

Vorlesungsskript  
Einführung in die  
Komplexitätstheorie

Wintersemester 2021/22

Prof. Dr. Johannes Köbler  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Lehrstuhl Komplexität und Kryptografie

*10. November 2021*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Rechenmodelle</b>	<b>3</b>
2.1	Deterministische Turingmaschinen . . . . .	3
2.2	Nichtdeterministische Berechnungen . . . . .	4
2.3	Zeitkomplexität . . . . .	5
2.4	Platzkomplexität . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Grundlegende Beziehungen</b>	<b>7</b>
3.1	Robustheit von Komplexitätsklassen . . . . .	7
3.2	Deterministische Simulationen von nichtdeterministischen Berechnungen . . . . .	9
3.3	Der Satz von Savitch . . . . .	10
3.4	Der Satz von Immerman und Szelepcsényi . . . . .	11

# 1 Einführung

In der Komplexitätstheorie werden algorithmische Probleme daraufhin untersucht, welche Rechenressourcen zu ihrer Lösung benötigt werden. Naturgemäß bestehen daher enge Querbezüge zu

- Algorithmen (obere Schranken)
- Automatentheorie (Rechenmodelle)
- Berechenbarkeit (Was ist überhaupt algorithmisch lösbar?)
- Logik (liefert viele algorithmische Probleme, mit ihrer Hilfe kann auch die Komplexität von Problemen charakterisiert werden)
- Kryptografie (Wieviel Rechenressourcen benötigt ein Gegner, um ein Kryptosystem zu brechen?)

Zur weiteren Motivation betrachten wir eine Reihe von konkreten algorithmischen Problemstellungen.

## Erreichbarkeitsproblem in Digraphen (Reach):

**Gegeben:** Ein gerichteter Graph  $G = (V, E)$  mit  $V = \{1, \dots, n\}$  und  $E \subseteq V \times V$ .

**Gefragt:** Gibt es in  $G$  einen Weg von Knoten 1 zu Knoten  $n$ ?

Zur Erinnerung: Eine Folge  $(v_1, \dots, v_k)$  von Knoten heißt **Weg** in  $G$ , falls für  $j = 1, \dots, k - 1$  gilt:  $(v_j, v_{j+1}) \in E$ .

Da als Antwort nur “ja” oder “nein” möglich ist, handelt es sich um ein **Entscheidungsproblem**. Ein solches lässt sich formal durch eine Sprache beschreiben, die alle positiven (mit “ja” zu beantwortenden) Problemeingaben enthält:

$$\text{REACH} = \{G \mid \text{in } G \text{ ex. ein Weg von } 1 \text{ nach } n\}.$$

Hierbei setzen wir eine Kodierung von Graphen durch Wörter über

einem geeigneten Alphabet  $\Sigma$  voraus. Wir können  $G$  beispielsweise durch eine Binärfolge der Länge  $n^2$  kodieren, die aus den  $n$  Zeilen der Adjazenzmatrix von  $G$  gebildet wird.

Wir entscheiden REACH durch einen Wegsuche-Algorithmus. Dieser markiert nach und nach alle Knoten, die vom Knoten 1 aus erreichbar sind. Hierzu speichert er jeden markierten Knoten solange in einer Menge  $S$  bis er sämtliche Nachbarknoten markiert hat. Genauer ist folgendem Algorithmus zu entnehmen:

### Algorithmus suche-Weg( $G$ )

---

```

1  input: Digraph  $G = (V, E)$  mit  $V = \{1, \dots, n\}$ 
2   $S := \{1\}$ 
3  markiere Knoten 1
4  repeat
5    wähle einen Knoten  $u \in S$ 
6     $S := S - \{u\}$ 
7    for all  $(u, v) \in E$  do
8      if  $v$  ist nicht markiert then
9        markiere  $v$ 
10        $S := S \cup \{v\}$ 
11  until  $S = \emptyset$ 
12  if  $n$  ist markiert then accept else reject

```

---

Es ist üblich, den Ressourcenverbrauch von Algorithmen (wie z.B. Rechenzeit oder Speicherplatz) in Abhängigkeit von der Größe der Problemeingabe zu messen. Falls die Eingabe aus einem Graphen besteht, kann beispielsweise die Anzahl  $n$  der Knoten (und/oder die Anzahl  $m$  der Kanten) als Bezugsgröße dienen. Der Ressourcenverbrauch hängt auch davon ab, wie wir die Eingabe kodieren. So führt die Repräsentation eines Graphen als Adjazenzliste oftmals zu effizienteren Lösungsverfahren.

