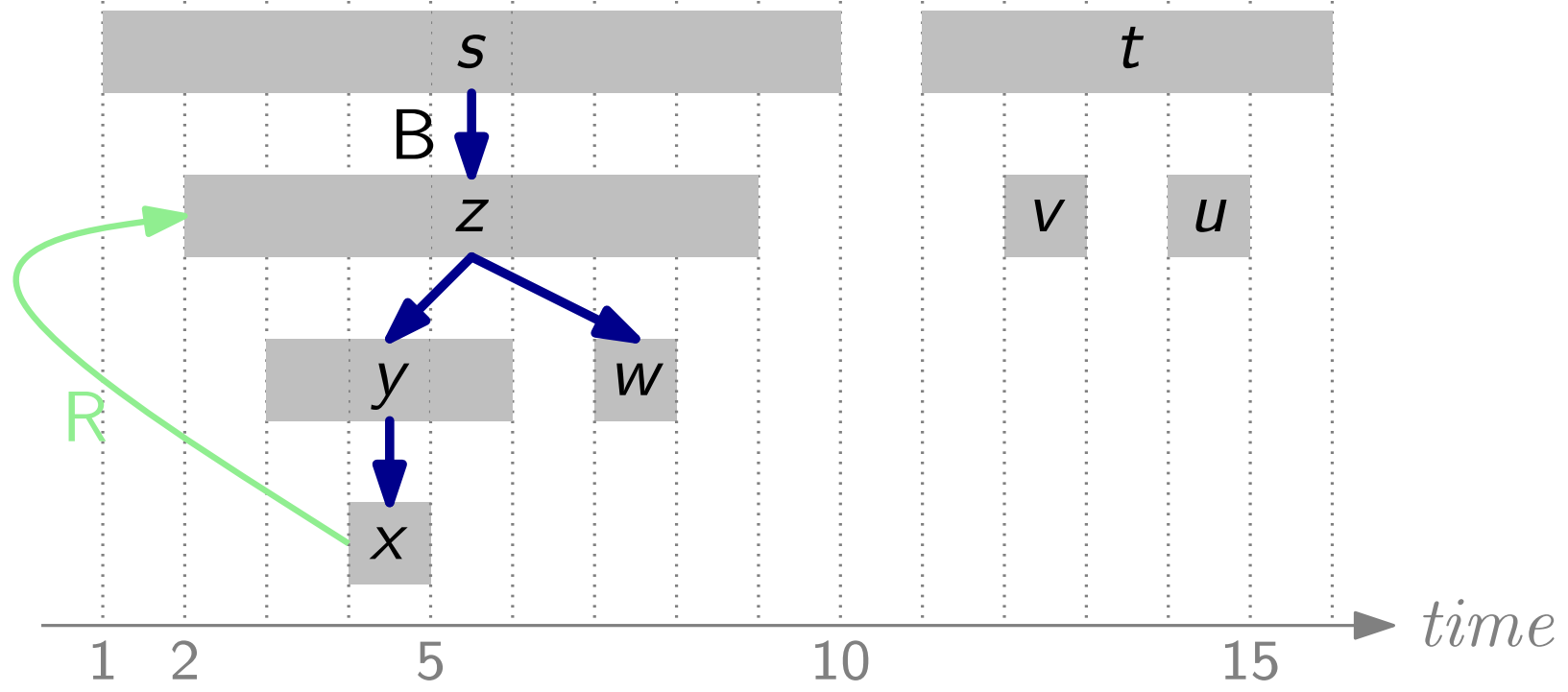
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



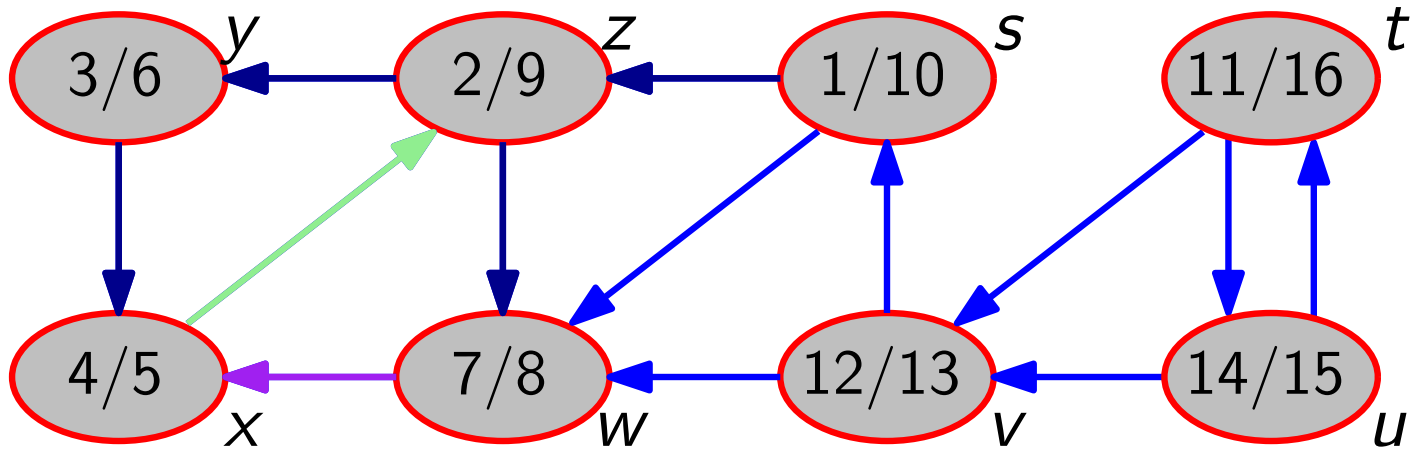
Tiefensuche – Eigenschaften



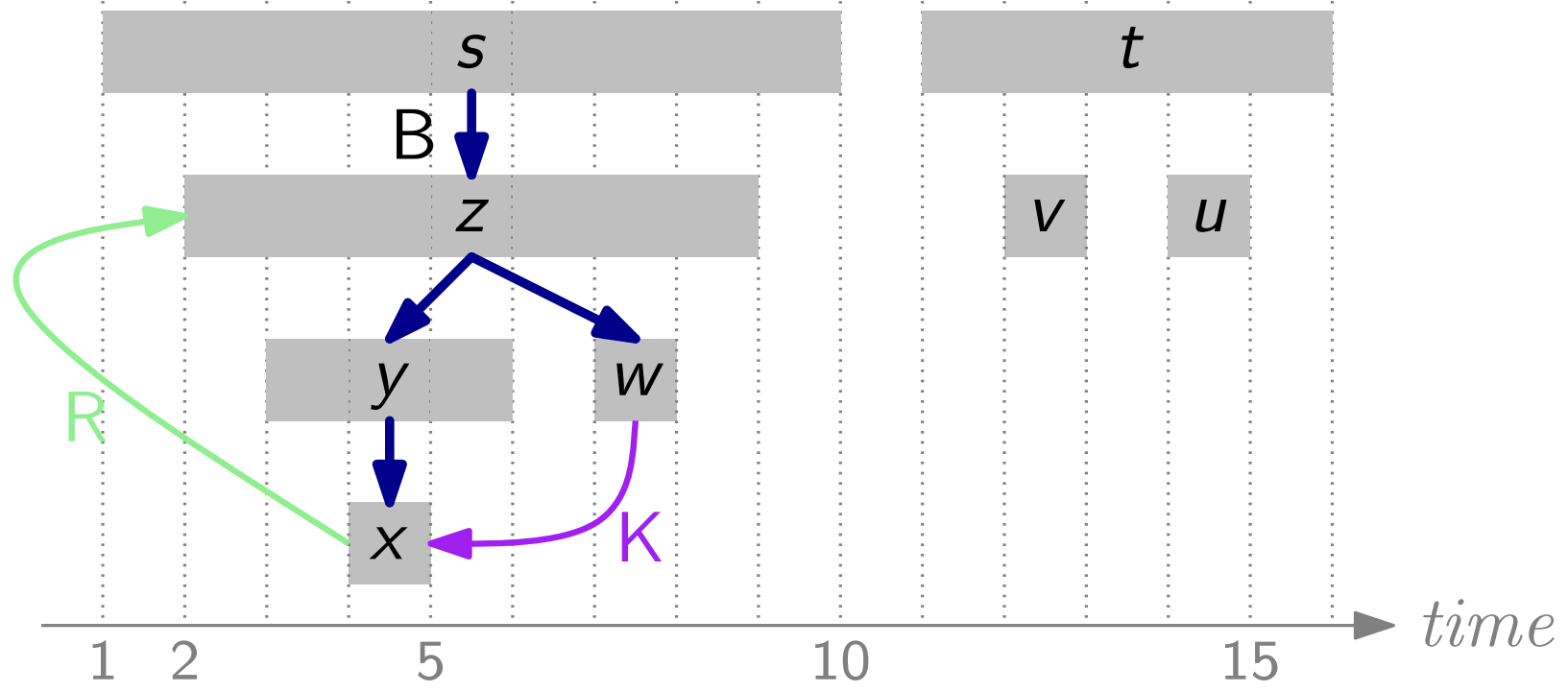
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



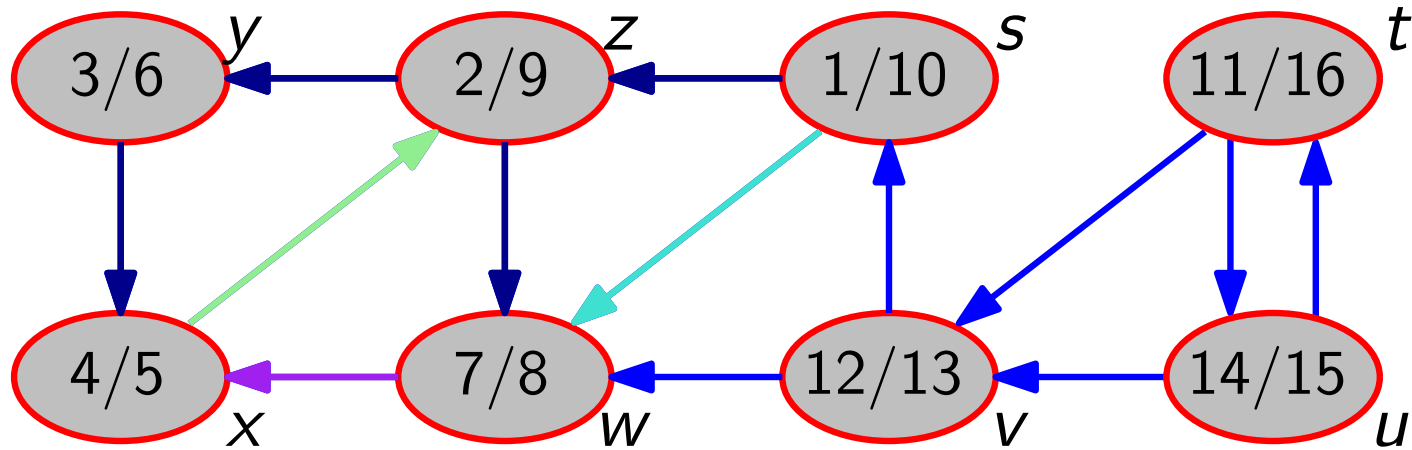
Tiefensuche – Eigenschaften



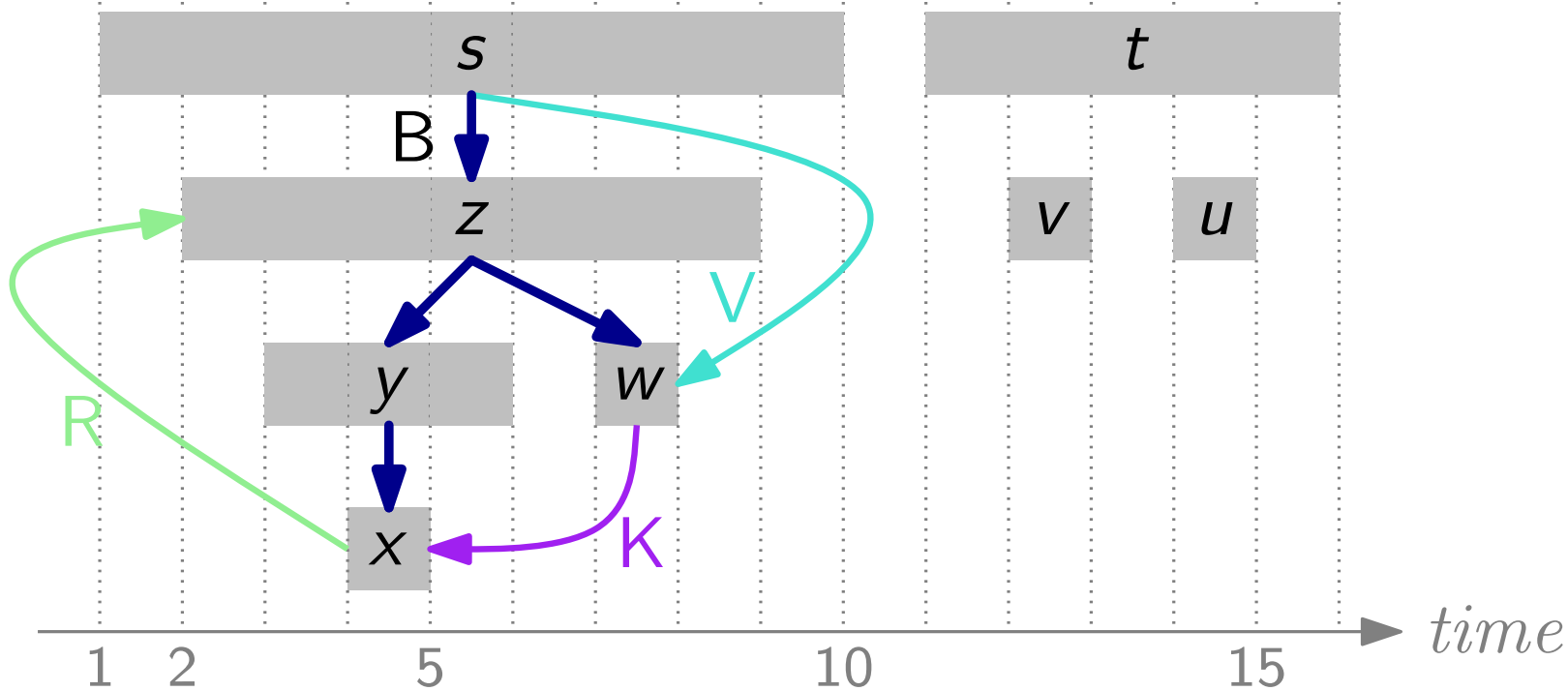
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



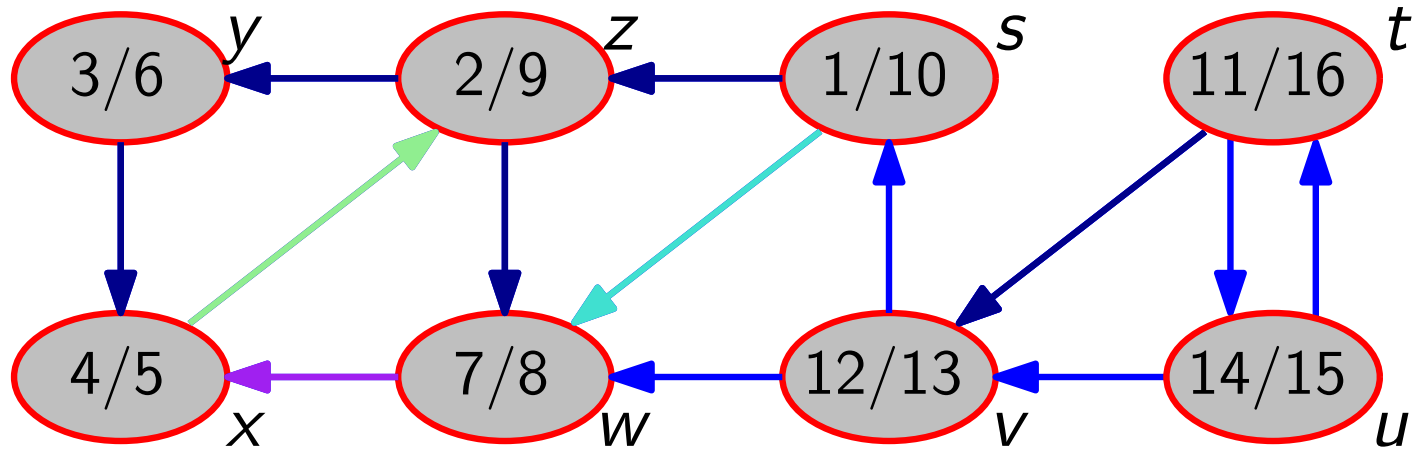
Tiefensuche – Eigenschaften



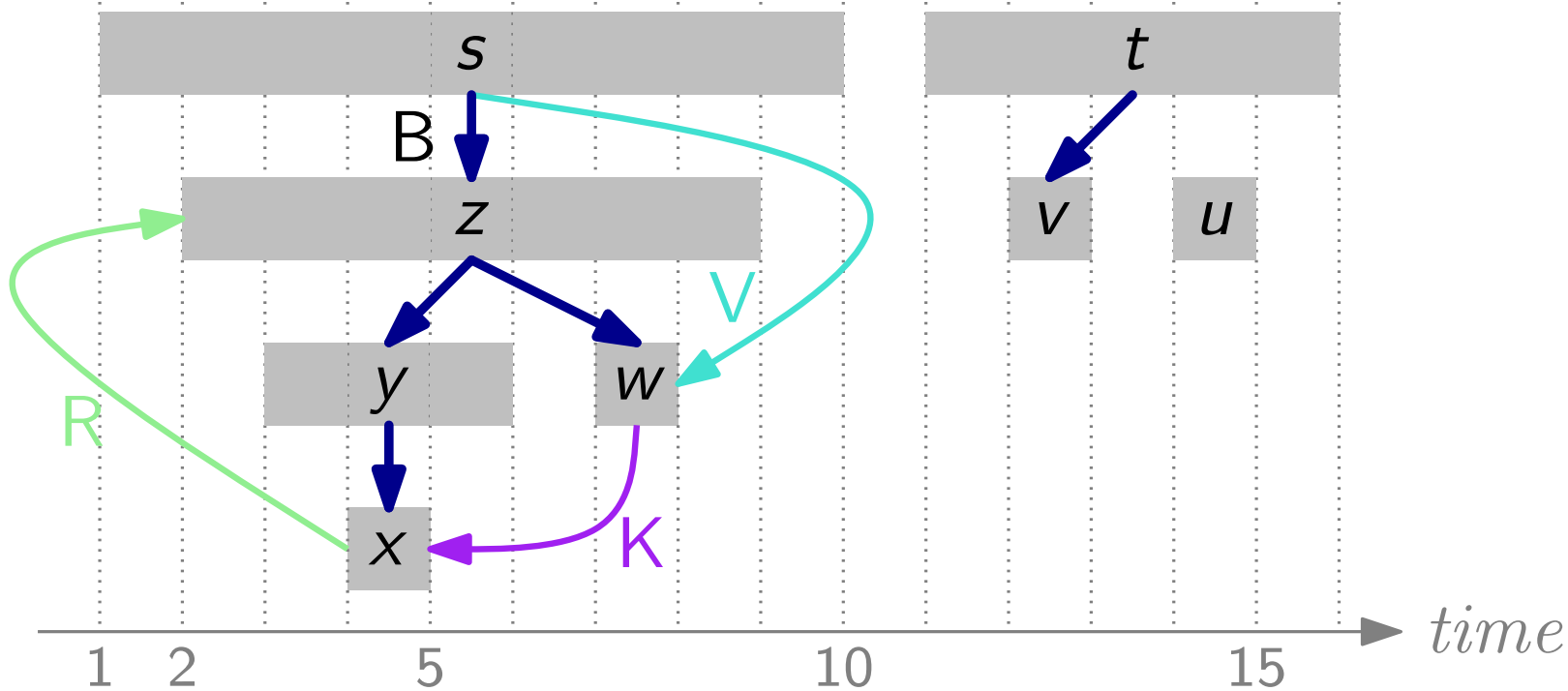
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) \quad (t (v v) (u u) t)$



