

# ALGORITHMEN UND DATENSTRUKTUREN

## ÜBUNG 9: SUCHEN & ERSETZEN

---

Eric Kunze

`eric.kunze@mailbox.tu-dresden.de`

TU Dresden, 08.01.2021

# KMP-Algorithmus

## *Aufgabe 1*

---

- ▶ Mustersuche in (großen) Texten
- ▶ Ziel: Verschiebung des Musters um mehr als eine Position bei Nichtübereinstimmung.
- ▶ Methode: Ermittlung einer Verschiebetabelle `Tab[]` in **Phase 1**
- ▶ Bedeutung des Eintrags `Tab[i]=j`:  
*Bei Nichtübereinstimmung an Stelle i wird Position j des Musters an aktueller Vergleichsstelle angelegt.*
- ▶ Suchprozess in **Phase 2**

**j-algo:** <http://j-algo.binaervarianz.de/>

# KMP-ALGORITHMUS

Suche das Muster aaabaaaa im Text aaabaaabaaacaaabaaaa.

Position	0	1	2	3	4	5	6	7
Pattern	a	a	a	b	a	a	a	a
Tabelle	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1	3

---

Erster Versuch:

```
  a a b a a a b a a c a a b a a a
    a a b a a a a
```

Tabelleneintrag an Position 7 ist 3, d.h.  $\text{Tab}[7]=3$  — Lege Position 3 des Musters an aktueller Vergleichsposition an:

```
  a a b a a a b a a a c a a b a a a
    a a b a a a a
```

Gleicher Prozess noch einmal: Mismatch an Position 7 des Musters — verschiebe Muster auf Position 3.

# KMP-ALGORITHMUS (FORTSETZUNG)

Suche das Muster aaabaaaa im Text aaabaaabaaacaaabaaaa.

Position	0	1	2	3	4	5	6	7
Pattern	a	a	a	b	a	a	a	a
Tabelle	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1	3

---

Wir legen das Muster also wieder an Position 3 an:

```

a a a b a a b a a a c a a a b a a a a
                a a a b a a a a
```

Wegen  $\text{Tab}[3]=2$ , lege Muster an Position 2 an:

```

a a a b a a b a a a c a a a b a a a a
                a a a b a a a a
```

Wegen  $\text{Tab}[2]=-1$ , lege Muster an Position -1 an:

```

a a a b a a b a a a c a a a b a a a a
                a a a b a a a a ☺
```

Zwei Phasen:

Zwei Phasen:

- ▶ **1. Phase:** Markieren der längsten Teilwörter im Pattern, die mit einem Präfix übereinstimmen
  - ▷ ein Zyklus beginnt an einer Patternposition  $i$  falls  $i \neq 0$  und  $\text{Pat}[0] = \text{Pat}[i]$
  - ▷ ein Zyklus endet an der kleinsten Patternposition  $i+m$ , sodass  $\text{Pat}[m+1] \neq \text{Pat}[i+m+1]$

Zwei Phasen:

- ▶ **1. Phase:** Markieren der längsten Teilwörter im Pattern, die mit einem Präfix übereinstimmen
  - ▷ ein Zyklus beginnt an einer Patternposition  $i$  falls  $i \neq 0$  und  $\text{Pat}[0] = \text{Pat}[i]$
  - ▷ ein Zyklus endet an der kleinsten Patternposition  $i+m$ , sodass  $\text{Pat}[m+1] \neq \text{Pat}[i+m+1]$
- ▶ **2. Phase:** Bestimmung der Tabelleneinträge
  - ▷  $\text{Tab}[0] = -1$
  - ▷ Tabelleneinträge nach einem Zyklus:  
*Länge des längsten dort endenden Zyklus*
  - ▷ Tabelleneinträgen in einem Zyklus:  
*Tabelleneintrag der derzeitigen Position im längsten laufenden Zyklus*
  - ▷ verbleibende Einträge: 0



## AUFGABE 1

- (a) Geben Sie zu dem Pattern aabaaacaab die mit Hilfe des KMP-Algorithmus (Knuth-Morris-Pratt) berechnete Verschiebetabelle an.
- (b) Mit Hilfe des KMP-Algorithmus ist die unten stehende Verschiebetabelle berechnet worden: Vervollständigen Sie das aus den Symbolen a, b und c bestehende Pattern.