### Komplexitätsbetrachtungen:

- REACH ist in Zeit  $O(n^2)$  entscheidbar.

## 1 Einführung

- REACH ist nichtdeterministisch in Platz  $O(\log n)$  entscheidbar (und daher deterministisch in Platz  $O(\log^2 n)$ ; Satz von Savitch).

Als nächstes betrachten wir das Problem, einen maximalen Fluss in einem Netzwerk zu bestimmen.

### Maximaler Fluß (MaxFlow):

**Gegeben:** Ein gerichteter Graph  $G = (V, E)$  mit  $V = \{1, \dots, n\}$ ,  $E \subseteq V \times V$  und einer Kapazitätsfunktion  $c : E \rightarrow \mathbb{N}$ .

**Gesucht:** Ein Fluss  $f : E \rightarrow \mathbb{N}$  von 1 nach  $n$  in  $G$ , d.h.

- $\forall e \in E : f(e) \leq c(e)$  und
- $\forall v \in V - \{1, n\} : \sum_{(v,u) \in E} f(v, u) = \sum_{(u,v) \in E} f(u, v)$ ,

mit max. Wert  $w(f) = \sum_{(1,u) \in E} f(1, u) - \sum_{(u,1) \in E} f(u, 1)$ .

Da hier nach einer Lösung (Fluss) mit optimalem Wert gesucht wird, handelt es sich um ein **Optimierungsproblem** (genauer: Maximierungsproblem). Im Gegensatz hierzu wird bei vielen Entscheidungsproblemen nach der Existenz einer Lösung (mit gewissen Eigenschaften) gefragt.

### Komplexitätsbetrachtungen:

- MAXFLOW ist in Zeit  $O(n^3)$  lösbar (Algorithmus von Dinitz).
- MAXFLOW ist in Platz  $O(n^2)$  lösbar.

Das folgende Problem scheint zwar auf den ersten Blick nur wenig mit dem Problem MAXFLOW gemein zu haben. In Wirklichkeit entpuppt es sich jedoch als ein Spezialfall von MAXFLOW.

### Perfektes Matching in bipartiten Graphen (Matching):

**Gegeben:** Ein bipartiter Graph  $G = (U, W, E)$  mit  $U \cap W = \emptyset$  und  $e \cap U \neq \emptyset \neq e \cap W$  für alle Kanten  $e \in E$ .

**Gefragt:** Besitzt  $G$  ein perfektes Matching?

Zur Erinnerung: Eine Kantenmenge  $M \subseteq E$  heißt **Matching**, falls für alle Kanten  $e, e' \in M$  mit  $e \neq e'$  gilt:  $e \cap e' = \emptyset$ . Gilt zudem  $\|M\| = n/2$ , so heißt  $M$  **perfekt** ( $n$  ist die Knotenzahl von  $G$ ).

### Komplexitätsbetrachtungen:

- MATCHING ist in Zeit  $O((n+m)\sqrt{n})$  entscheidbar (Algorithmus von Dinitz).
- MATCHING ist in Platz  $O(n^2)$  entscheidbar.

Die bisher betrachteten Probleme können in deterministischer Polynomialzeit gelöst werden und gelten daher als effizient lösbar. Zum Schluss dieses Abschnitts betrachten wir ein Problem, für das vermutlich nur ineffiziente Algorithmen existieren. Wie üblich bezeichnen wir die Gruppe aller Permutationen auf der Menge  $\{1, \dots, n\}$  mit  $S_n$ .

### Travelling Salesman Problem (TSP):

**Gegeben:** Eine symmetrische  $n \times n$ -Distanzmatrix  $D = (d_{ij})$  mit  $d_{ij} \in \mathbb{N}$ .

**Gesucht:** Eine kürzeste Rundreise, d.h. eine Permutation  $\pi \in S_n$  mit minimalem Wert  $w(\pi) = \sum_{i=1}^n d_{\pi(i), \pi(i+1)}$ , wobei wir  $\pi(n+1) = \pi(1)$  setzen.