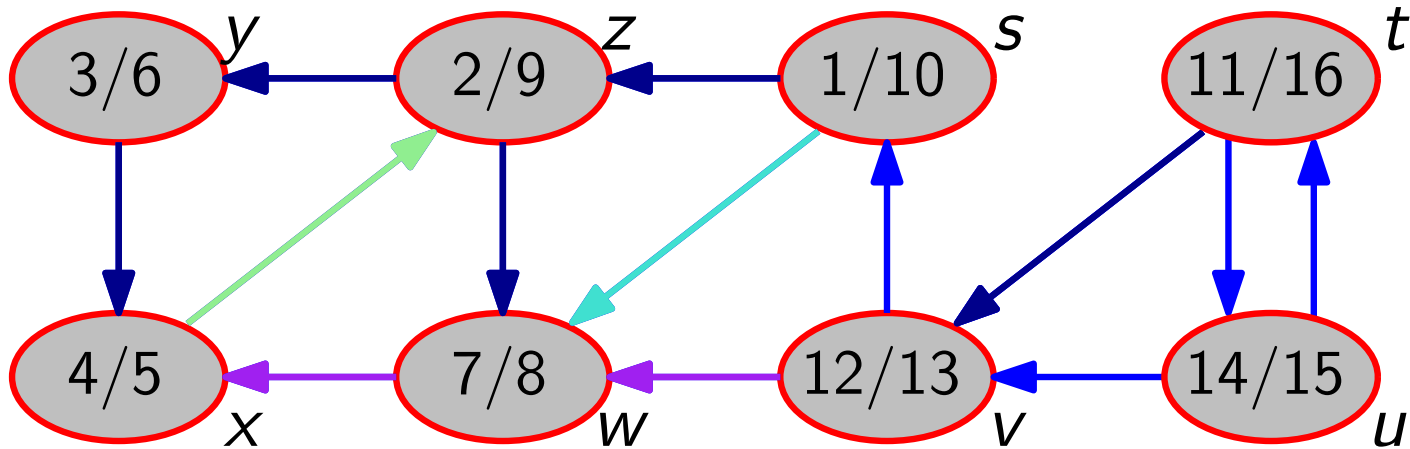
Tiefensuche – Eigenschaften



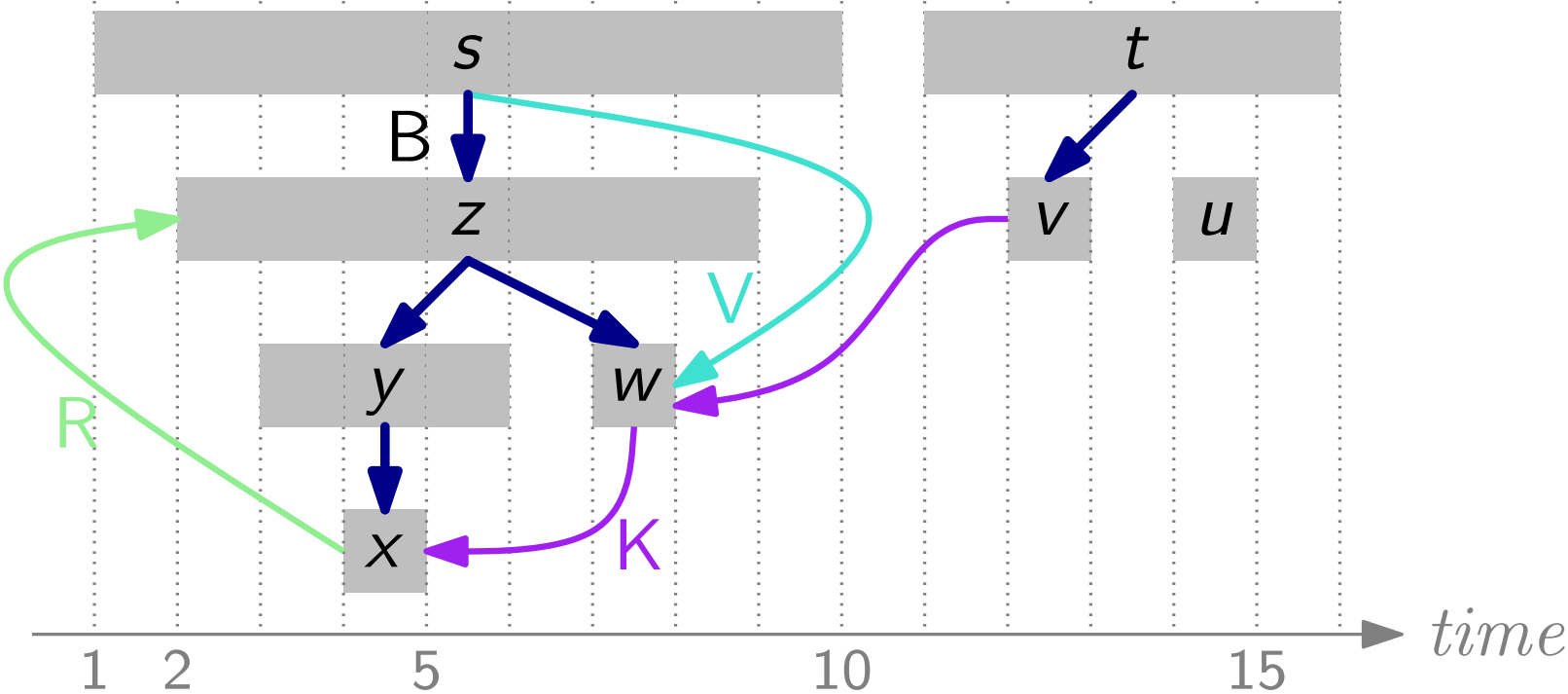
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) \quad (t (v v) (u u) t)$



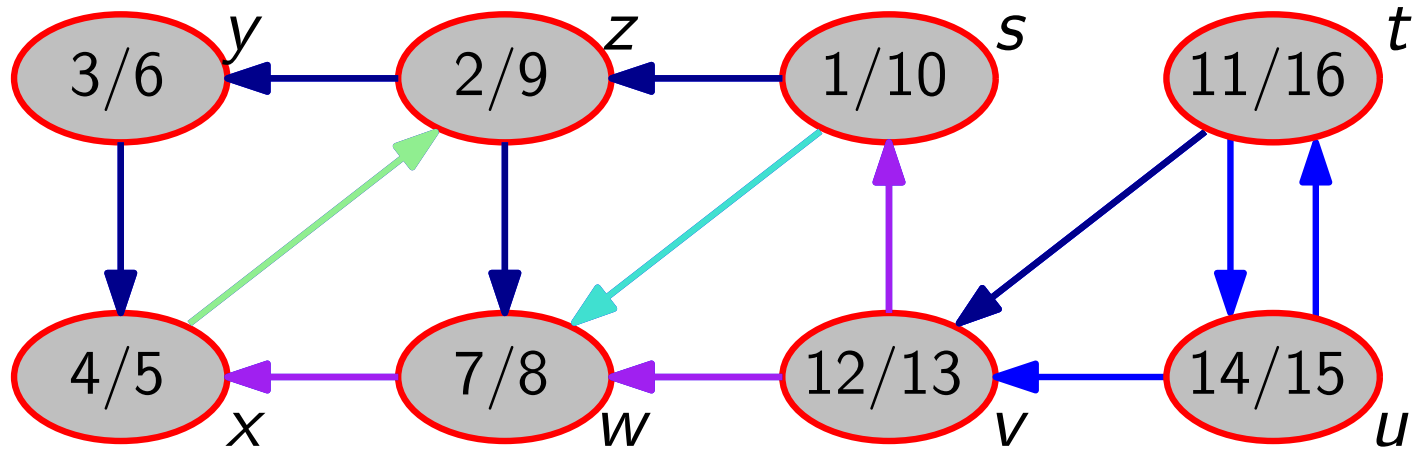
Tiefensuche – Eigenschaften



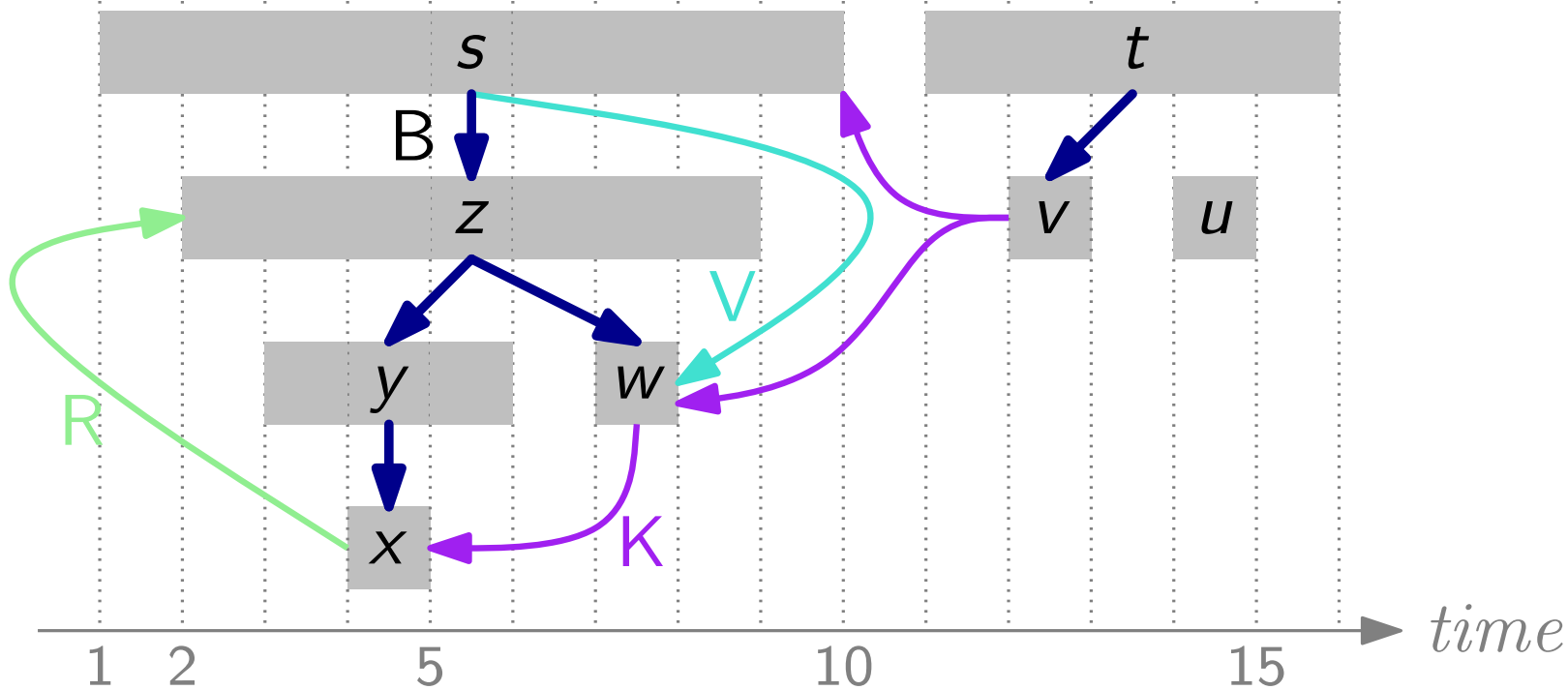
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



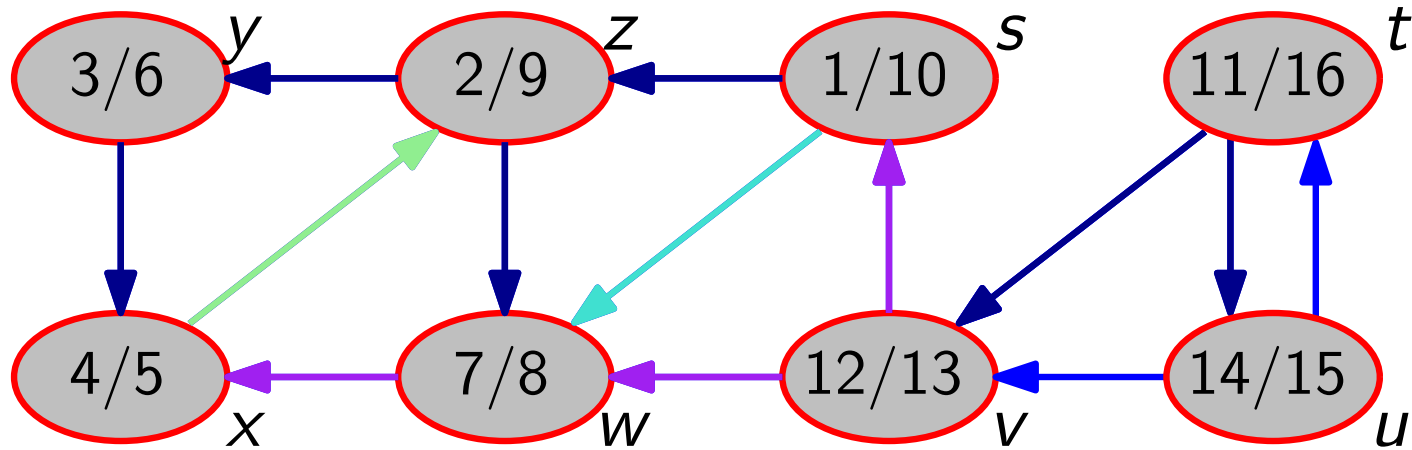
Tiefensuche – Eigenschaften



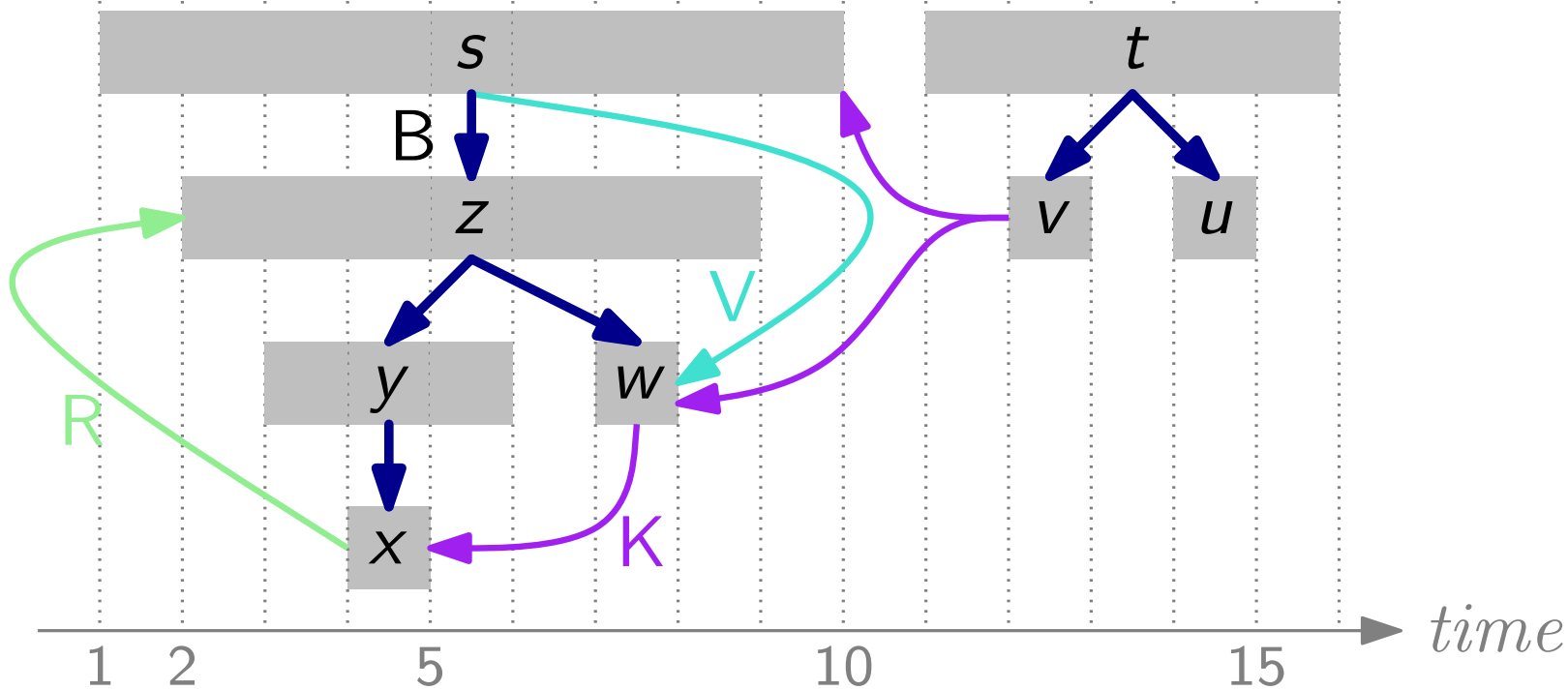
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



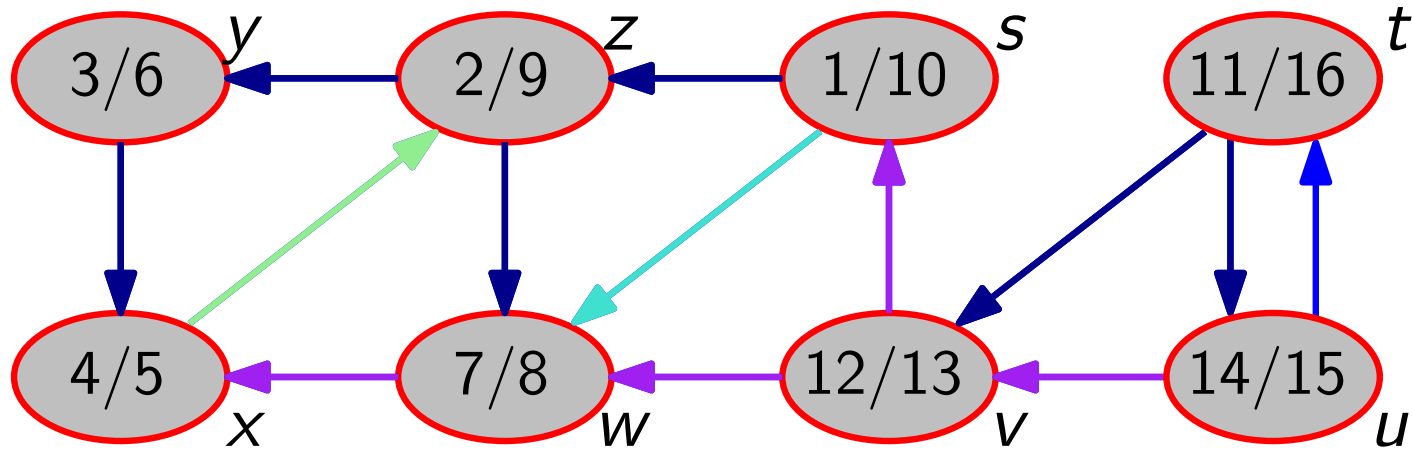
Tiefensuche – Eigenschaften



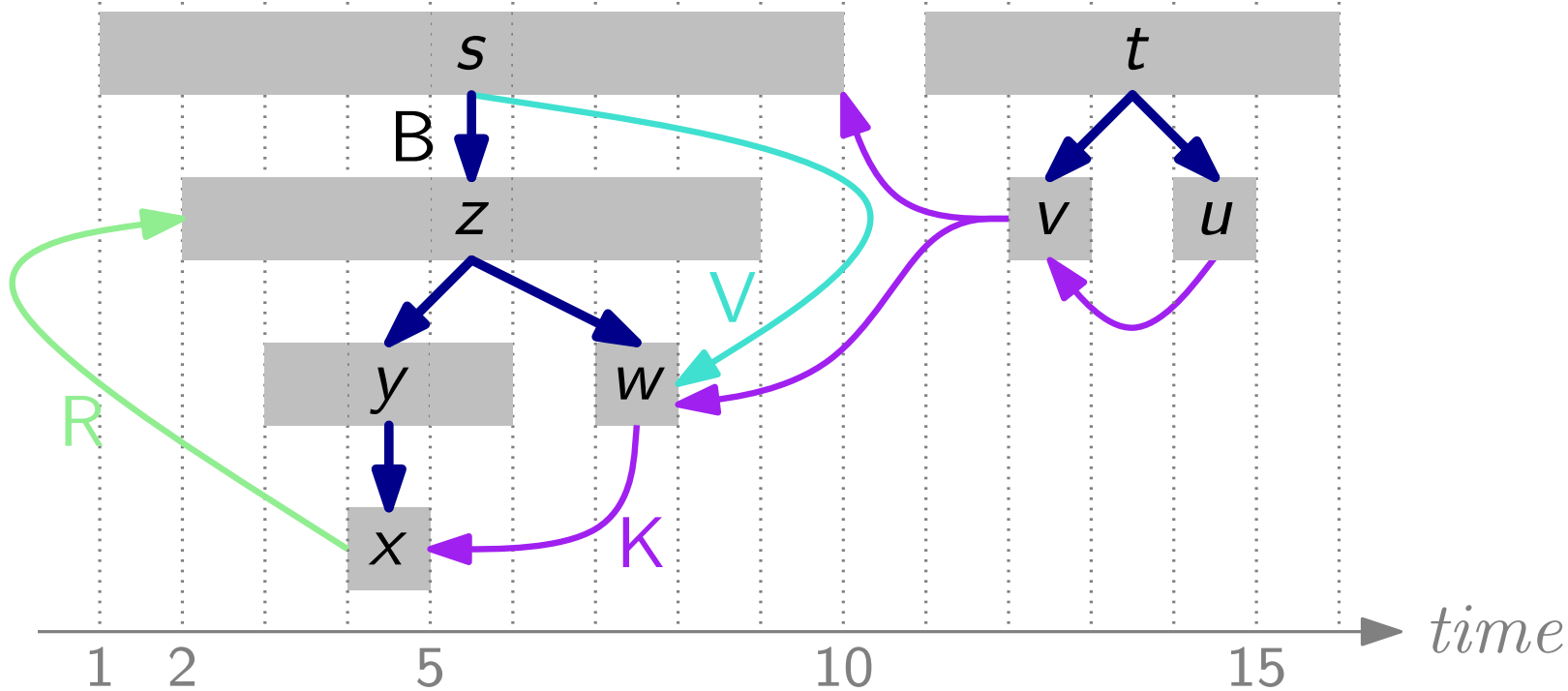
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