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	c	b				a
Tabelle	-1	0	-1	1	0	2

## AUFGABE 1 — ZYKLENMETHODE

**Teil (a)**

Pattern: aabaaacaab

Position	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pattern	a	a	b	a	a	a	c	a	a	b
Tabelle										

## Teil (a)

Pattern: aabaaacaab

Position	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pattern	a	a	b	a	a	a	c	a	a	b
Tabelle	-1	-1	1	-1	-1	2	2	-1	-1	1

Die Methode beruht auf der Gleichung

$$\text{Tab}[i] = \max \{-1\} \cup \left\{ m \left| \begin{array}{l} 0 \leq m \leq i-1 \\ b_0 \dots b_{m-i} = b_{i-m} \dots b_{i-1} \\ b_m \neq b_j \end{array} \right. \right\} \quad (*)$$

Daraus ergibt sich nach Initialisierung von  $\text{Tab}[0] = -1$  für jeden folgenden Eintrag  $\text{Tab}[i]$  folgendes Verfahren:

- ▶ *linker Finger*: wähle  $m < i$  in absteigender Reihenfolge (also  $i-1, i-2, \dots$ ), sodass  $\text{Pat}[i] \neq \text{Pat}[m]$
- ▶ *Parallelverschiebung beider Finger bis zum linken Rand*: wenn  $\text{Pat}[0 \dots m-1] = \text{Pat}[i-m \dots i-1]$ , dann fülle  $\text{Tab}[i] = m$ .
- ▶ wenn keine passende Position  $m$  gefunden werden kann, dann fülle  $\text{Tab}[i] = -1$ .

## AUFGABE 1 — ZWEI-FINGER-METHODE

**Teil (a)**

Pattern: aabaaacaab

Position	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pattern	a	a	b	a	a	a	c	a	a	b
Tabelle										

## Teil (a)

Pattern: aabaaacaab

Position	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pattern	a	a	b	a	a	a	c	a	a	b
Tabelle	-1	-1	1	-1	-1	2	2	-1	-1	1

## AUFGABE 1 — TEIL (B)

### Teil (b)

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	c	b				a
Tabelle	-1	0	-1	1	0	2

## Teil (b)

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	c	b	c	c	b	a
Tabelle	-1	0	-1	1	0	2

- ▶  $\text{Pat}[0 \dots 1] = \text{Pat}[3 \dots 4]$  wegen  $\text{Tab}[5] = 2$  (Zyklusmethode), d.h.  
 $\text{Pat}[3] = \text{Pat}[0] = c$  und  $\text{Pat}[4] = \text{Pat}[1] = b$
- ▶ wegen  $\text{Tab}[3] = 1$  ist  $\text{Pat}[2] = \text{Pat}[0] = c$  (Zyklusmethode)
- ▶ **oder:** wegen  $\text{Tab}[3] = 1$  ist  $\text{Pat}[1] \neq \text{Pat}[3]$  und  
 $\text{Pat}[2] = \text{Pat}[0] = c$  (Parallelverschiebung in der  
Zwei-Finger-Methode bzw. Gleichung (\*))



# Levenshtein-Distanz

## *Aufgabe 2*

---

# LEVENSHTEIN-DISTANZ

**Kosten** zur Überführung eines Wortes  $w = w_1 \dots w_n$  in ein Wort  $v = v_1 \dots v_k$  ; schreibe  $d(w_1 \dots w_j, v_1 \dots v_i) = d(j, i)$ .

# LEVENSHTEIN-DISTANZ

**Kosten** zur Überführung eines Wortes  $w = w_1 \dots w_n$  in ein Wort  $v = v_1 \dots v_k$ ; schreibe  $d(w_1 \dots w_j, v_1 \dots v_i) = d(j, i)$ .

$$d(0, i) = i$$

$$d(j, 0) = j$$

$$d(j, i) = \min \{ d(j, i-1) + 1, d(j-1, i) + 1, d(j-1, i-1) + \delta_{j,i} \}$$

für alle  $1 \leq j \leq n$  und alle  $1 \leq i \leq k$  wobei

$$\delta_{j,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } w_j \neq v_i \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

# LEVENSHTEIN-DISTANZ

**Kosten** zur Überführung eines Wortes  $w = w_1 \dots w_n$  in ein Wort  $v = v_1 \dots v_k$ ; schreibe  $d(w_1 \dots w_j, v_1 \dots v_i) = d(j, i)$ .

$$d(0, i) = i$$

$$d(j, 0) = j$$

$$d(j, i) = \min \{ d(j, i-1) + 1, d(j-1, i) + 1, d(j-1, i-1) + \delta_{j,i} \}$$

für alle  $1 \leq j \leq n$  und alle  $1 \leq i \leq k$  wobei

$$\delta_{j,i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } w_j \neq v_i \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

**Anschaulich:** Überlagerung durch Pattern  $\rightarrow$  Pfeile zeigen "Ursprung" des Minimums an

$w_j \neq v_i :$

+1	+1
+1	?