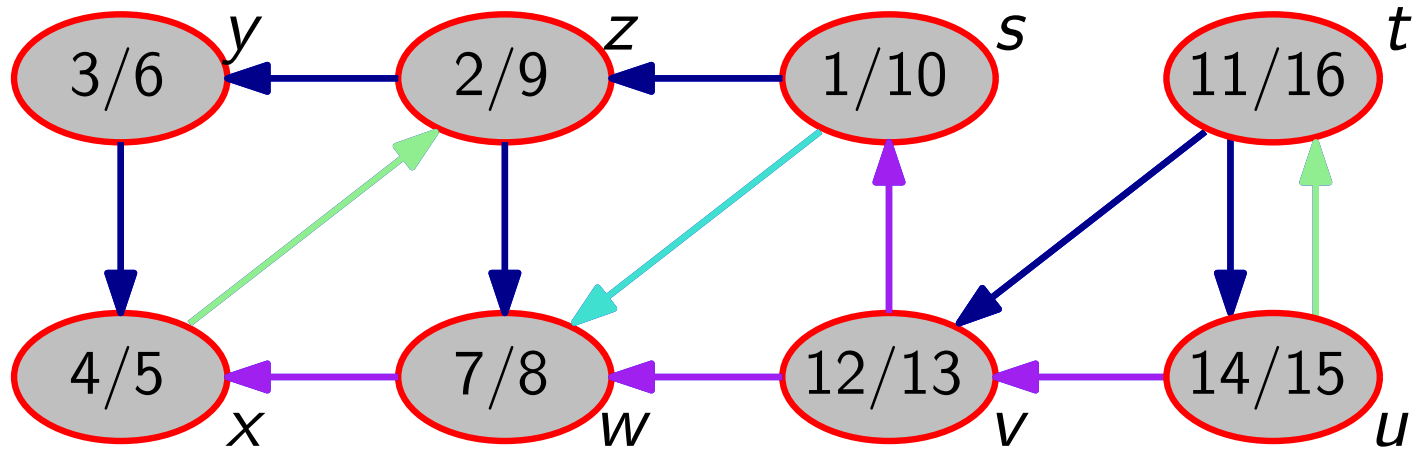
Tiefensuche – Eigenschaften



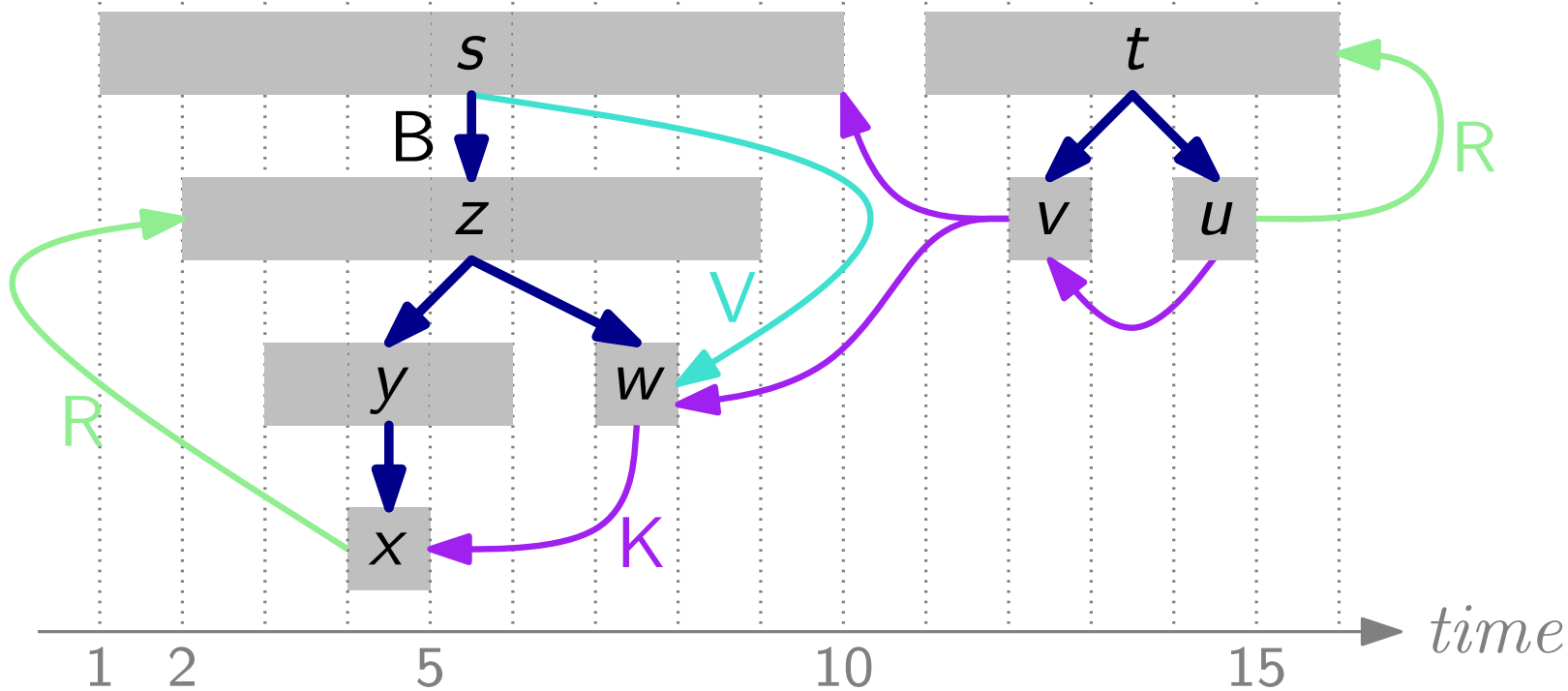
$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



Tiefensuche – Eigenschaften



$(s (z (y (x x) y) (w w) z) s) (t (v v) (u u) t)$



Tiefensuche – Analyse

Satz.

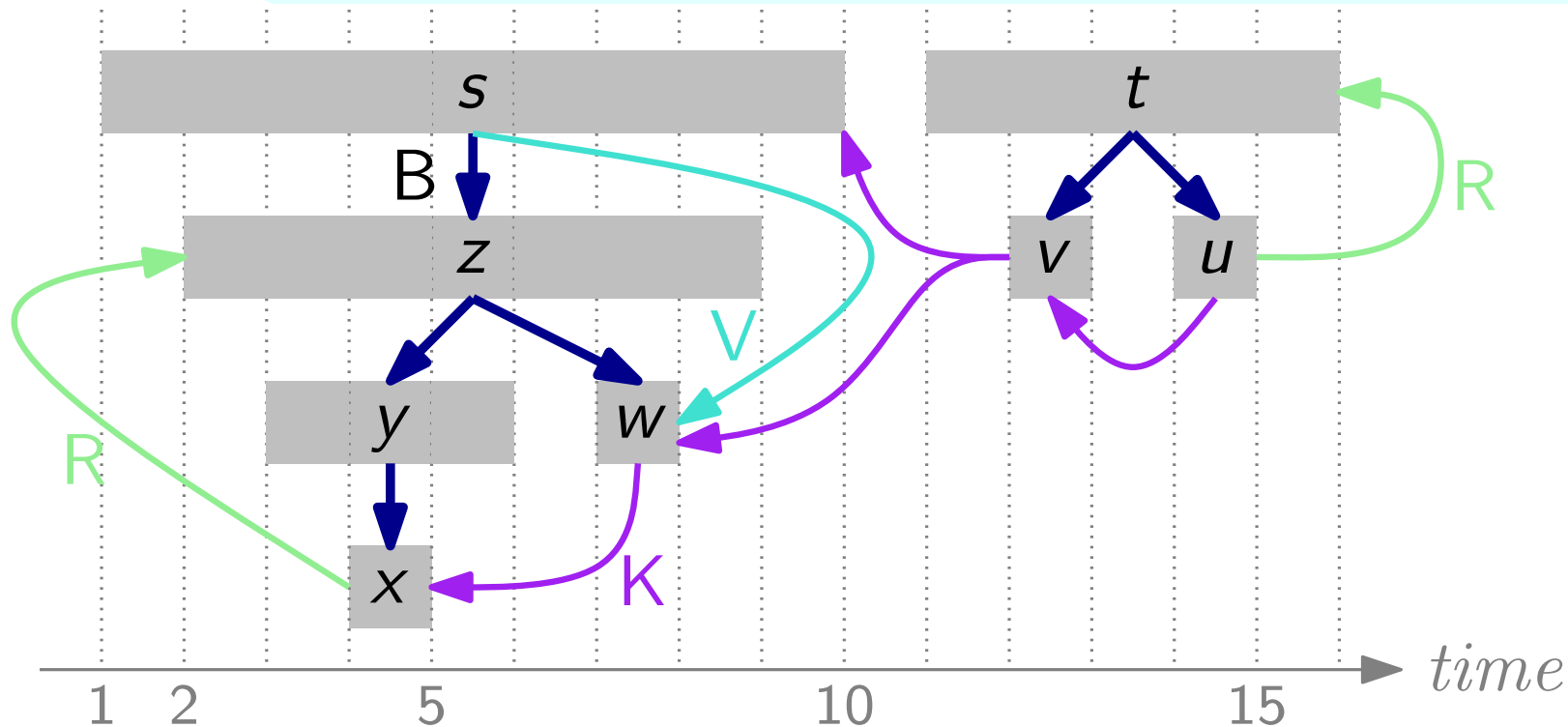
(Klammerentheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

(i)

(ii)

(iii)



Tiefensuche – Analyse

Satz.

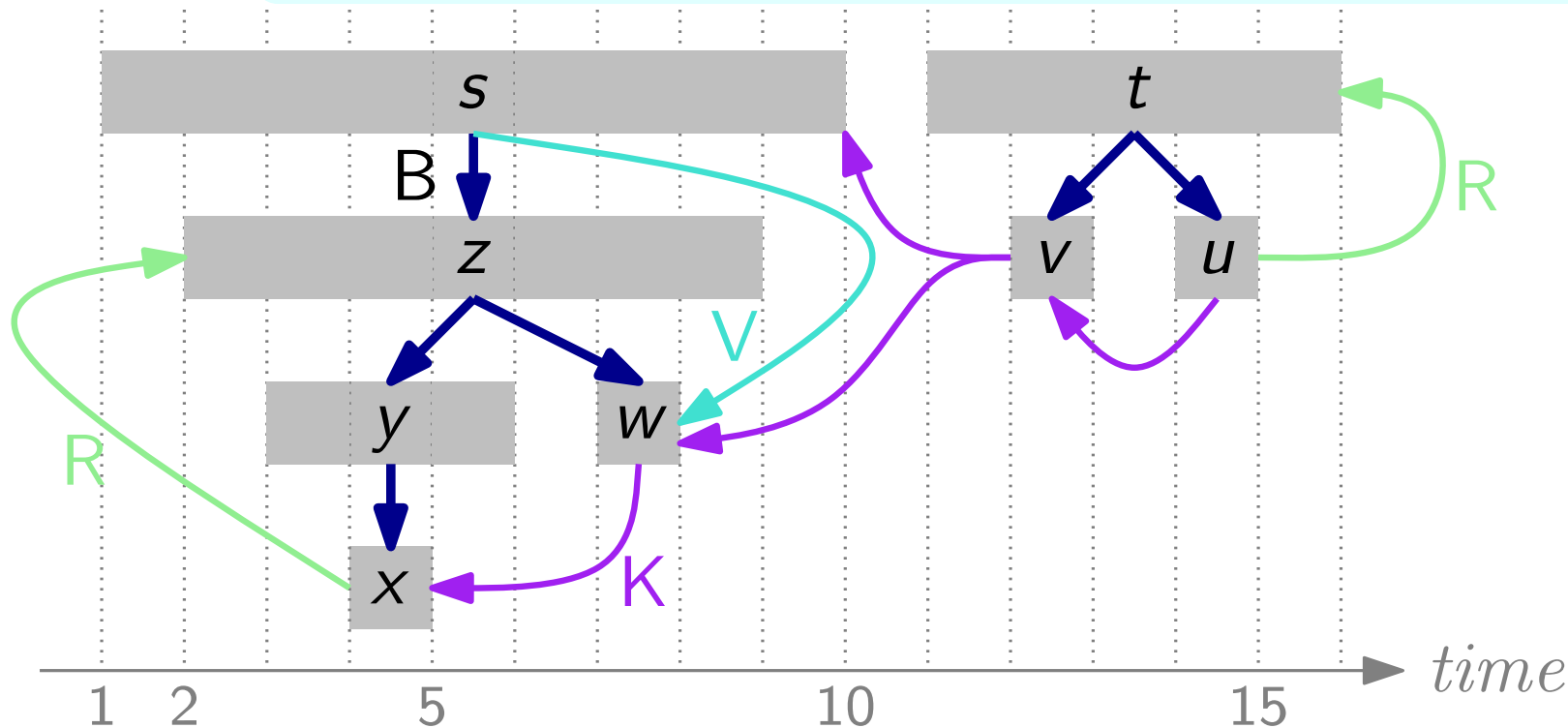
(Klammertheorem)

Nach DFS(G) gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

(i)

(ii)

(iii)



Tiefensuche – Analyse

d.h. für jedes Paar $\{u, v\}$ von Knoten (mit $u \neq v$)

Satz.

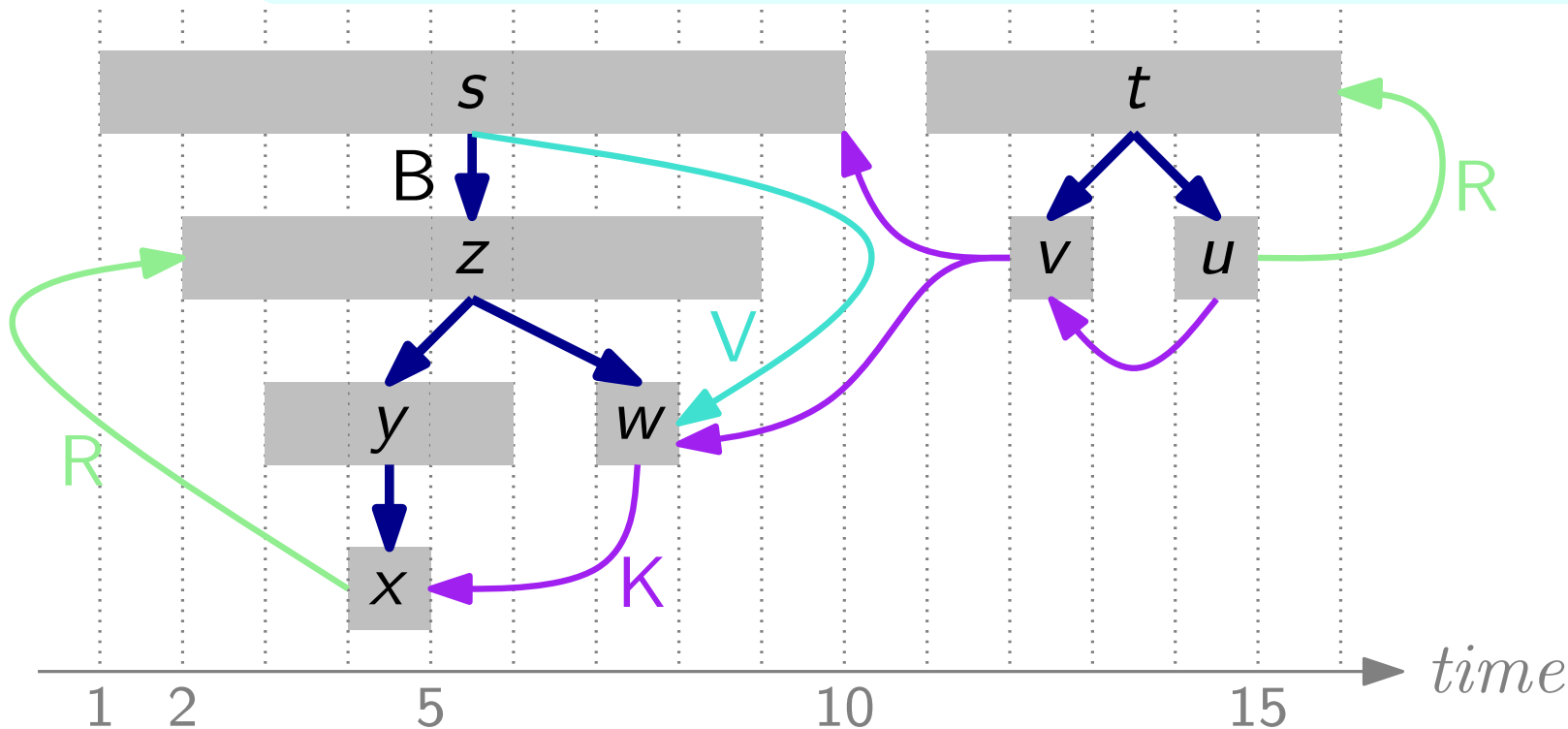
(Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

(i)

(ii)

(iii)



Tiefensuche – Analyse

Satz.

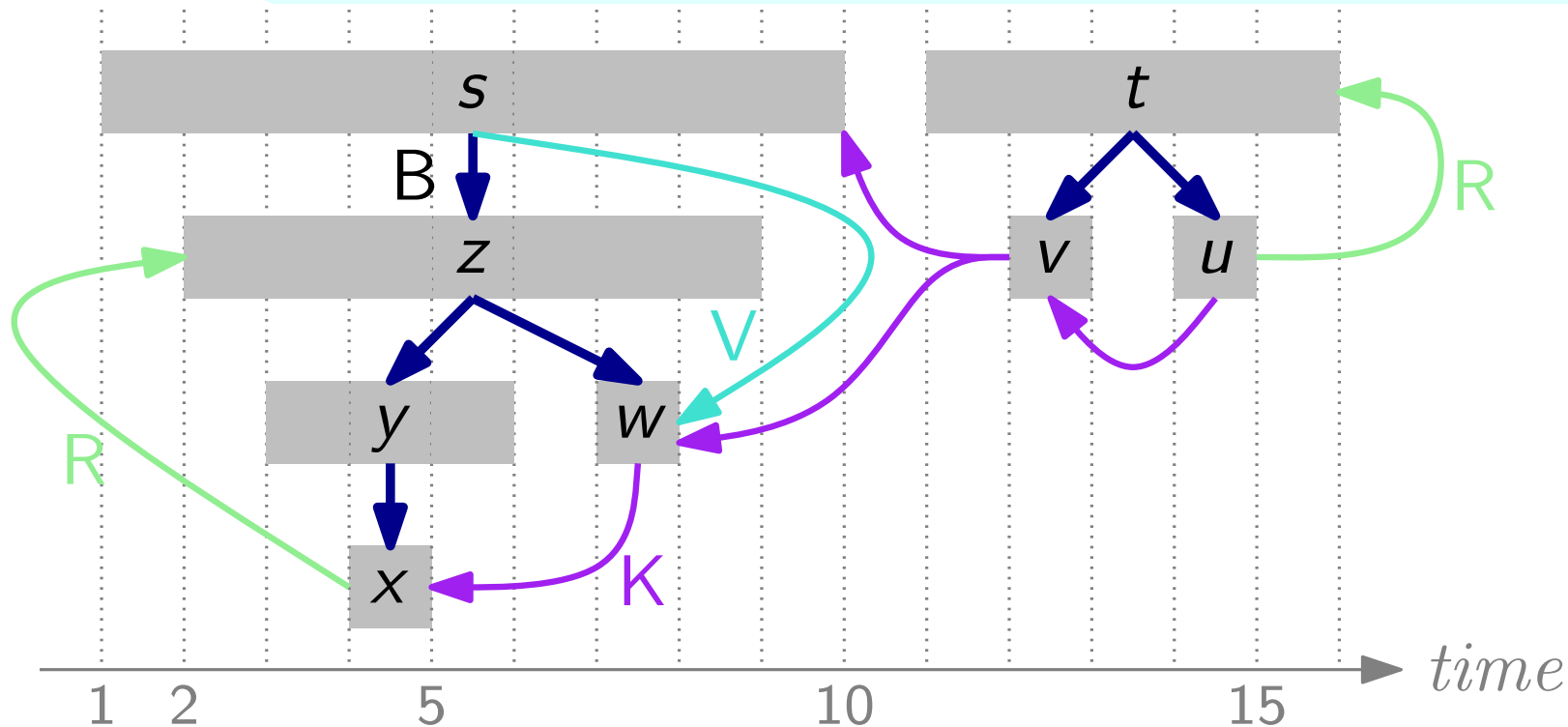
(Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

(i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.

(ii)

(iii)



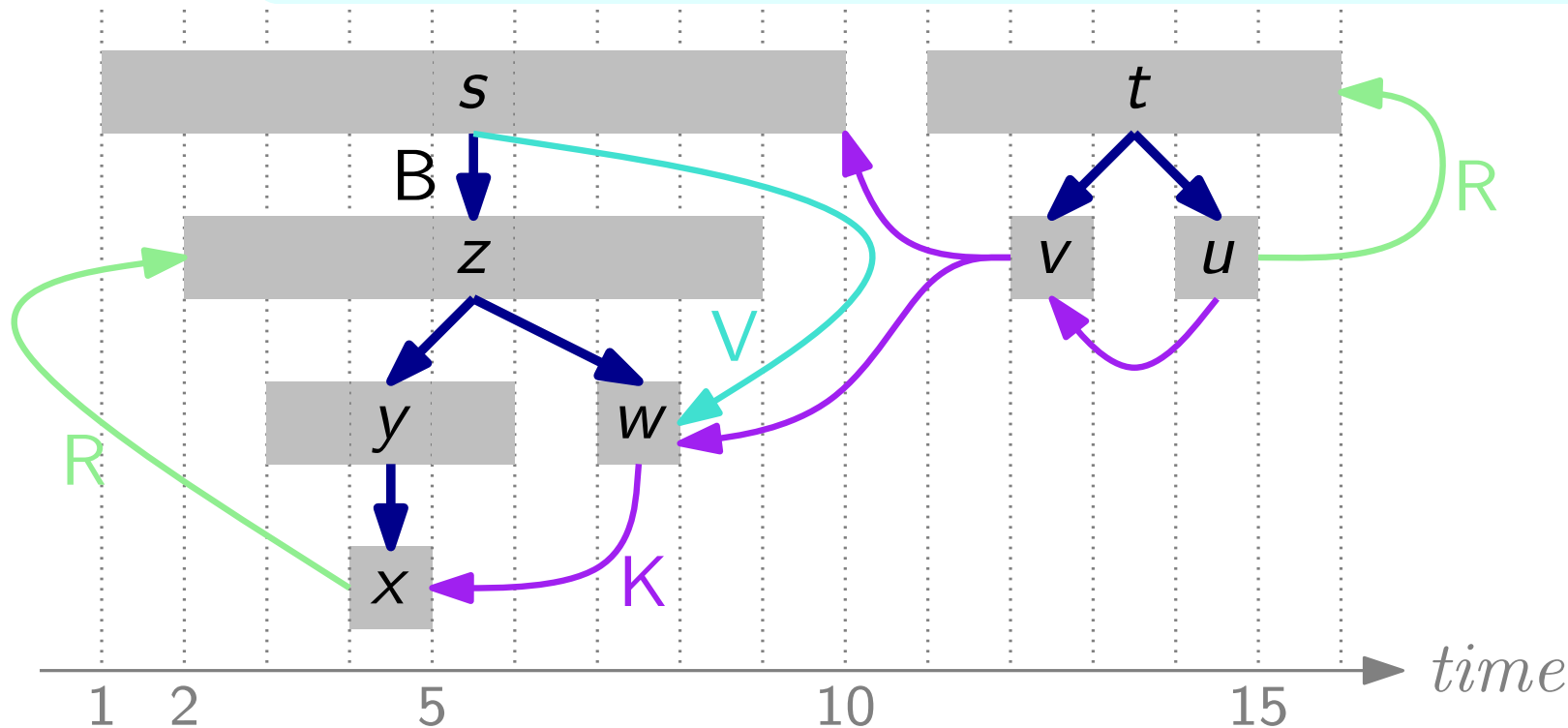
Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder $u-v$ - noch $v-u$ -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten $v-u$ -Weg.
- (iii)



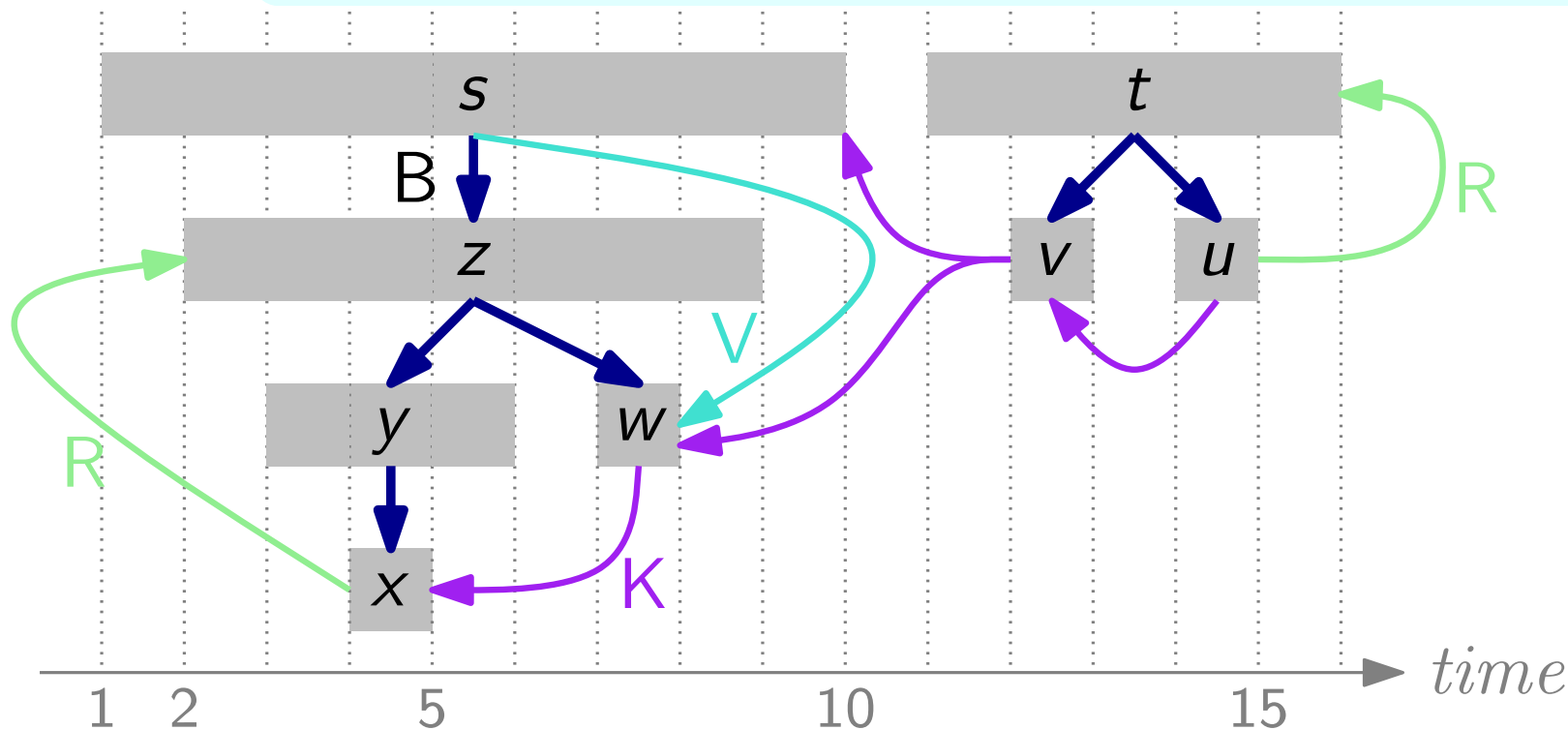
Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.



Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

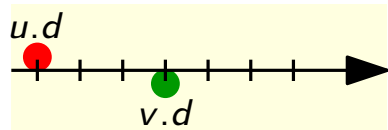
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

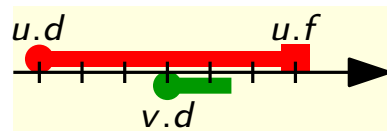
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$.

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

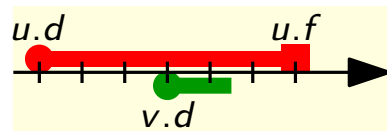
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

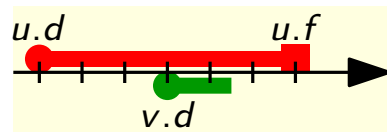
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.

$\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

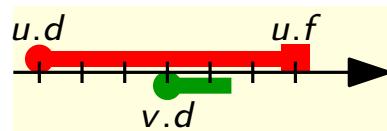
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

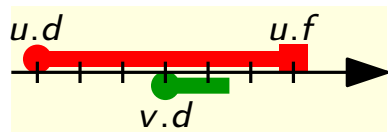
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Wegen $u.d < v.d$ gilt:

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

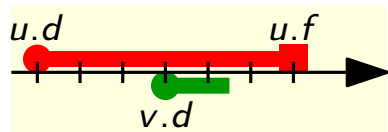
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Wegen $u.d < v.d$ gilt: v wurde später als u entdeckt.

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

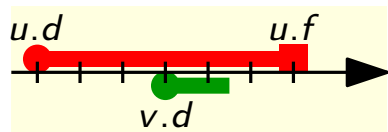
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Wegen $u.d < v.d$ gilt: v wurde später als u entdeckt.

\Rightarrow alle Kanten, die v verlassen, sind erforscht;

v wird schwarz, *bevor* DFS zu u zurückkehrt und u schwarz macht

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

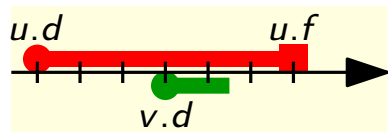
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Wegen $u.d < v.d$ gilt: v wurde später als u entdeckt.

\Rightarrow alle Kanten, die v verlassen, sind erforscht;

v wird schwarz, *bevor* DFS zu u zurückkehrt und u schwarz macht $\Rightarrow [v.d, v.f] \subset [u.d, u.f]$,

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

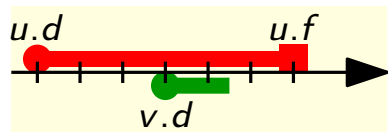
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$, d.h. v wurde entdeckt, als u noch grau war.
 $\Rightarrow v$ ist *Nachfolger* von u , d.h. es gibt einen u - v -Weg.

Wegen $u.d < v.d$ gilt: v wurde später als u entdeckt.

\Rightarrow alle Kanten, die v verlassen, sind erforscht;

v wird schwarz, *bevor* DFS zu u zurückkehrt und u

schwarz macht $\Rightarrow [v.d, v.f] \subset [u.d, u.f]$, d.h. (ii) ✓

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

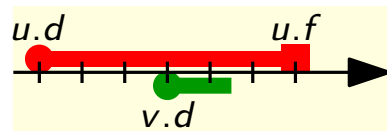
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

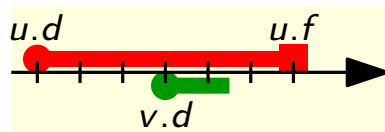
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B)

Tiefensuche – Analyse

Satz. (Klammertheorem)

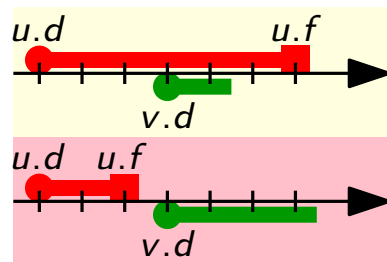
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

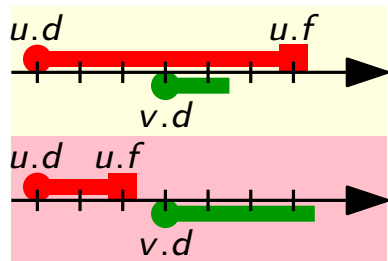
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

$u.f < v.d$

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

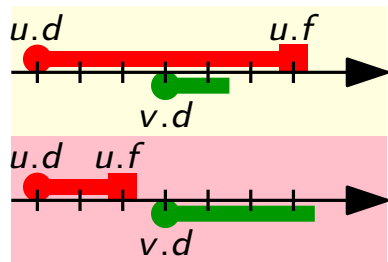
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem

$u.f < v.d$

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

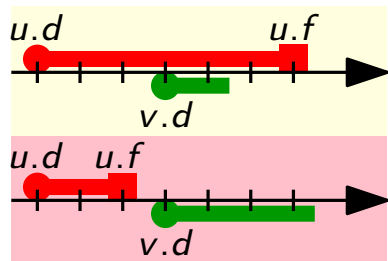
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d$

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

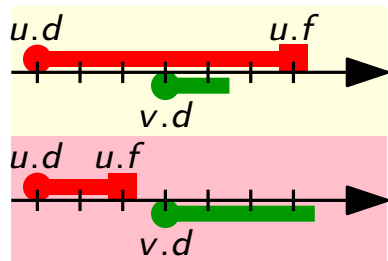
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

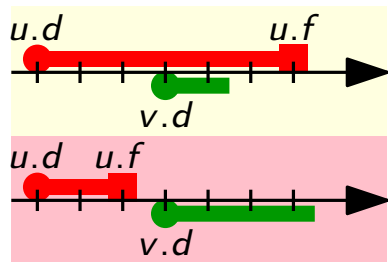
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

⇒

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

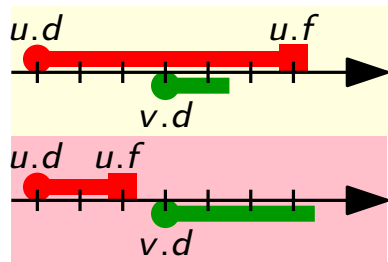
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

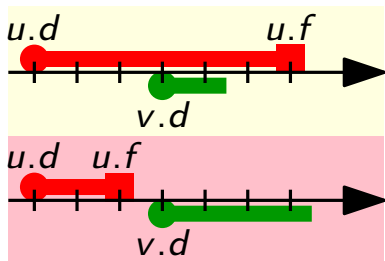
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
time = time + 1
u.d = time; u.color = gray
foreach v ∈ Adj[u] do
  if v.color == white then
    v.π = u;
    DFSVisit(G, v)
time = time + 1
u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war.

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

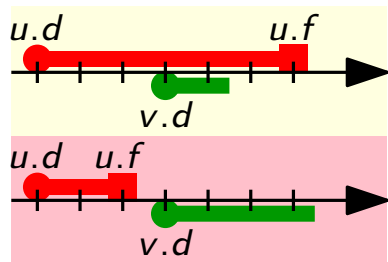
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen.

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

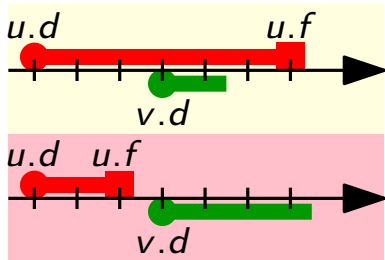
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$.

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) $\uparrow\uparrow$

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

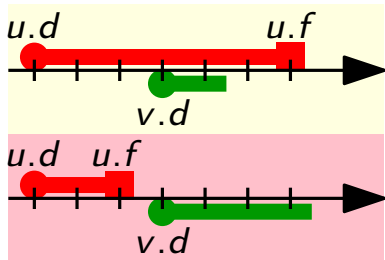
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) $\uparrow\uparrow$

Tiefensuche – Analyse

```

DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
    
```

Satz.

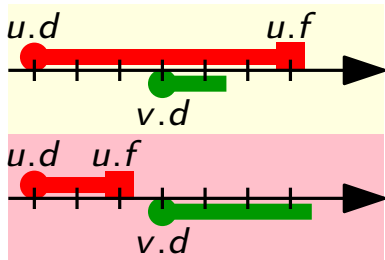
(Klammertheorem)

Nach DFS(G) gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$. ✓



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) ↑↑

Tiefensuche – Analyse

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

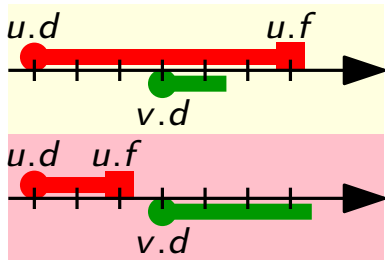
Satz. (Klammertheorem)

Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$. ✓ 2. Fall: $v.d < u.d$.



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) $\uparrow\uparrow$

Tiefensuche – Analyse

Satz.

(Klammertheorem)

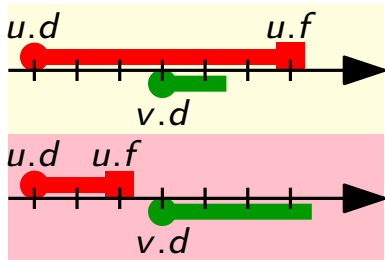
Nach $\text{DFS}(G)$ gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

```
DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
```

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$. ✓ 2. Fall: $v.d < u.d$. Symmetrisch!



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) ↑↑

Tiefensuche – Analyse

```

DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
    
```

Satz. (Klammertheorem)

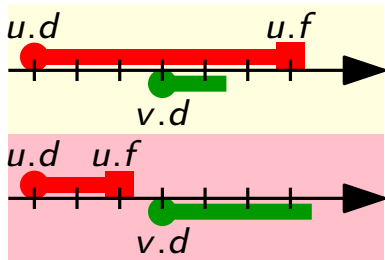
Nach DFS(G) gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis. Wir betrachten zwei Fälle.

1. Fall: $u.d < v.d$. ✓ 2. Fall: $v.d < u.d$. Symmetrisch!

(Vertausche im Beweis $u \leftrightarrow v$.)



A) $v.d < u.f$. ✓

B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) ↑↑

Tiefensuche – Analyse

```

DFSVisit(Graph G, Vertex u)
  time = time + 1
  u.d = time; u.color = gray
  foreach v ∈ Adj[u] do
    if v.color == white then
      v.π = u;
      DFSVisit(G, v)
  time = time + 1
  u.f = time; u.color = black
    
```

Satz.

(Klammertheorem)

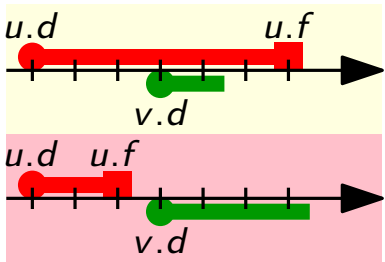
Nach DFS(G) gilt für $\{u, v\} \in \binom{V}{2}$ genau eine der Bedingungen

- (i) Besuchsintervalle disjunkt und Baumkanten enthalten weder u - v - noch v - u -Weg.
- (ii) $[u.d, u.f] \subset [v.d, v.f]$ und Baumkanten enthalten v - u -Weg.
- (iii) Wie (ii), nur umgekehrt.

Beweis.

Wir betrachten zwei Fälle.

- 1. Fall: $u.d < v.d$. ✓
- 2. Fall: $v.d < u.d$. Symmetrisch! ✓
(Vertausche im Beweis $u \leftrightarrow v$.)



- A) $v.d < u.f$. ✓
- B) $u.f < v.d$. ✓

Laut Code gilt außerdem $u.d < u.f < v.d < v.f$

$$\Rightarrow [u.d, u.f] \cap [v.d, v.f] = \emptyset$$

\Rightarrow Keiner der beiden Knoten wurde entdeckt, während der andere noch grau war, d.h. keiner Nachf. des anderen. (i) ↑↑

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.
Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

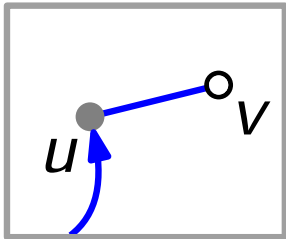
Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



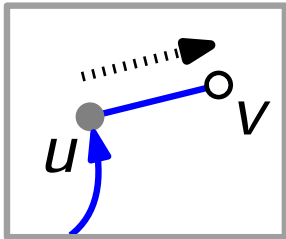
- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



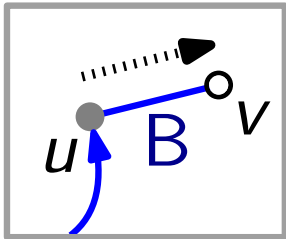
- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
 O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



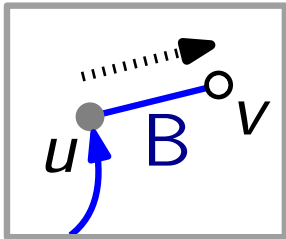
- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*. Dann ist uv Baumkante.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

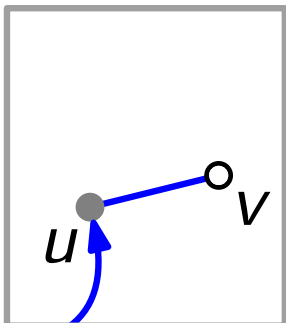
Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
 O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*. Dann ist uv Baumkante.



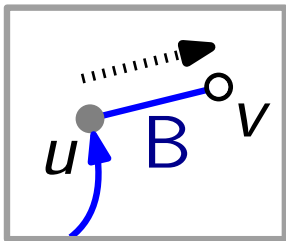
- Andernfalls wird uv zum ersten Mal von v nach u überschritten.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

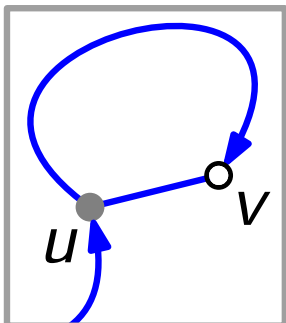
Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
 O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*. Dann ist uv Baumkante.



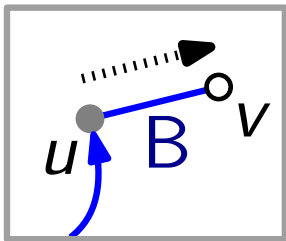
- Andernfalls wird uv zum ersten Mal von v nach u überschritten.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

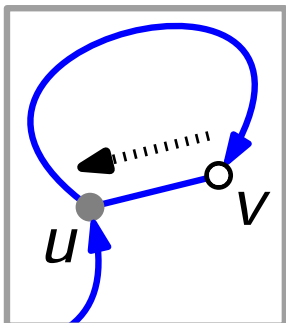
Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
 O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*. Dann ist uv Baumkante.



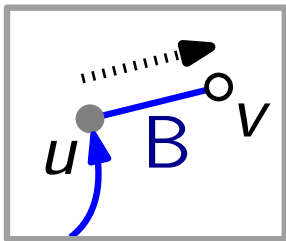
- Andernfalls wird uv zum ersten Mal von v nach u überschritten.

Tiefensuche in ungerichteten Graphen

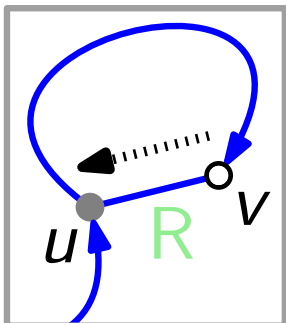
Satz. G ungerichtet
 $\Rightarrow G$ hat nur Baum- und Rückwärtskanten.

Beweis. Sei uv (kurz für $\{u, v\}$) eine beliebige Kante von G .
 O.B.d.A. gilt $u.d < v.d$.

Dann entdeckt DFS v und färbt v schwarz, bevor u schwarz gefärbt wird (da $v \in \text{Adj}[u]$).



- Falls DFS uv zum ersten Mal von u nach v überschreitet, ist v zu diesem Zeitpunkt *weiss*. Dann ist uv Baumkante.



- Andernfalls wird uv zum ersten Mal von v nach u überschritten. Dann ist uv R-Kante, da u dann schon (und immer noch) *grau* ist.