$w_j = v_i :$

+0	+1
+1	?

## AUFGABE 2

Gegeben seien die Wörter  $w = \text{espen}$  und  $v = \text{beispiele}$ .

- (a) Berechnen Sie die Levenshtein-Distanz  $d(w, v)$ . Geben Sie dazu die Berechnungsmatrix an. Tragen Sie alle Zelleneinträge zusammen mit den dazugehörigen Pfeilen ein.
- (b) Geben Sie die Levenshtein-Distanz  $d(\text{espe}, \text{beispiel})$  an. Beachten Sie, dass  $\text{espe}$  und  $\text{beispiel}$  Präfixe von  $\text{espen}$  bzw.  $\text{beispiele}$  sind.
- (c) Geben Sie zwei Alignments zwischen  $\text{espen}$  und  $\text{beispiele}$  an, die zu den minimalen Kosten führen. Dabei sollen die Alignments die jeweils angewendeten Editieroperation enthalten.
- (d) Wieviele Alignments enthält die in Aufgabe (a) angegebene Berechnungsmatrix?

## AUFGABE 2

### Teil (a)

$d(j, i)$	b	e	i	s	p	i	e	l	e
e									
s									
p									
e									
n									

Teil (a)  $d(\text{espen, beispiele}) = 5$

$d(j, i)$		<b>b</b>	<b>e</b>	<b>i</b>	<b>s</b>	<b>p</b>	<b>i</b>	<b>e</b>	<b>l</b>	<b>e</b>
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7	→ 8	→ 9
<b>e</b>	1	↘	↘				↘		↘	
	1	1	1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7	→ 8
<b>s</b>	2	↓	↓	↓	↓	2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6
	2	↘	↘	↘	↘	↘				
<b>p</b>	3	↓	↓	↓	↓	3	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5
	3	↘	↘	↘	↘	↘	↘			
<b>e</b>	4	↓	↓	↓	↓	4	↓	↓	3	→ 4
	4	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
<b>n</b>	5	↓	↓	↓	↓	4	↓	↓	4	→ 5
	5	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘

**Teil (a)**  $d(\text{espen, beispiele}) = 5$

$d(j, i)$		<b>b</b>	<b>e</b>	<b>i</b>	<b>s</b>	<b>p</b>	<b>i</b>	<b>e</b>	<b>l</b>	<b>e</b>
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7	→ 8	→ 9
<b>e</b>	1	↓ ↘	↓ ↘	1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	↓ ↘	↓ ↘
<b>s</b>	2	↓ ↘	↓ ↘	2	↓ ↘	2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6
<b>p</b>	3	↓ ↘	↓ ↘	3	↓ ↘	3	↓ ↘	2	→ 3	→ 4
<b>e</b>	4	↓ ↘	↓ ↘	4	↓ ↘	4	↓ ↘	3	→ 4	→ 5
<b>n</b>	5	↓ ↘	↓ ↘	5	↓ ↘	5	↓ ↘	4	↓ ↘	4

**Teil (b)**  $d(\text{espe, beispiel}) = 4$



## AUFGABE 2

**Teil (c)**      Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz:

**Teil (d)**

**Teil (c)** Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz:

*	e	*	s	p	*	e	*	n
b	e	i	s	p	i	e	l	e
i		i			i		i	s

*	e	*	s	p	*	e	n	*
b	e	i	s	p	i	e	l	e
i		i			i		s	i

**Teil (d)** 2 Alignments = 2 Backtraces

# **Weitere Aufgaben aus der Aufgabensammlung *mit Lösungen***

---

## AUFGABE 7.1.13 (AGS)

- (a) Bestimmen Sie die mit Hilfe des KMP-Algorithmus berechnete Verschiebetabelle für das Pattern `abbabbaa`.
- (b) Mit Hilfe des KMP-Algorithmus ist unten stehende Verschiebetabelle berechnet worden. Die mit einem „?“ markierten Einträge sind unbekannt. Vervollständigen Sie das aus den Symbolen `a`, `b` und `c` bestehende Pattern.