Ablaufplanung

Unterhose

Socken

Hose

Schuhe

Gürtel

Uhr

Schal

T-Shirt

Anorak

Pulli

Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

Unterhose

Socken

Hose

Schuhe

Gürtel

Uhr

Schal

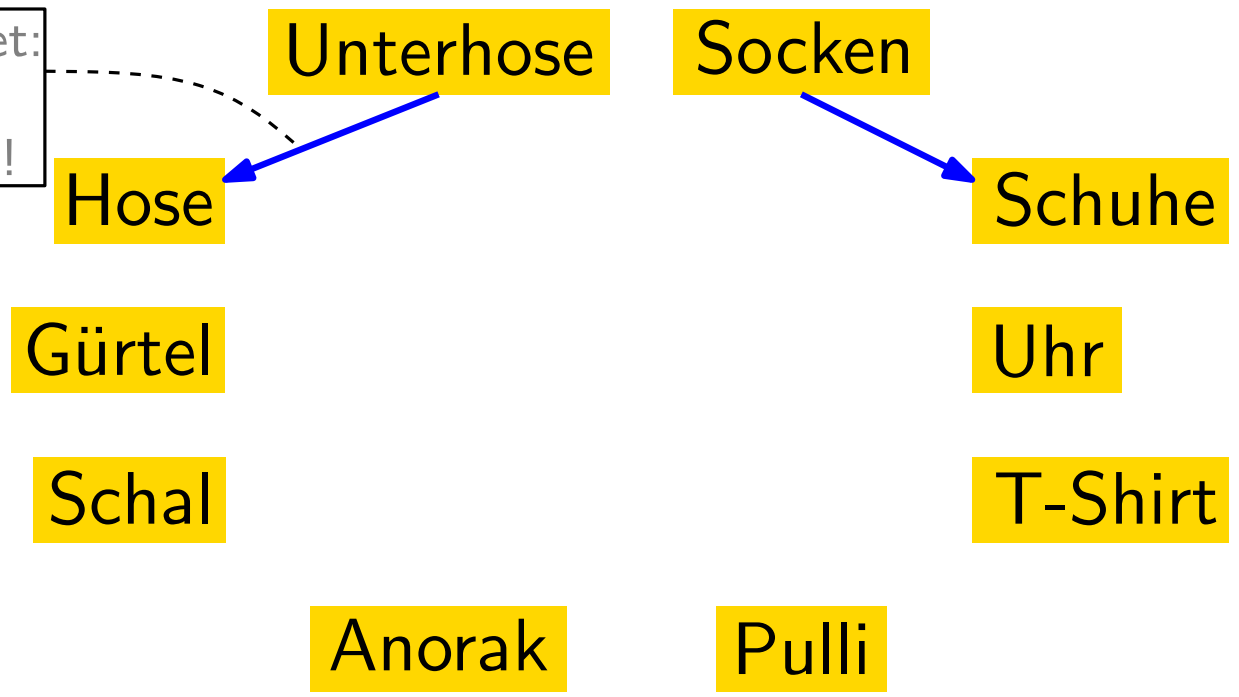
T-Shirt

Anorak

Pulli

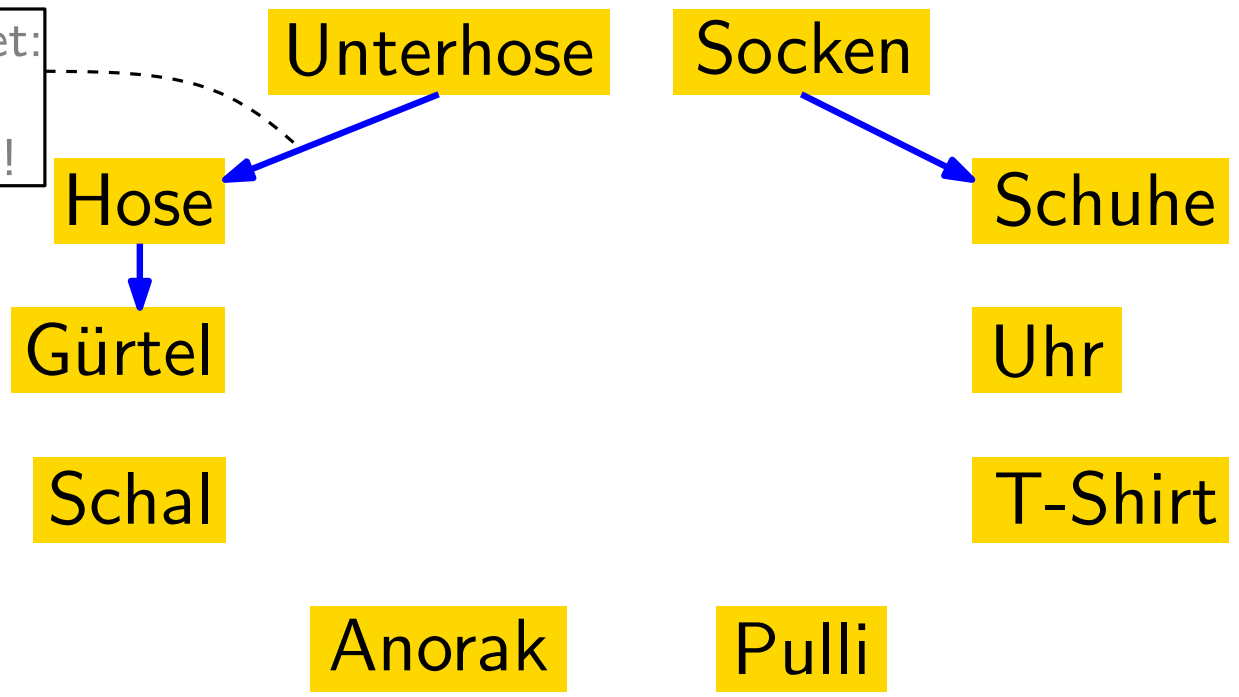
Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



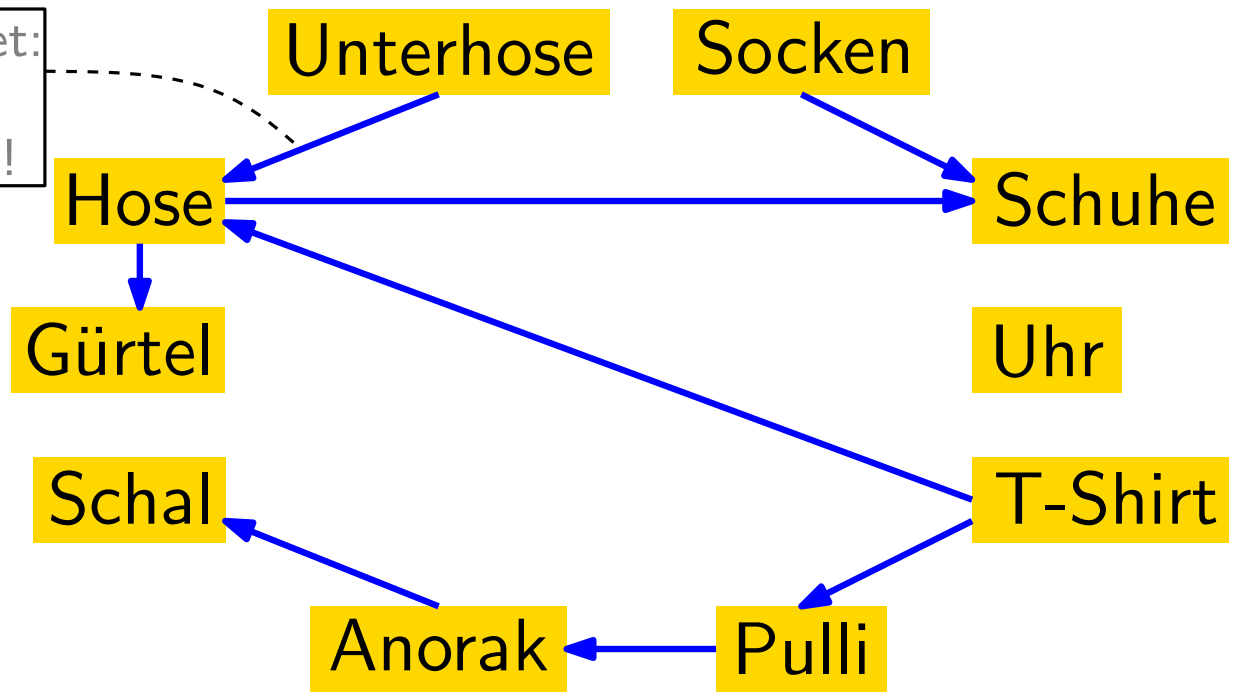
Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

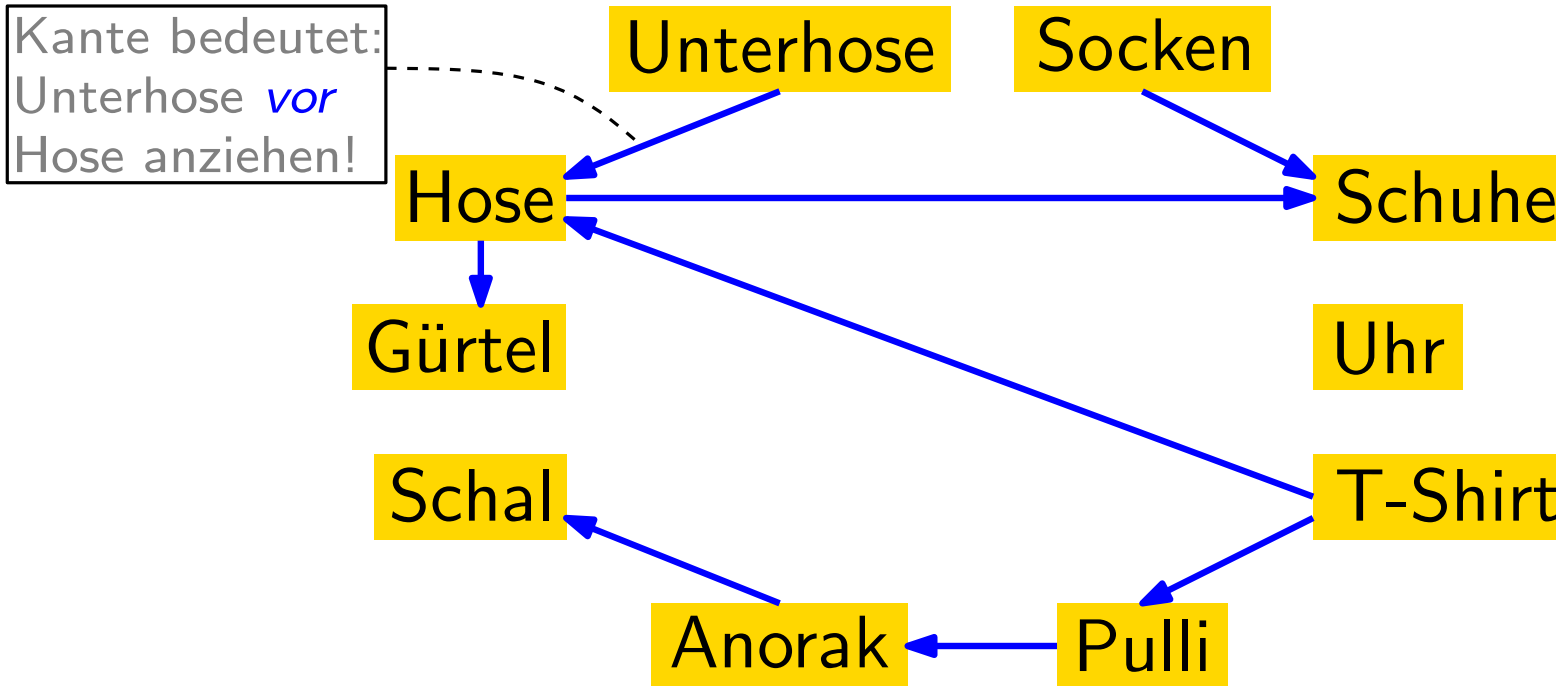


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



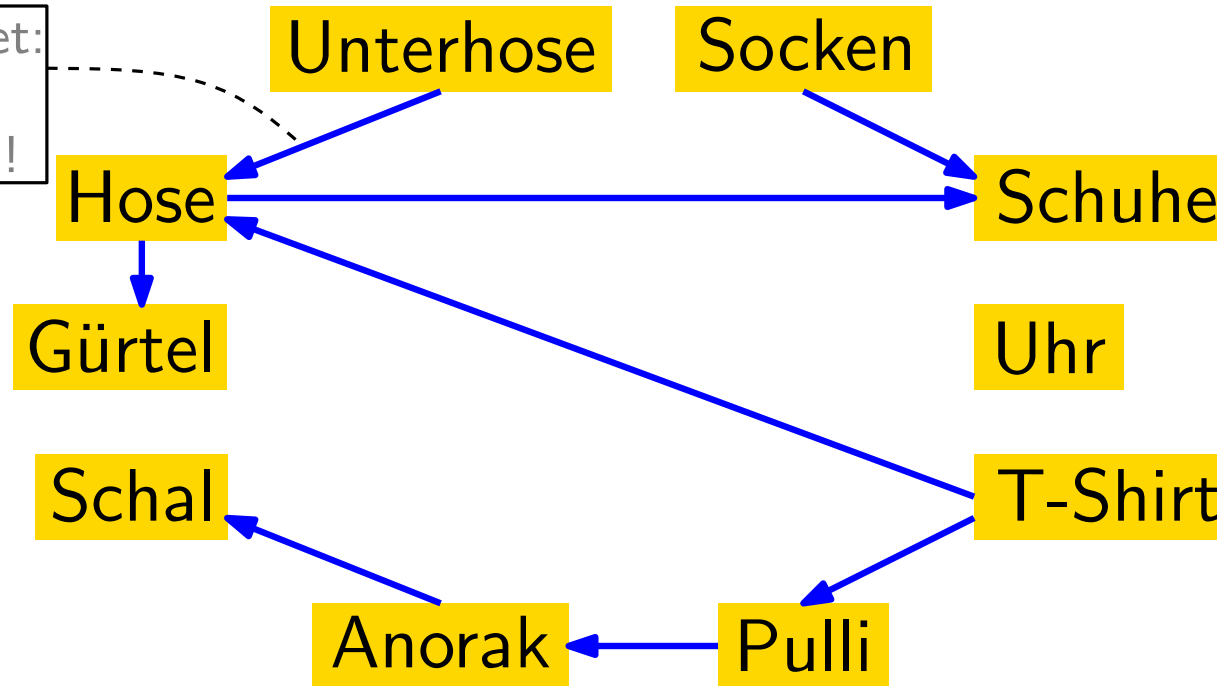
Ablaufplanung



Aufgabe: Finde Ablaufplan –
d.h. Reihenfolge der Knoten, so dass alle Einschränkungen erfüllt sind (z.B. T-Shirt vor Pulli).

Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

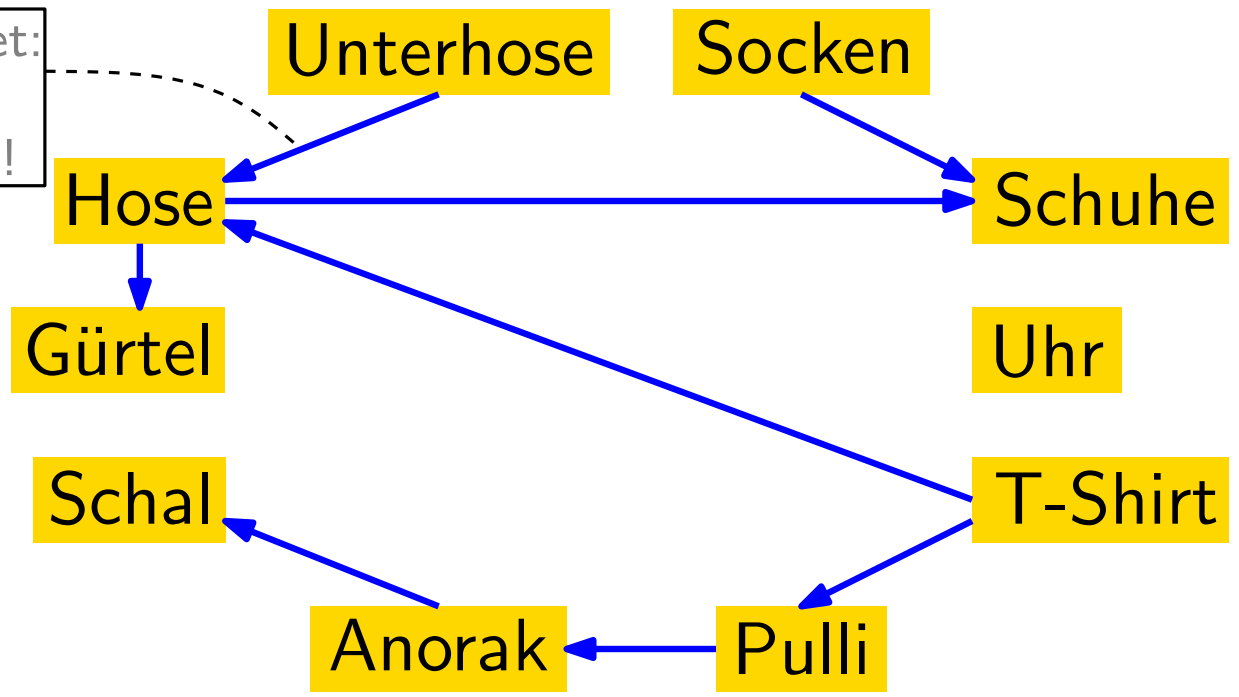


Aufgabe: Finde Ablaufplan –
d.h. Reihenfolge der Knoten, so dass alle Einschränkungen erfüllt sind (z.B. T-Shirt vor Pulli).

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

Ablaufplanung

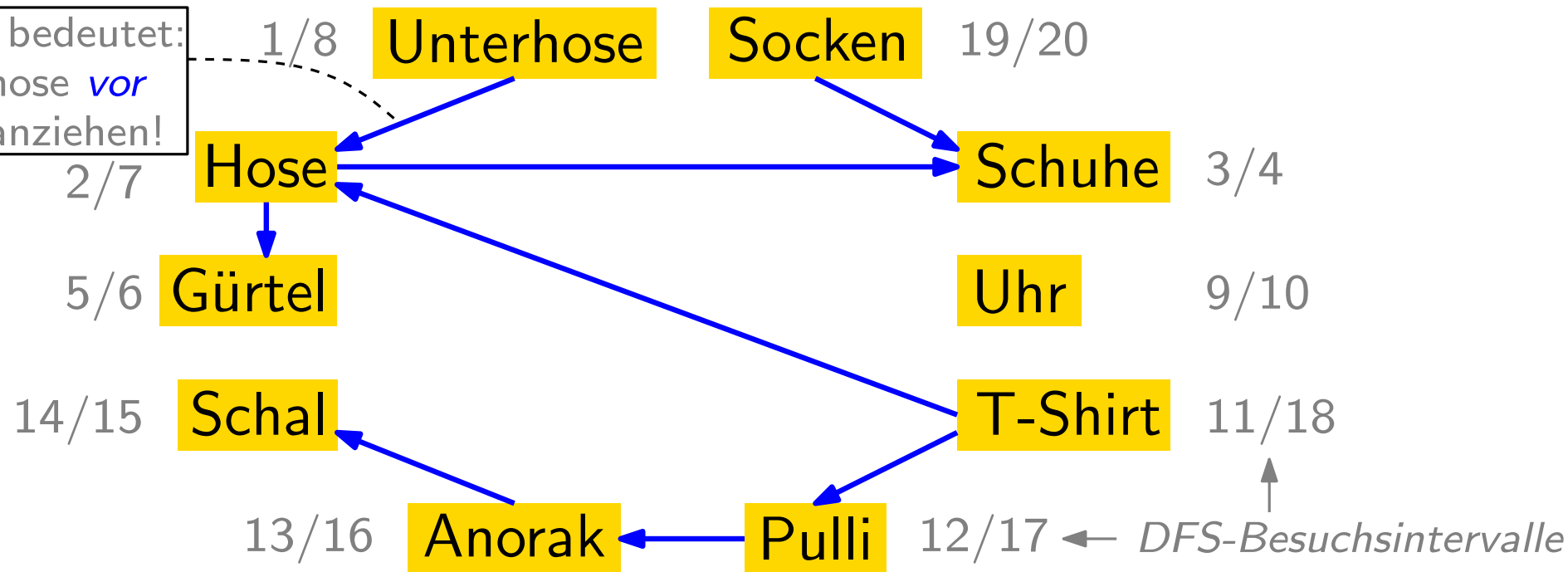
Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



Idee: Nutze Tiefensuche!

Ablaufplanung

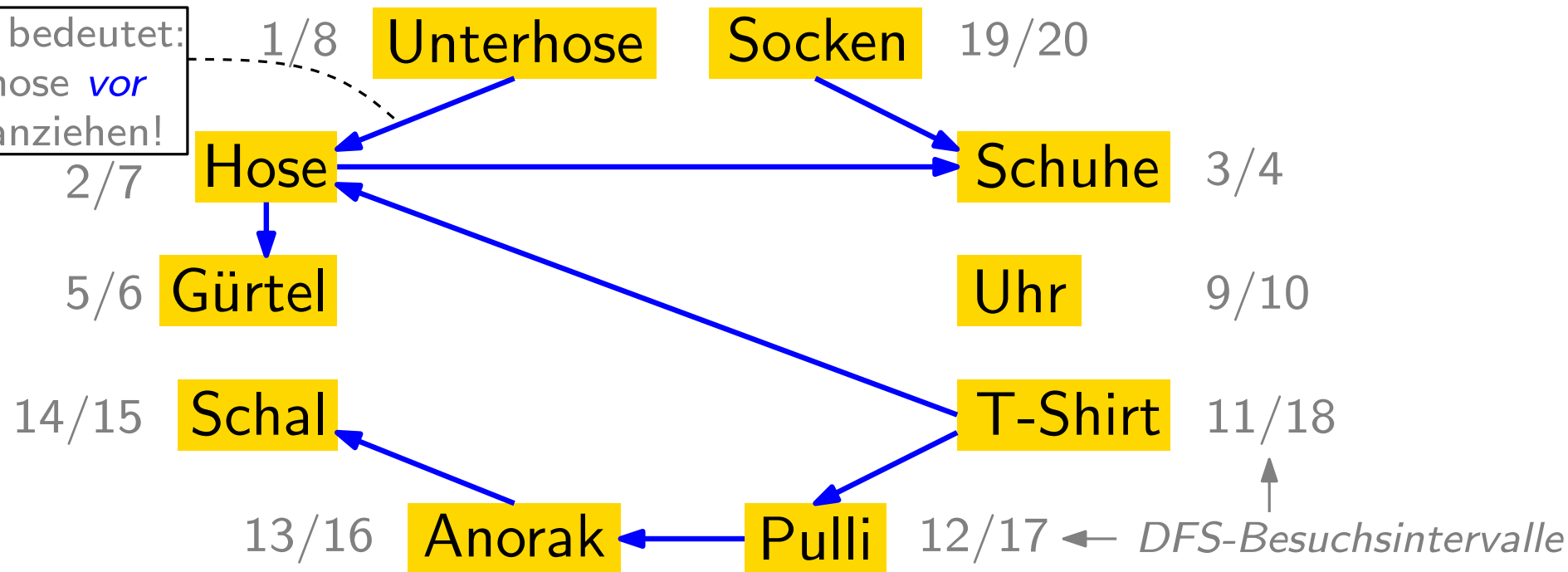
Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



Idee: Nutze Tiefensuche!

Ablaufplanung

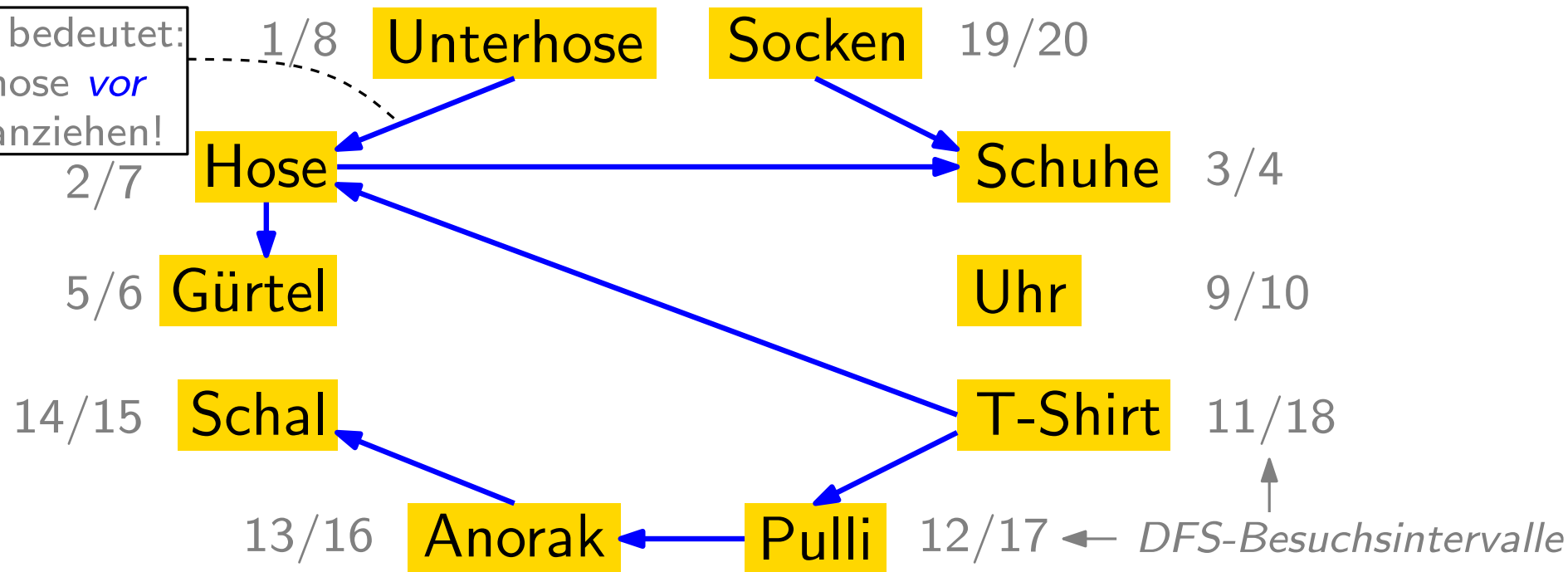
Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



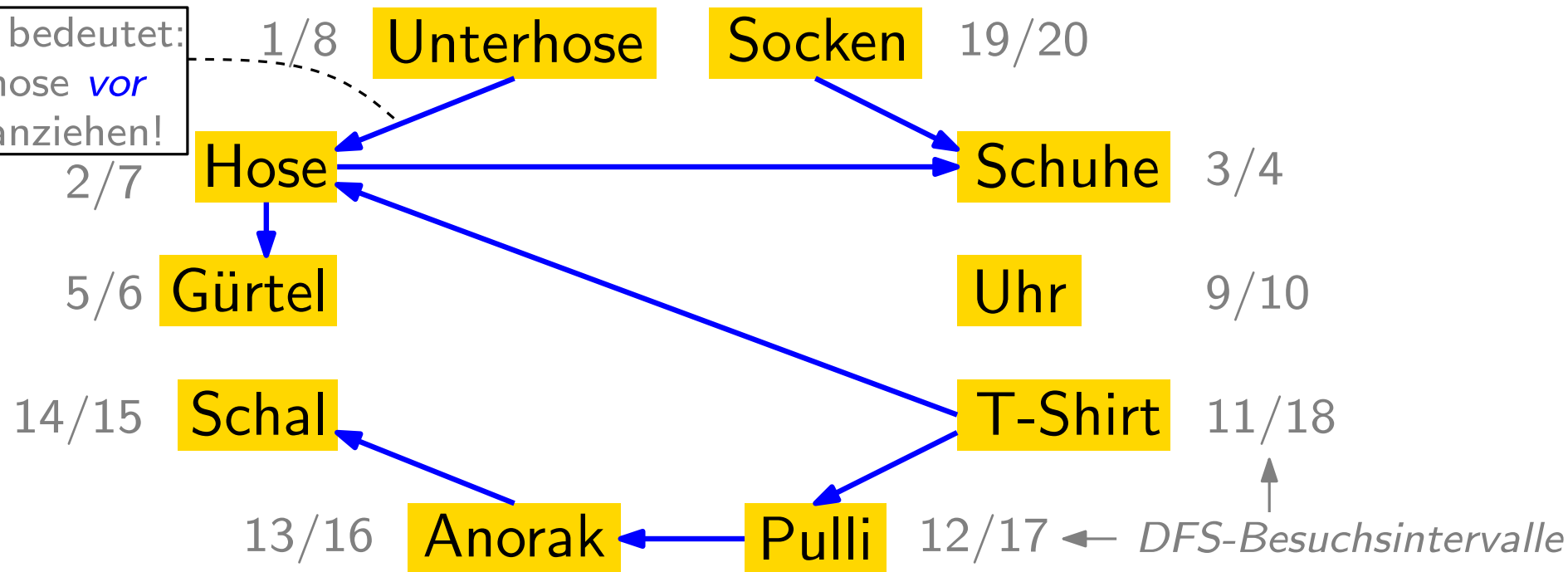
Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