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	<i>b</i>					<i>c</i>
Tabelle	-1	?	?	0	?	3

## AUFGABE 7.1.13 (AGS)

### Teil (a)

Pattern: abbabbaa

Position	0	1	2	3	4	5	6	7
Pattern	a	b	b	a	b	b	a	a
Tabelle								

## Teil (a) Pattern: abbabbaa

Position	0	1	2	3	4	5	6	7
Pattern	a	b	b	a	b	b	a	a
Tabelle	-1	0	0	-1	0	0	-1	4

## Teil (b)

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	b					c
Tabelle	-1	?	?	0	?	3

## Teil (a) Pattern: abbabbaa

Position	0	1	2	3	4	5	6	7
Pattern	a	b	b	a	b	b	a	a
Tabelle	-1	0	0	-1	0	0	-1	4

## Teil (b)

Position	0	1	2	3	4	5
Pattern	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Tabelle	-1	?	?	0	?	3

- ▶  $\text{Pat}[0 \dots 2] = \text{Pat}[2 \dots 4]$  wegen  $\text{Tab}[5] = 3$  (Zyklusmethode), d.h.  $\text{Pat}[2] = \text{Pat}[0] = \text{Pat}[4] = b$
- ▶ wegen  $\text{Tab}[3] = 0$  ist  $\text{Pat}[3] \neq \text{Pat}[0] = b$  und wegen  $\text{Tab}[5] = 3$  ist  $\text{Pat}[3] \neq \text{Pat}[5] = c$  (Zwei-Finger-Methode bzw. Gleichung (\*))  
 $\Rightarrow \text{Pat}[3] = \text{Pat}[1] = a$

## AUFGABE 7.2.1 (AGS)

Gegeben seien die Wörter  $w = \text{Dinstas}$  und  $v = \text{Distanz}$ .

- (a) Berechnen Sie die Levenshtein-Distanz  $d(w, v)$  zwischen  $w$  und  $v$ . Geben Sie die Berechnungsmatrix vollständig an.
- (b) Geben Sie alle Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen  $w$  und  $v$  an.



## AUFGABE 7.2.1 (AGS)

$d(j, i)$	D	i	s	t	a	n	z
D							
i							
n							
s							
t							
a							
s							

$d(j, i)$		D	i	s	t	a	n	z
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>D</b>	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5
<b>i</b>	↓ 2	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>n</b>	↓ 3	↓ 2	↓ 1		1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>s</b>	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2	→ 3	→ 4
<b>t</b>	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2	→ 3
<b>a</b>	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2
<b>s</b>	↓ 7	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 2	

$$d(\text{Dinstas}, \text{Distanz}) = 3$$

$d(j, i)$		D	i	s	t	a	n	z
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>D</b>	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5
<b>i</b>	↓ 2	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>n</b>	↓ 3	↓ 2	↓ 1	↓ 1	→ 2	→ 3	3	→ 4
<b>s</b>	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1	→ 2	→ 3	→ 4	4
<b>t</b>	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>a</b>	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	1	→ 2	→ 3
<b>s</b>	↓ 7	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	2	→ 3

$$d(\text{Dinstas}, \text{Distanz}) = 3$$

$d(j, i)$		D	i	s	t	a	n	z
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>D</b>	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5
<b>i</b>	↓ 2	↓ 1		0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>n</b>	↓ 3	↓ 2	↓ 1		1	→ 2	→ 3	→ 4
<b>s</b>	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2	→ 3	→ 4
<b>t</b>	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2	→ 3
<b>a</b>	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 1		2
<b>s</b>	↓ 7	↓ 6	↓ 5	↓ 4	↓ 3	↓ 2	↓ 2	↓ 3

$$d(\text{Dinstas}, \text{Distanz}) = 3$$

## AUFGABE 7.2.1 (AGS)

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz:

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz:

D	i	n	s	t	a	*	s
D	i	*	s	t	a	n	z
		<i>d</i>				<i>i</i>	<i>s</i>

D	i	n	s	t	a	s	*
D	i	*	s	t	a	n	z
		<i>d</i>				<i>s</i>	<i>i</i>

## AUFGABE 7.2.2 (AGS)

- (a) Berechnen Sie die Levenshtein-Distanz  $d(\text{bürste}, \text{schürze})$ . Geben Sie die Berechnungsmatrix vollständig an. Wieviele Backtraces enthält die Berechnungsmatrix?
- (b) Geben Sie zwei Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen den Wörtern `bürst` und `sch an`.

## AUFGABE 7.2.2 (AGS) — TEIL (A)

$d(j, i)$	s	c	h	ü	r	z	e
b							
ü							
r							
s							
t							
e							



$d(j, i)$		s	c	h	ü	r	z	e
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>b</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	1	1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>ü</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	2	2	2	→ 3	3	→ 4	→ 5	→ 6
<b>r</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	3	3	3	3	→ 4	3	→ 4	→ 5
<b>s</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	4	3	→ 4	4	4	4	4	→ 5
<b>t</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	5	4	4	→ 5	5	5	5	5
<b>e</b>	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘	↓ ↘
	6	5	5	5	→ 6	6	6	5

$$d(\text{bürste}, \text{schürze}) = 5$$

$d(j, i)$		s	c	h	ü	r	z	e
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>b</b>	1	↓ ↘ 1	↓ ↘ 2	↓ ↘ 3	↓ ↘ 4	↓ ↘ 5	↓ ↘ 6	↓ ↘ 7
<b>ü</b>	2	↓ ↘ 2	↓ ↘ 2	↓ ↘ 3	↓ ↘ 3	↓ ↘ 4	↓ ↘ 5	↓ ↘ 6
<b>r</b>	3	↓ ↘ 3	↓ ↘ 3	↓ ↘ 3	↓ ↘ 4	↓ ↘ 3	↓ ↘ 4	↓ ↘ 5
<b>s</b>	4	↓ ↘ 3	↓ ↘ 4	↓ ↘ 4	↓ ↘ 4	↓ ↘ 4	↓ ↘ 4	↓ ↘ 5
<b>t</b>	5	↓ ↘ 4	↓ ↘ 4	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5
<b>e</b>	6	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5	↓ ↘ 5	↓ ↘ 6	↓ ↘ 6	↓ ↘ 6	↓ ↘ 5

$$d(\text{bürste}, \text{schürze}) = 5$$

$d(j, i)$		s	c	h	ü	r	z	e
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>b</b>	↓ 1	↓ 1	↓ 2	↓ 3	↓ 4	↓ 5	↓ 6	↓ 7
<b>ü</b>	↓ 2	↓ 2	↓ 2	↓ 3	↓ 3	↓ 4	↓ 5	↓ 6
<b>r</b>	↓ 3	↓ 3	↓ 3	↓ 3	↓ 4	↓ 3	↓ 4	↓ 5
<b>s</b>	↓ 4	↓ 3	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 5
<b>t</b>	↓ 5	↓ 4	↓ 4	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 5
<b>e</b>	↓ 6	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 6	↓ 6	↓ 6	↓ 5

$$d(\text{bürste}, \text{schürze}) = 5$$

$d(j, i)$		s	c	h	ü	r	z	e
	0	→ 1	→ 2	→ 3	→ 4	→ 5	→ 6	→ 7
<b>b</b>	↓ 1	↓ 1	↓ 2	↓ 3	↓ 4	↓ 5	↓ 6	↓ 7
<b>ü</b>	↓ 2	↓ 2	↓ 2	↓ 3	↓ 3	↓ 4	↓ 5	↓ 6
<b>r</b>	↓ 3	↓ 3	↓ 3	↓ 3	↓ 4	↓ 3	↓ 4	↓ 5
<b>s</b>	↓ 4	↓ 3	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 4	↓ 5
<b>t</b>	↓ 5	↓ 4	↓ 4	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 5
<b>e</b>	↓ 6	↓ 5	↓ 5	↓ 5	↓ 6	↓ 6	↓ 6	↓ 5

$$d(\text{bürste}, \text{schürze}) = 5$$

$$\text{Anzahl der Backtraces} = 3 * 2 = 6$$

## AUFGABE 7.2.2 (AGS) — TEIL (B)

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen  
den Wörtern `bürst` und `sch`

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen den Wörtern *bürst* und *sch*

$d(j, i)$			<b>s</b>			<b>c</b>			<b>h</b>
	0	→	1	→	2	→	3		
	↓	↘		↘		↘			
<b>b</b>	1		1	→	2	→	3		
	↓	↘	↓	↘		↘			
	2		2		2	→	3		
<b>ü</b>	↓	↘	↓	↘	↓	↘			
<b>r</b>	3		3		3		3		
	↓	↘		↘	↓	↘	↓	↘	
	4		3	→	4		4		
<b>s</b>	↓		↓	↘		↘	↓	↘	
<b>t</b>	5		4		4	→	5		

## AUFGABE 7.2.2 (AGS) — TEIL (B)

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen  
den Wörtern `bürst` und `sch`

Alignments mit minimaler Levenshtein-Distanz zwischen den Wörtern *bürst* und *sch*

b	ü	r	s	t
s	c	h	*	*
<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>d</i>	<i>d</i>

b	ü	r	s	t
*	*	s	c	h
<i>d</i>	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>