19/20

Socken

Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

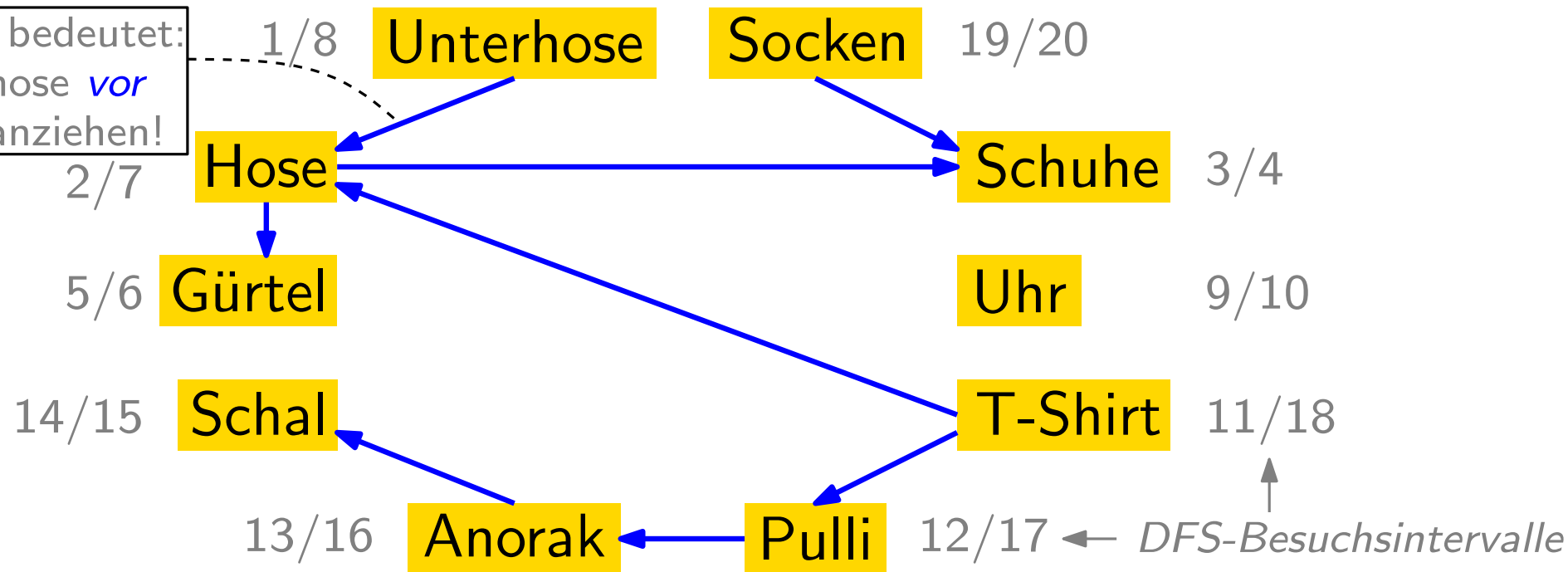


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

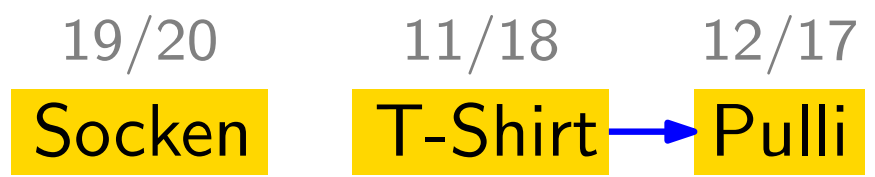
19/20	11/18
Socken	T-Shirt

Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

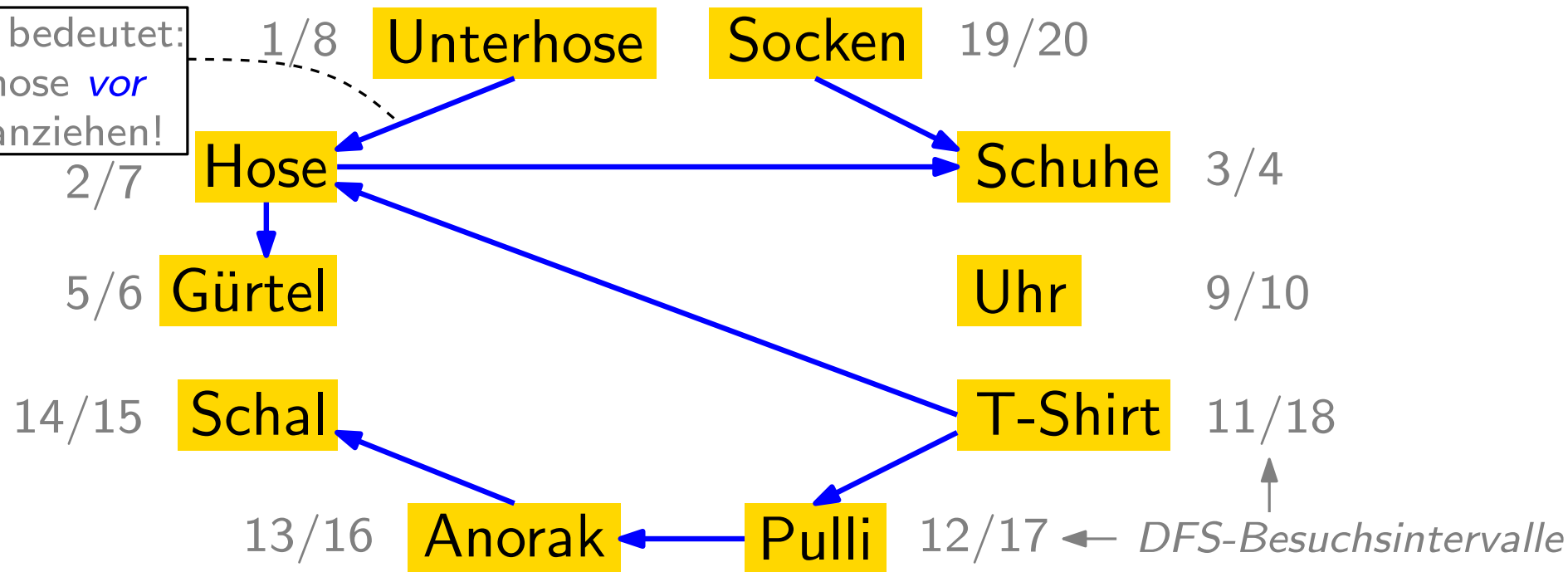


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

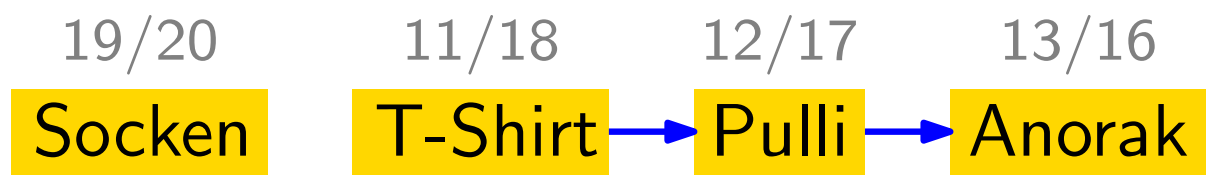


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

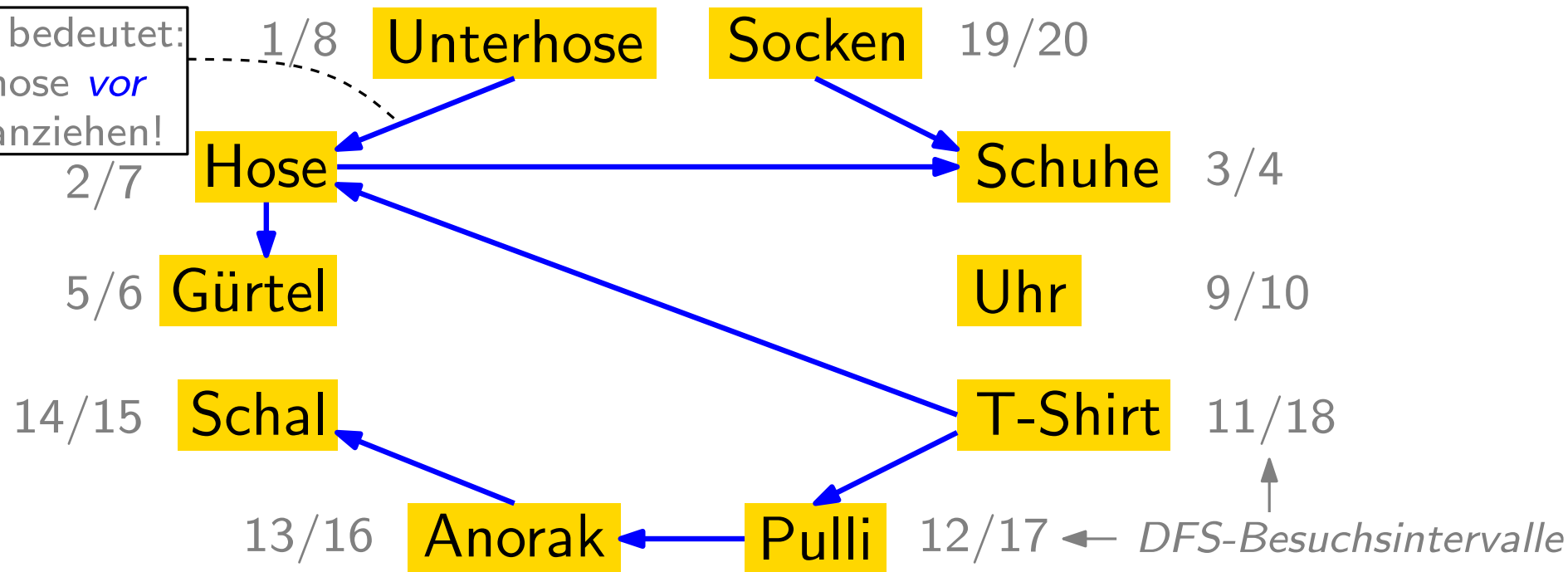


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

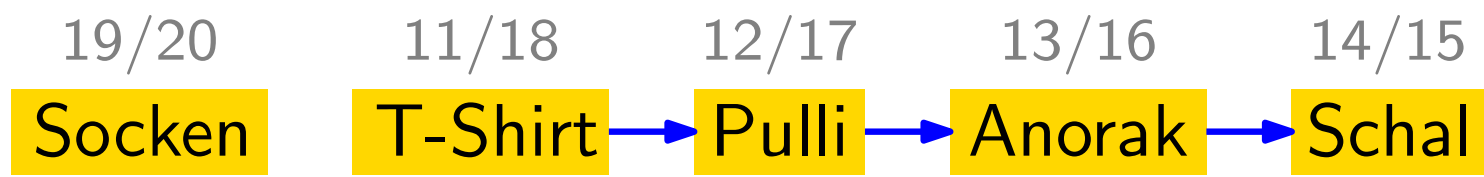


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

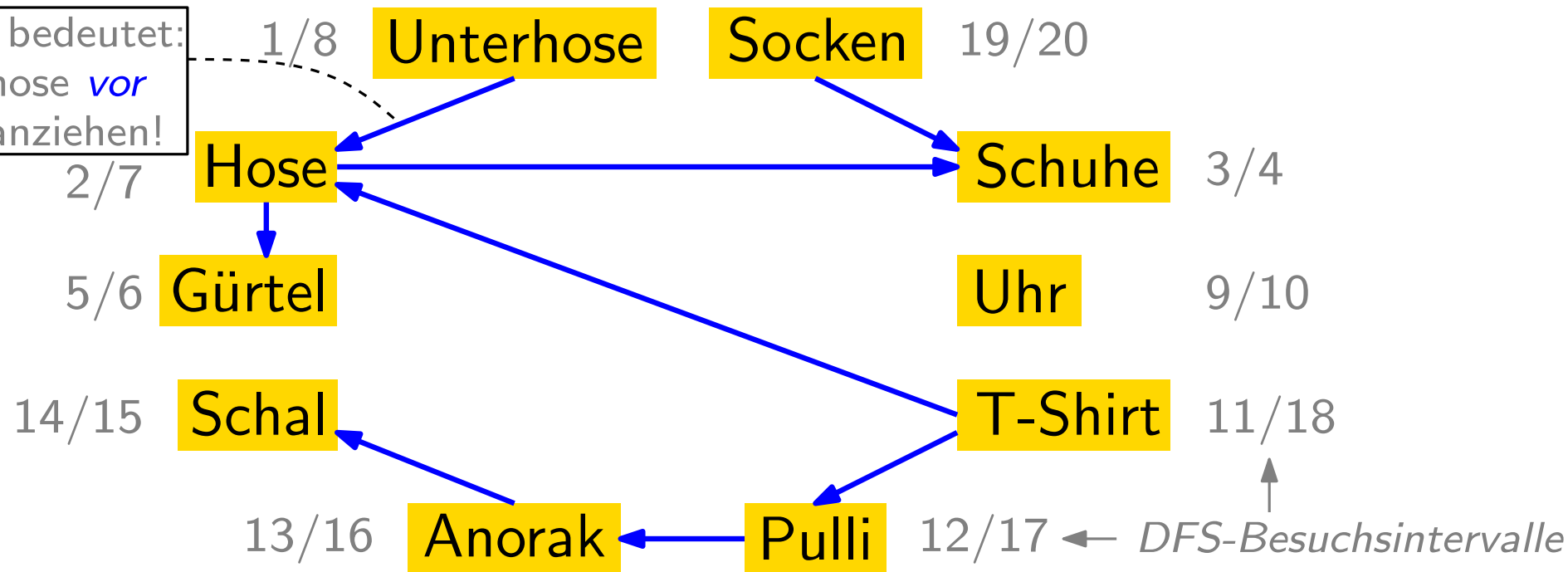


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

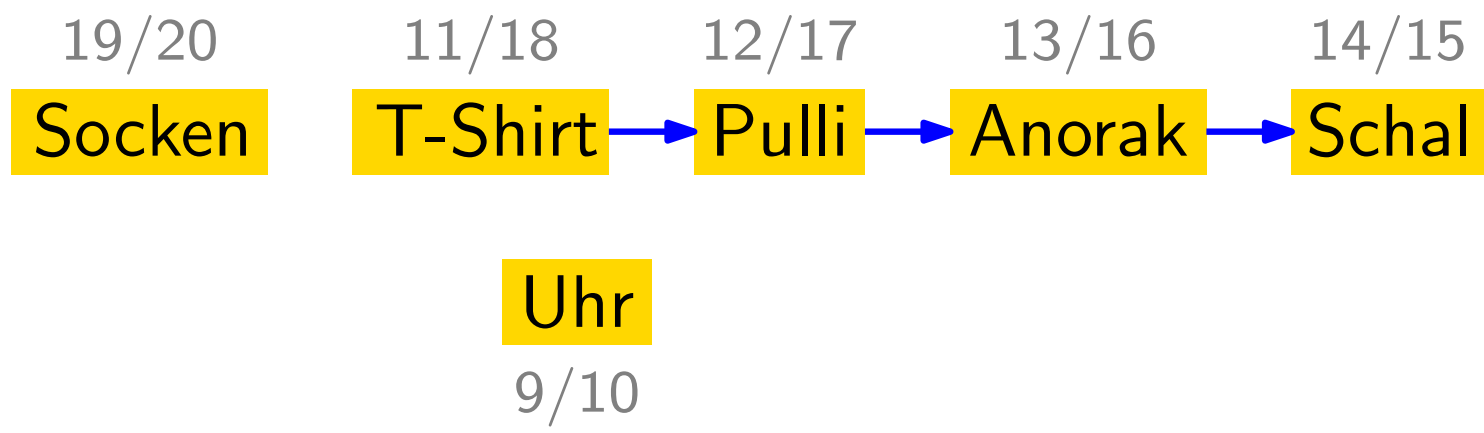


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

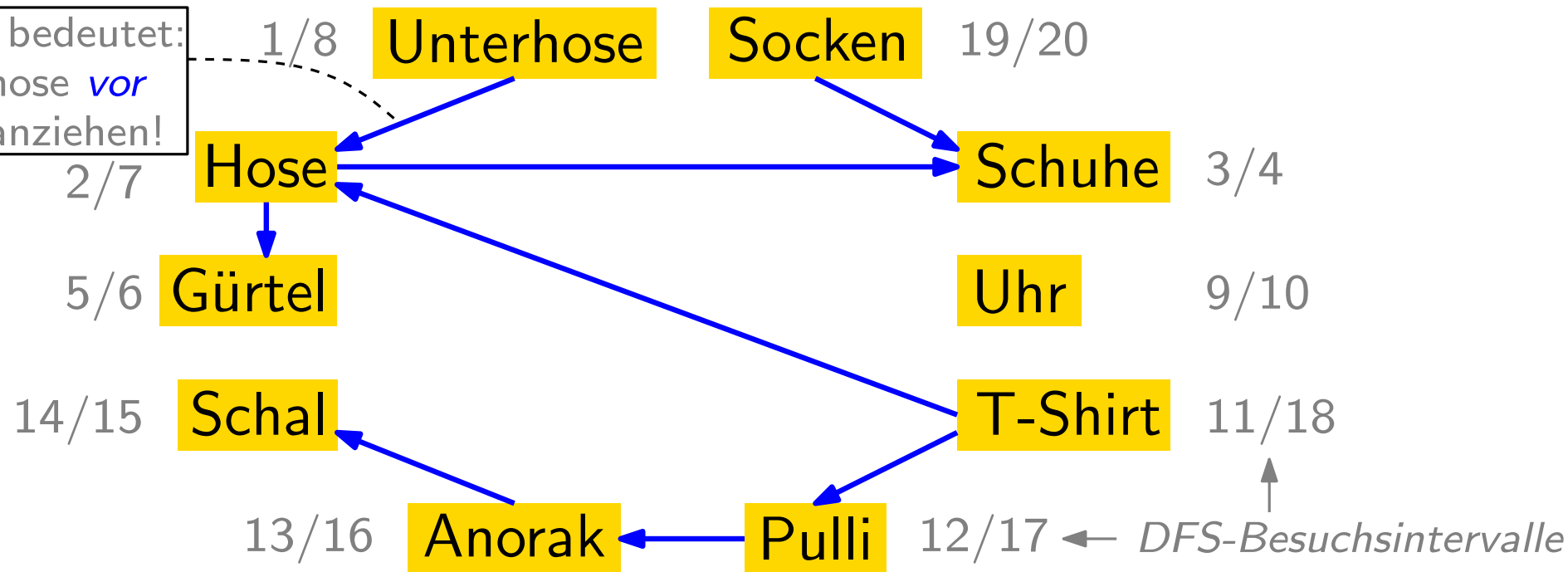


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

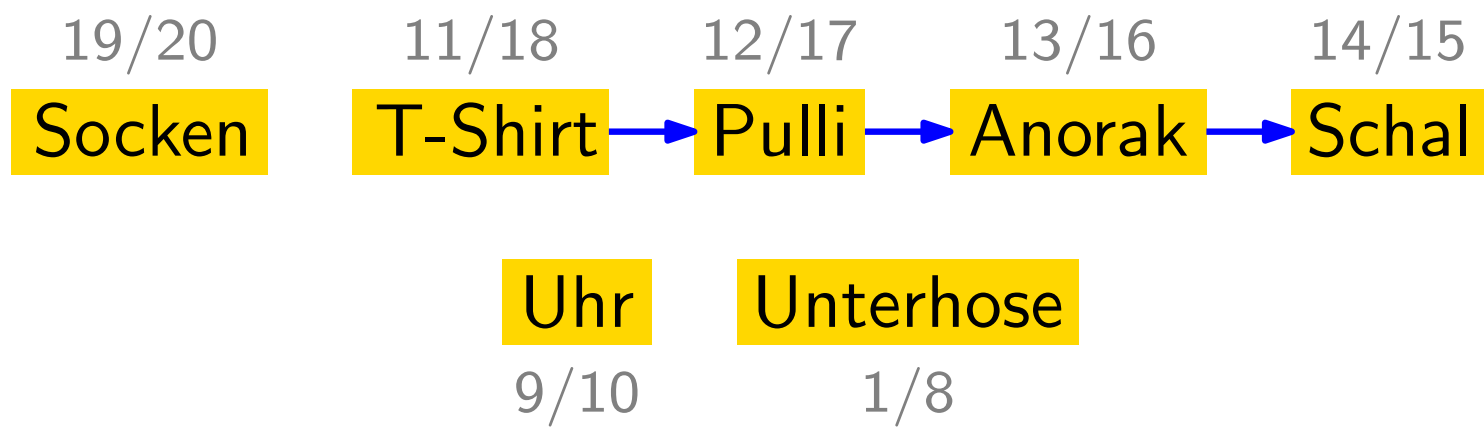


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

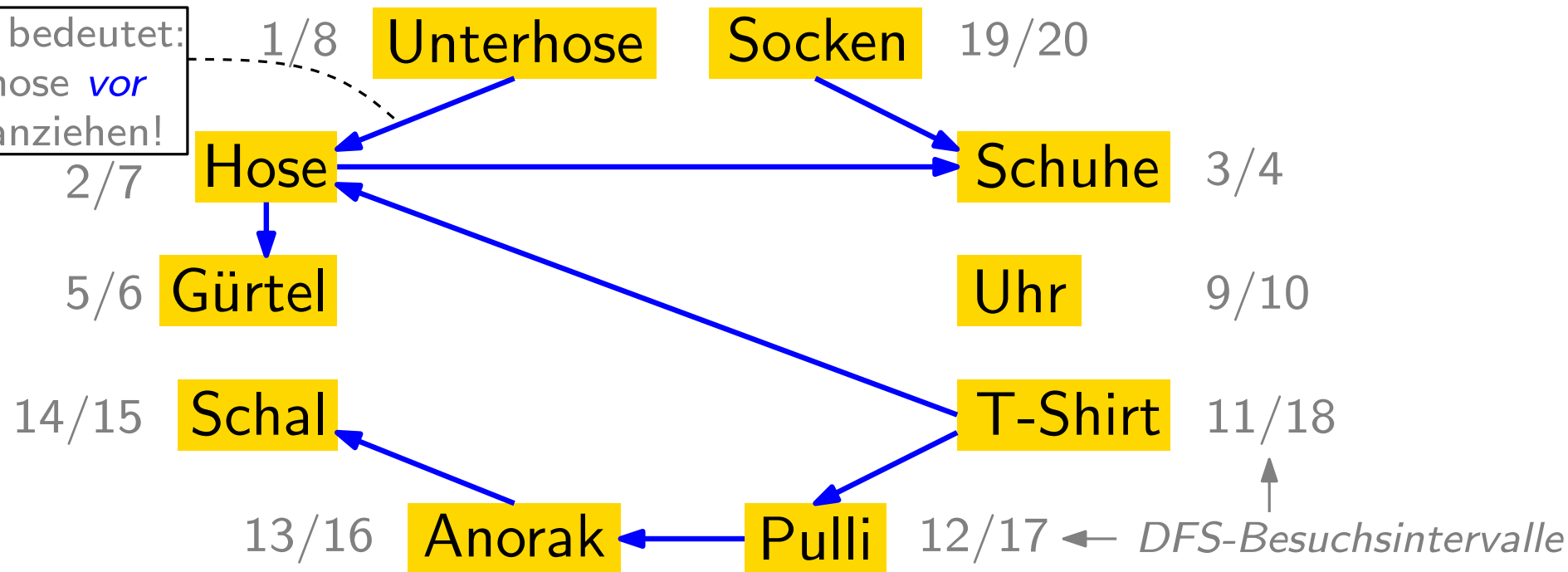


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

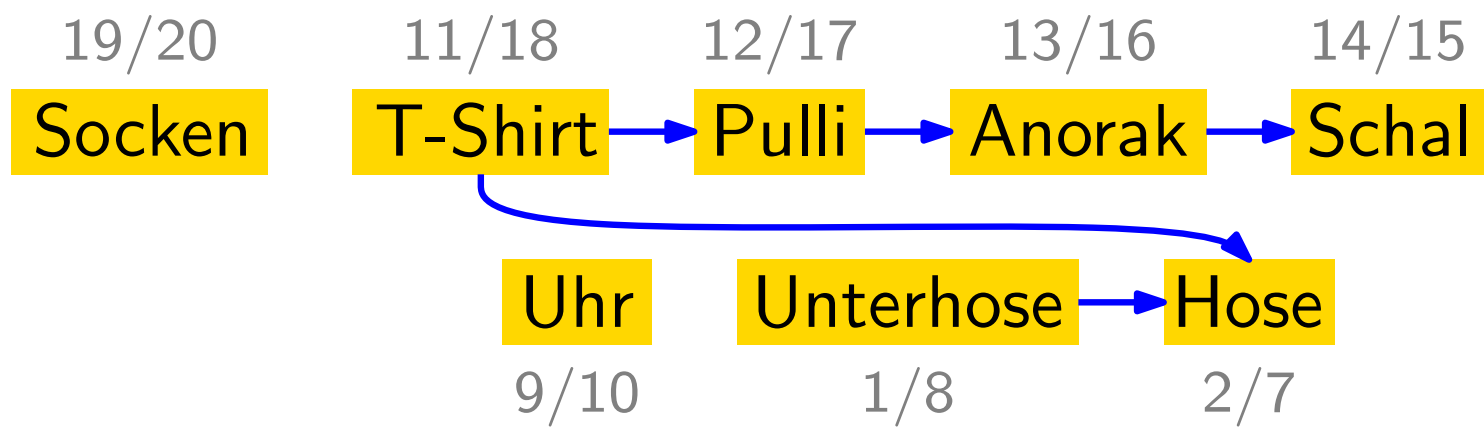


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

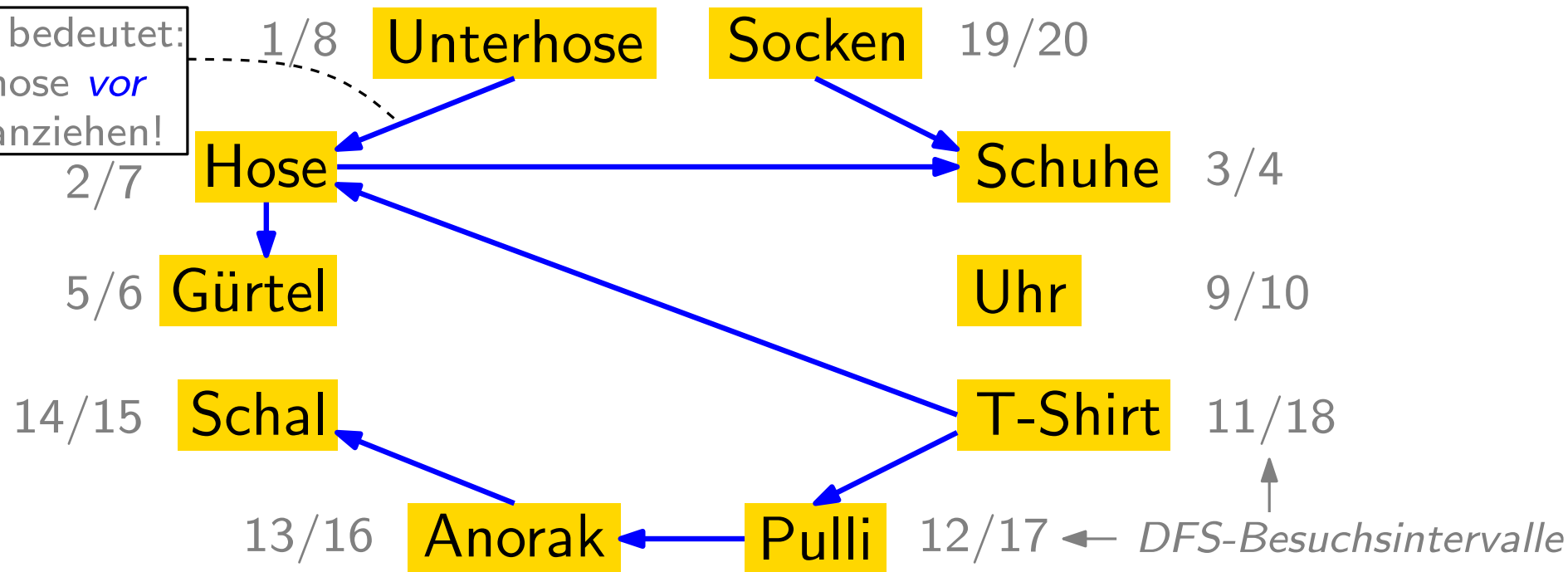


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden f -Zeiten.

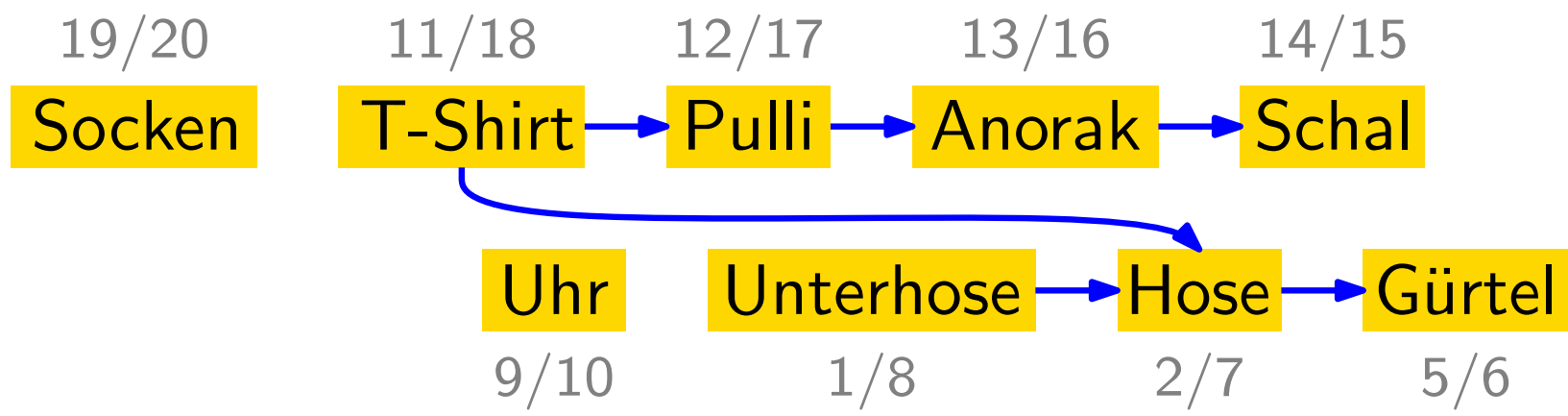


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

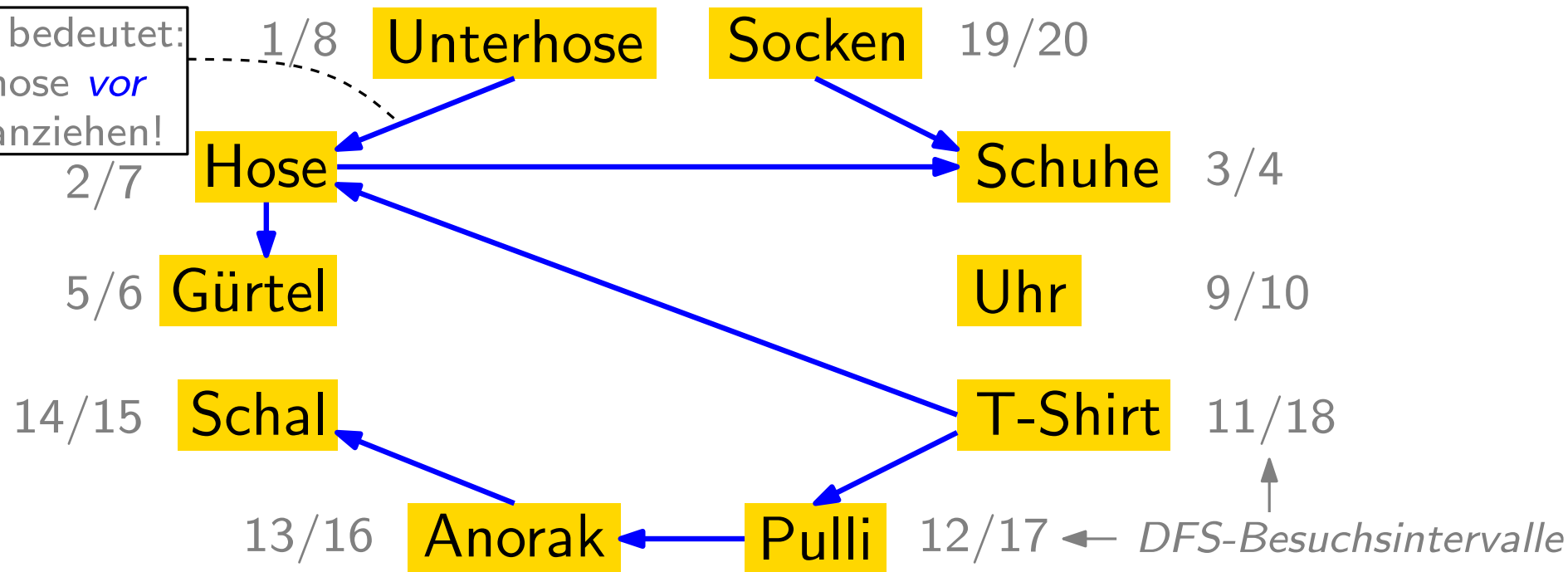


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

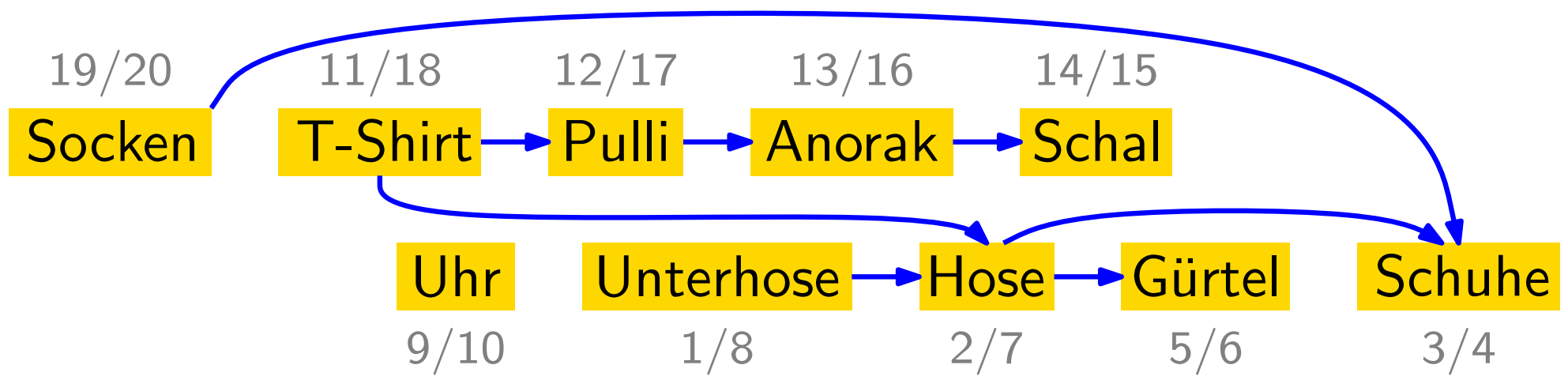


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

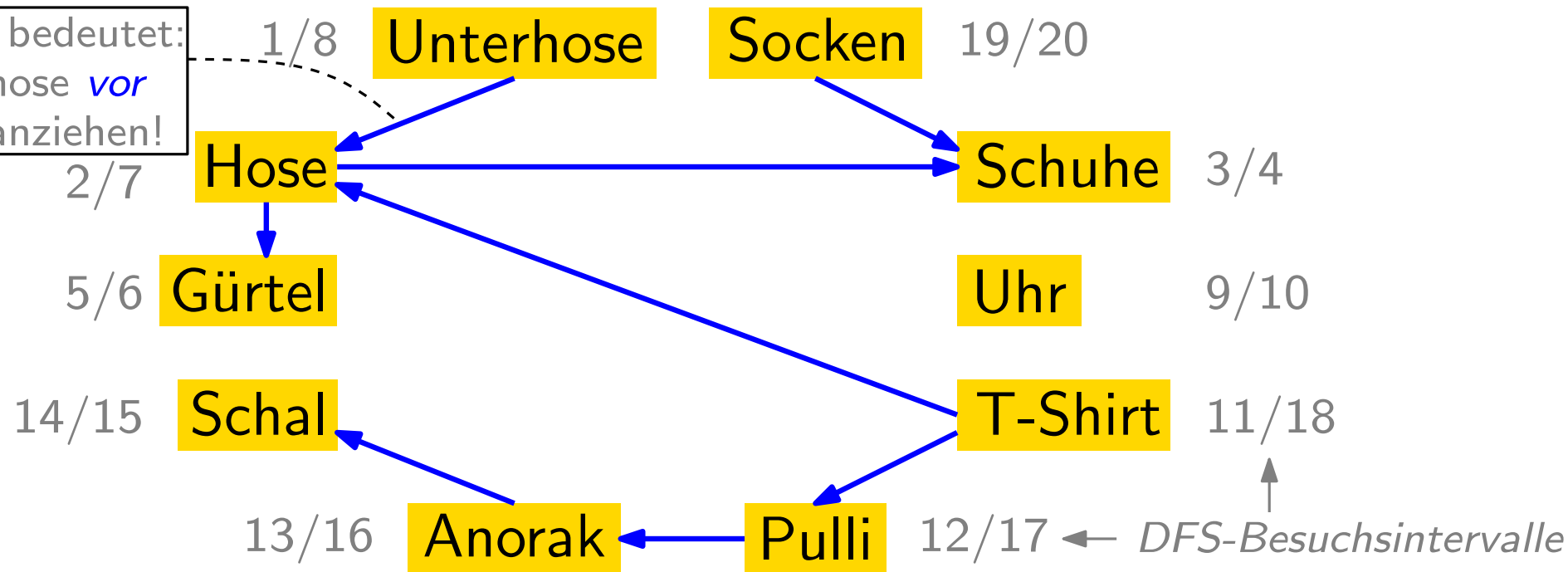


Idee: Nutze Tiefensuche!
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

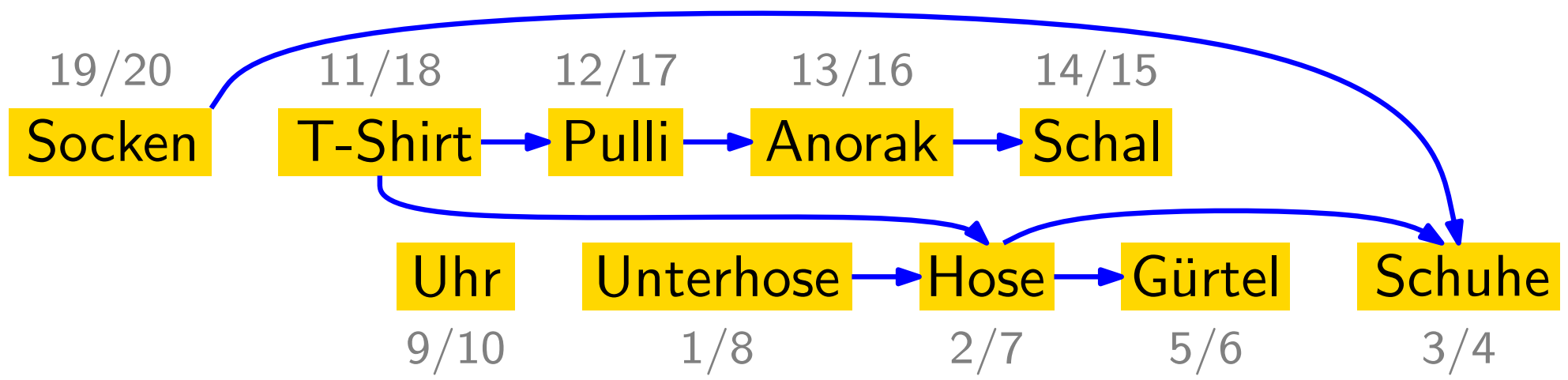


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!

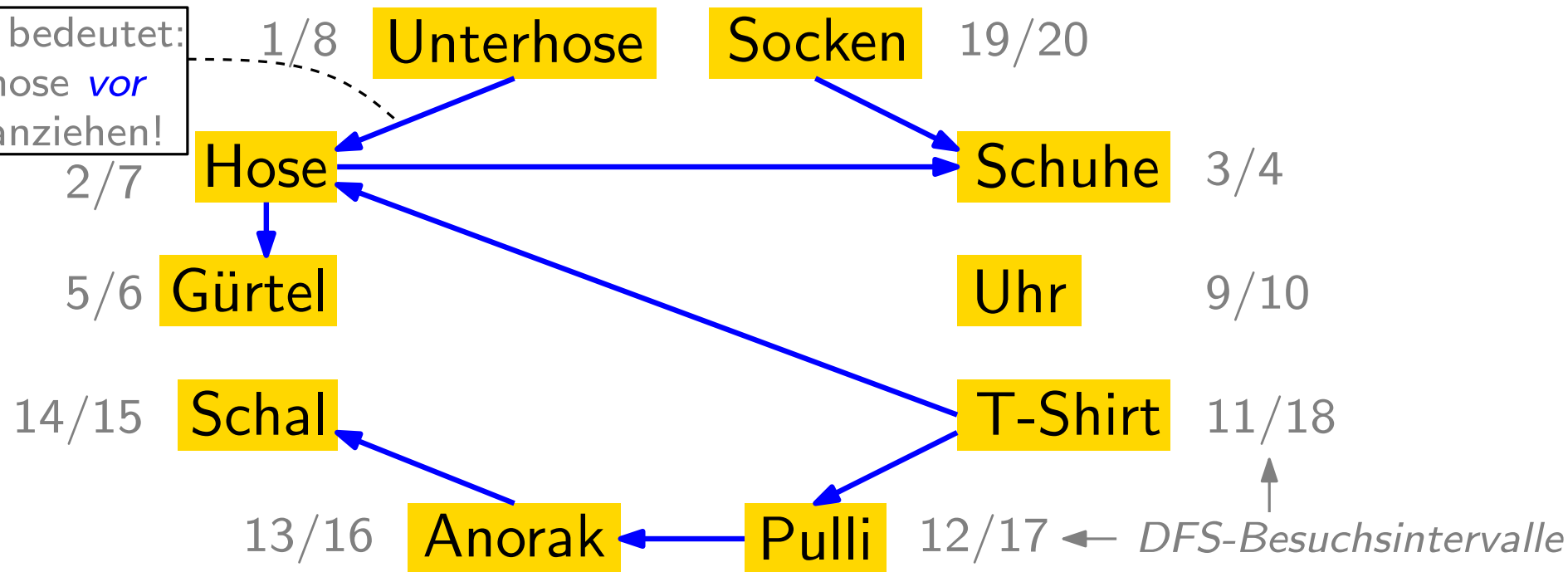


Idee: Nutze Tiefensuche! ⇒ Alle Kanten sind...
Sortiere Knoten nach absteigenden *f*-Zeiten.

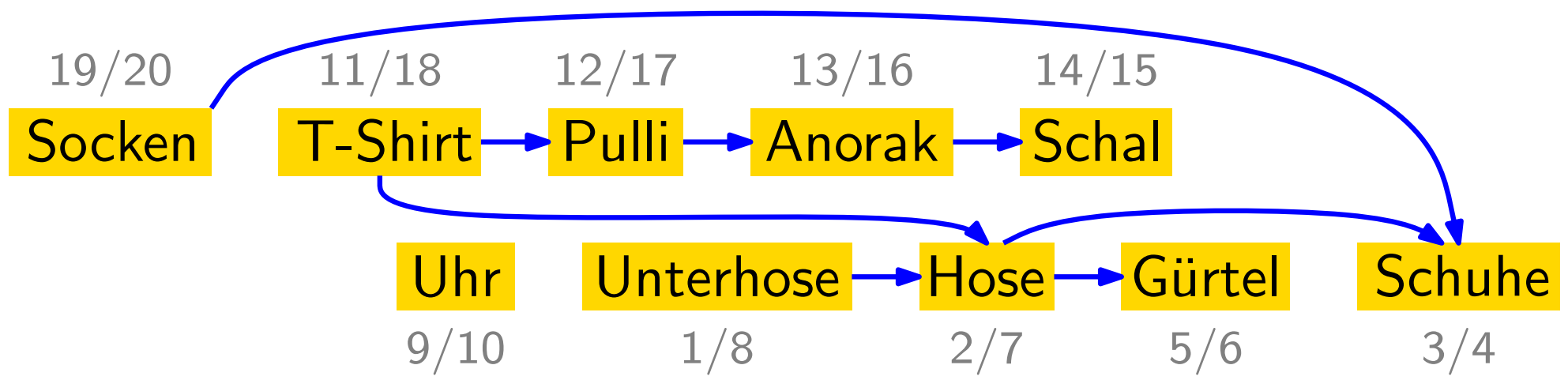


Ablaufplanung

Kante bedeutet:
Unterhose *vor*
Hose anziehen!



Idee: Nutze Tiefensuche! \Rightarrow Alle Kanten sind nach rechts gerichtet. Sortiere Knoten nach absteigenden f -Zeiten.



Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

```
TopologicalSort(DirectedGraph  $G$ )
```

```
   $L = \mathbf{new}$  List()
```

```
  DFS( $G$ ) mit folgender Änderung:
```

```
    Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,  
    häng ihn vorne an die Liste  $L$  an.
```

```
  return  $L$ 
```

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

```
TopologicalSort(DirectedGraph G)
```

```
  L = new List()
```

```
  DFS(G) mit folgender Änderung:
```

```
    Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,  
    häng ihn vorne an die Liste L an.
```

```
  return L
```

Laufzeit?

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

Laufzeit?

$O(V + E)$

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

Laufzeit?

$O(V + E)$

Korrekt?

Wann funktioniert's?

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

Laufzeit?

$O(V + E)$

Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.

Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

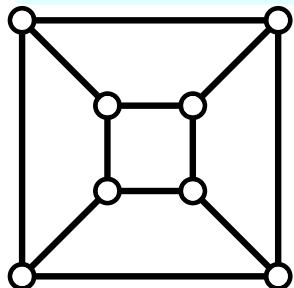
Laufzeit?

$O(V + E)$

Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.



Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

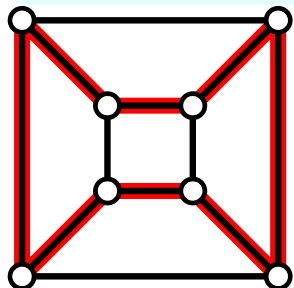
Laufzeit?

$O(V + E)$

Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.



Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

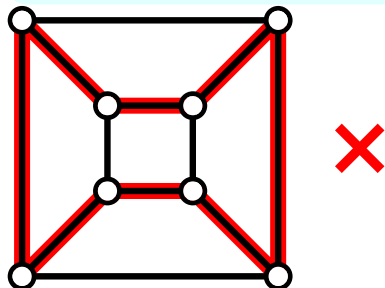
Laufzeit?

$O(V + E)$

Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.



Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

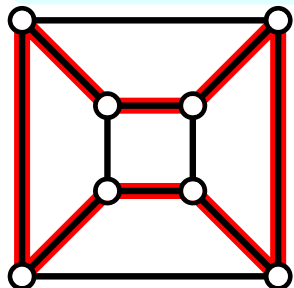
Laufzeit?

$O(V + E)$

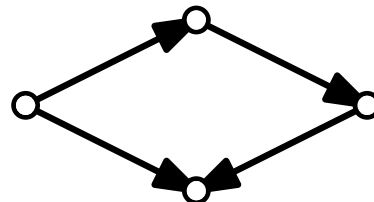
Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.



×



Topologisch sortieren

Topologische Sortierung: Lineare Ordnung der Knoten, so dass aus $(u, v) \in E$ folgt: u kommt vor v .

TopologicalSort(DirectedGraph G)

$L = \mathbf{new}$ List()

DFS(G) mit folgender Änderung:

Wenn ein Knoten schwarz gefärbt wird,
häng ihn *vorne* an die Liste L an.

return L

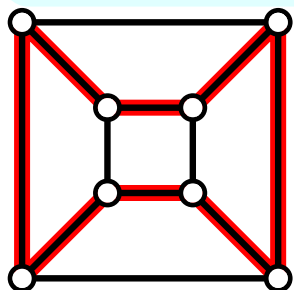
Laufzeit?

$O(V + E)$

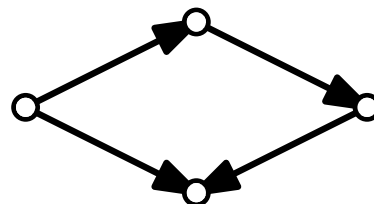
Korrekt?

Wann funktioniert's?

Def. Ein (gerichteter) Graph ist *kreisfrei*, wenn er keinen (gerichteten) Kreis enthält.



✗



✓

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem.

Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

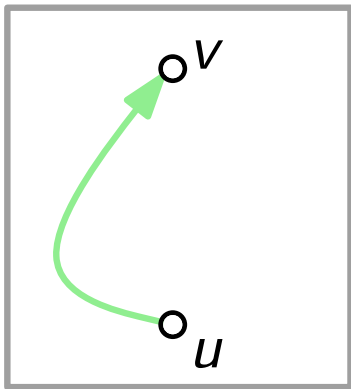
Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



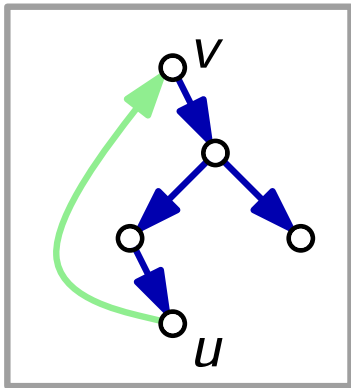
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



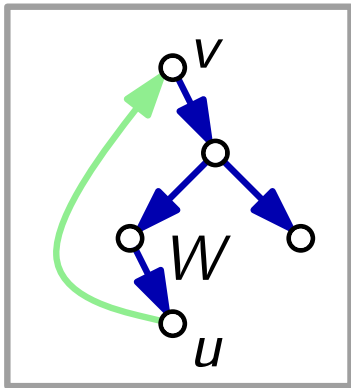
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



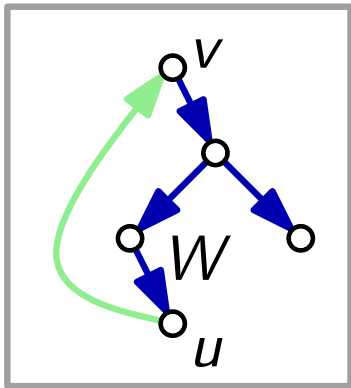
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



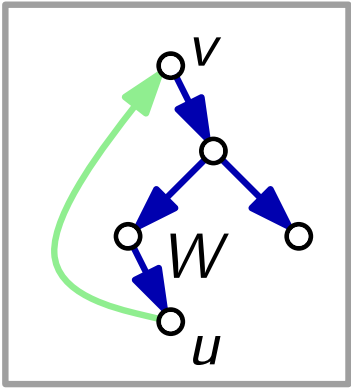
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis.


„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



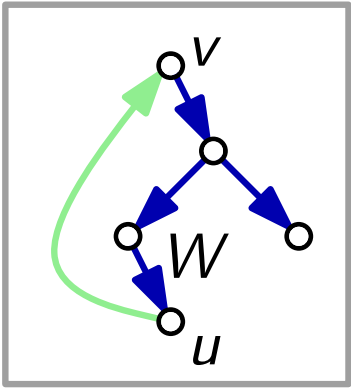
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. 

„ \Leftarrow “

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



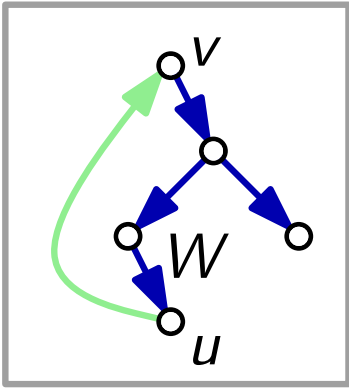
Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

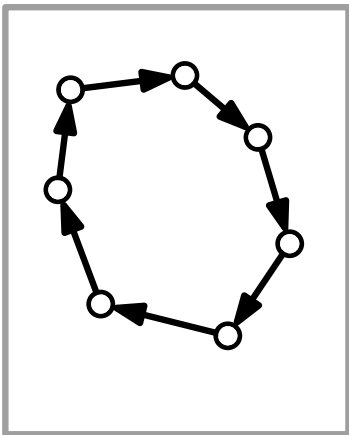
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

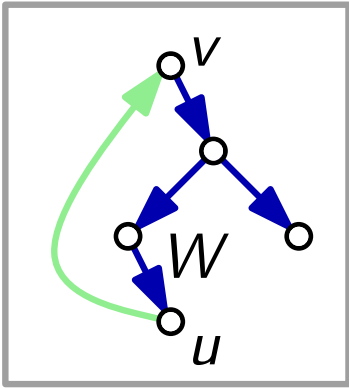


Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

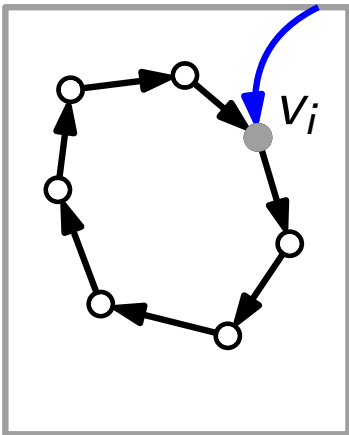
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

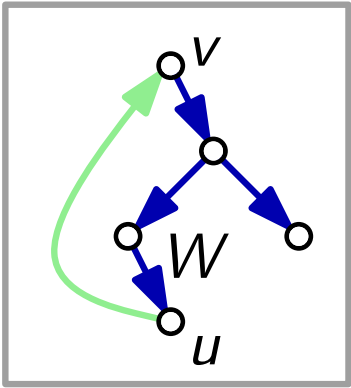


Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
 Sei v_i der 1. Knoten in C , den DFS(G) erreicht.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

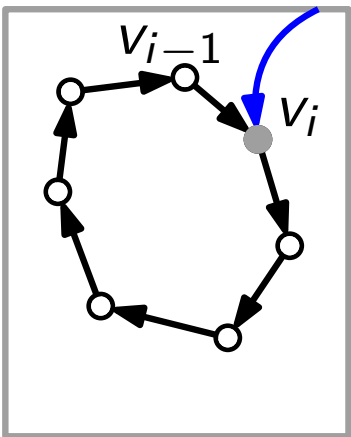
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

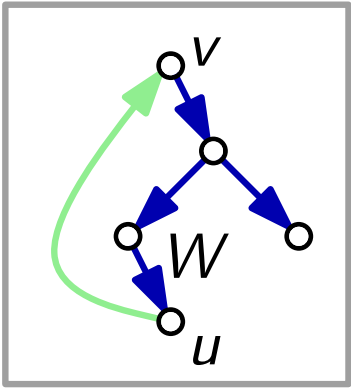


Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
 Sei v_i der 1. Knoten in C , den DFS(G) erreicht.
 Es gibt einen Weg von v_i nach v_{i-1} in G .

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

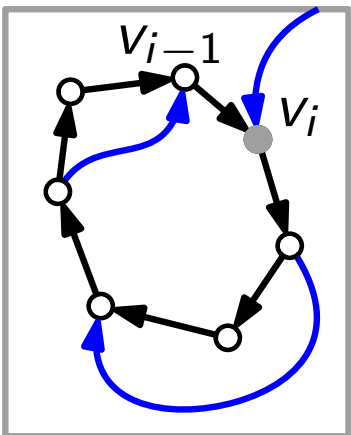
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

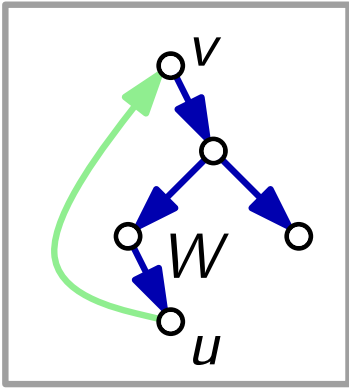



Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
 Sei v_i der 1. Knoten in C , den DFS(G) erreicht.
 Es gibt einen Weg von v_i nach v_{i-1} in G .
 \Rightarrow DFS gelangt zu v_{i-1} , solange v_i grau ist.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

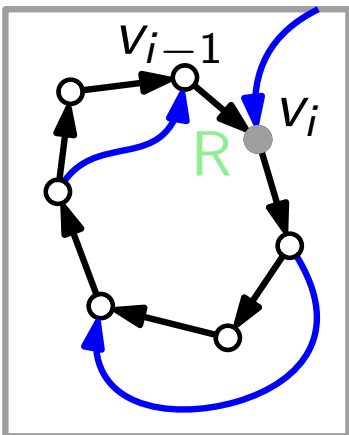
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. 

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.

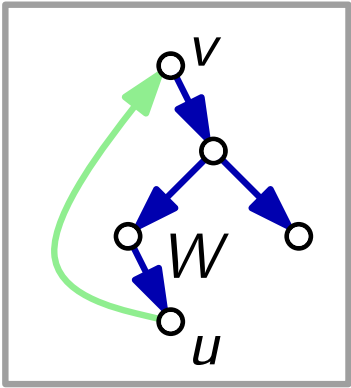


Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
 Sei v_i der 1. Knoten in C , den DFS(G) erreicht.
 Es gibt einen Weg von v_i nach v_{i-1} in G .
 \Rightarrow DFS gelangt zu v_{i-1} , solange v_i grau ist.
 $\Rightarrow (v_{i-1}, v_i)$ ist R-Kante.

Kreisfrei \Leftrightarrow keine R-Kanten

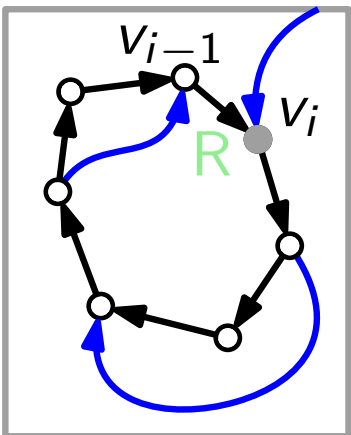
Lem. Ein gerichteter Graph G ist kreisfrei
 \Leftrightarrow DFS(G) liefert keine Rückwärtskanten.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei G kreisfrei.



Angenommen DFS(G) liefert R-Kante (u, v) .
 Dann ist u Nachfolger von v im DFS-Wald.
 D.h. G enthält einen gerichteten v - u -Weg W .
 Aber dann ist $W \oplus (u, v)$ ein gerichteter Kreis. ⚡

„ \Leftarrow “ DFS(G) liefere keine R-Kanten.



Ang. G enthält trotzdem Kreis $C = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
 Sei v_i der 1. Knoten in C , den DFS(G) erreicht.
 Es gibt einen Weg von v_i nach v_{i-1} in G .
 \Rightarrow DFS gelangt zu v_{i-1} , solange v_i grau ist.
 $\Rightarrow (v_{i-1}, v_i)$ ist R-Kante. ⚡ □

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.
Dann gilt $v_1.f \quad \dots \quad v_n.f$.

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.
Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G .

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen:

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau



– v weiß



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau \Rightarrow



– v weiß



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



– v weiß



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .


Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante 



– v weiß



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

\Rightarrow



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

$\Rightarrow v$ Nachfolger von u



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

$\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow$



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante  Widerspruch zu Lemma: G kreisfrei!



– v weiß $\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

$\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante



Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

$\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz

\Rightarrow

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau

$\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante

⚡ Widerspruch zu
Lemma: G kreisfrei!



– v weiß

$\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz

$\Rightarrow u.f$ noch nicht gesetzt, $v.f$ gesetzt

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante  Widerspruch zu Lemma: G kreisfrei!



– v weiß $\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz $\Rightarrow u.f$ noch nicht gesetzt, $v.f$ gesetzt

\Rightarrow

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante  Widerspruch zu Lemma: G kreisfrei!



– v weiß $\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz $\Rightarrow u.f$ noch nicht gesetzt, $v.f$ gesetzt
 $\Rightarrow v.f < u.f$

Korrektheit von TopologicalSort

Satz. Sei G ein gerichteter kreisfreier Graph. Dann liefert $\text{TopologicalSort}(G)$ eine topologische Sortierung von G .

Beweis. Sei $L = \langle v_n, v_{n-1}, \dots, v_1 \rangle = \text{TopologicalSort}(G)$.

Dann gilt $v_1.f < v_2.f < \dots < v_n.f$.

Sei (u, v) Kante von G . Zu zeigen: $v.f < u.f$

Welche Farbe hat v , wenn DFS (u, v) überschreitet?



– v grau $\Rightarrow (u, v)$ ist R-Kante  Widerspruch zu Lemma: G kreisfrei!



– v weiß $\Rightarrow v$ Nachfolger von $u \Rightarrow v.f < u.f$ ✓



– v schwarz $\Rightarrow u.f$ noch nicht gesetzt, $v.f$ gesetzt
 $\Rightarrow v.f < u.f$ ✓

□

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

Ergebnis

Datenstruktur

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$$O(V + E)$$

Ergebnis

Datenstruktur

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

Datenstruktur

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

Datenstruktur

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

d - und f -Werte,
z.B. für top. Sortierung

Datenstruktur

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

d - und f -Werte,
z.B. für top. Sortierung

Datenstruktur

Schlange

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

d - und f -Werte,
z.B. für top. Sortierung

Datenstruktur

Schlange

Rekursion bzw. Stapel

Vorgehen

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

d - und f -Werte,
z.B. für top. Sortierung

Datenstruktur

Schlange

Rekursion bzw. Stapel

Vorgehen

nicht-lokal

Vergleich Durchlaufstrategien für Graphen

Breitensuche

Tiefensuche

Laufzeit

$O(V + E)$

$O(V + E)$

Ergebnis

BFS-Baum,
d.h. kürzeste Wege

d - und f -Werte,
z.B. für top. Sortierung

Datenstruktur

Schlange

Rekursion bzw. Stapel

Vorgehen

nicht-lokal

lokal