### Komplexitätsbetrachtungen:

- TSP ist in Zeit  $O(n!)$  lösbar (Ausprobieren aller Rundreisen).
- TSP ist in Platz  $O(n)$  lösbar (mit demselben Algorithmus).
- Durch dynamisches Programmieren\* lässt sich TSP in Zeit  $O(n^2 2^n)$  lösen, der Platzverbrauch erhöht sich dabei jedoch auf  $O(n 2^n)$  (siehe Übungen).

\*Hierzu berechnen wir für alle Teilmengen  $S \subseteq \{2, \dots, n\}$  und alle  $j \in S$  die Länge  $l(S, j)$  eines kürzesten Pfades von 1 nach  $j$ , der alle Städte in  $S$  genau einmal besucht.

## 2 Rechenmodelle

### 2.1 Deterministische Turingmaschinen

**Definition 1** (Mehrband-Turingmaschine).

Eine **deterministische  $k$ -Band-Turingmaschine** ( **$k$ -DTM** oder einfach **DTM**) ist ein 5-Tupel  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$ . Dabei ist

- $Q$  eine endliche Menge von **Zuständen**,
- $\Sigma$  eine endliche Menge von Symbolen (das **Eingabealphabet**) mit  $\sqcup, \triangleright \notin \Sigma$  ( $\sqcup$  heißt **Blank** und  $\triangleright$  heißt **Anfangssymbol**,
- $\Gamma$  das **Arbeitsalphabet** mit  $\Sigma \cup \{\sqcup, \triangleright\} \subseteq \Gamma$ ,
- $\delta : Q \times \Gamma^k \rightarrow (Q \cup \{q_h, q_{ja}, q_{nein}\}) \times (\Gamma \times \{L, R, N\})^k$  die **Überföhrungsfunktion** ( $q_h$  heißt **Haltezustand**,  $q_{ja}$  **akzeptierender** und  $q_{nein}$  **verwerfender Endzustand**
- und  $q_0$  der **Startzustand**.

Befindet sich  $M$  im Zustand  $q \in Q$  und stehen die Schreib-Lese-Köpfe auf Feldern mit den Inschriften  $a_1, \dots, a_k$  ( $a_i$  auf Band  $i$ ), so geht  $M$  bei Ausführung der Anweisung  $\delta : (q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$  in den Zustand  $q'$  über, ersetzt auf Band  $i$  das Symbol  $a_i$  durch  $a'_i$  und bewegt den Kopf gemäß  $D_i$  (im Fall  $D_i = L$  um ein Feld nach links, im Fall  $D_i = R$  um ein Feld nach rechts und im Fall  $D_i = N$  wird der Kopf nicht bewegt).

Außerdem verlangen wir von  $\delta$ , dass für jede Anweisung  $(q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$  mit  $a_i = \triangleright$  die Bedingung  $a'_i = \triangleright$  und  $D_i = R$  erfüllt ist (d.h. das Anfangszeichen  $\triangleright$  darf nicht durch ein anderes Zeichen überschrieben werden und der Kopf muss nach dem Lesen von  $\triangleright$  immer nach rechts bewegt werden).

**Definition 2.** Eine **Konfiguration** ist ein  $(2k + 1)$ -Tupel  $K = (q, u_1, v_1, \dots, u_k, v_k) \in Q \times (\Gamma^* \times \Gamma^+)^k$  und besagt, dass

- $q$  der momentane Zustand und
- $u_i v_i \sqcup \sqcup \dots$  die Inschrift des  $i$ -ten Bandes ist, und dass
- sich der Kopf auf Band  $i$  auf dem ersten Zeichen von  $v_i$  befindet.

**Definition 3.** Eine Konfiguration  $K' = (q', u'_1, v'_1, \dots, u'_k, v'_k)$  heißt **Folgekonfiguration** von  $K = (q, u_1, a_1 v_1, \dots, u_k, a_k v_k)$  (kurz:  $K \xrightarrow{M} K'$ ), falls eine Anweisung  $(q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$  in  $\delta$  und  $b_1, \dots, b_k \in \Gamma$  existieren, so dass für  $i = 1, \dots, k$  jeweils eine der folgenden drei Bedingungen gilt:

1.  $D_i = N$ ,  $u'_i = u_i$  und  $v'_i = a'_i v_i$ ,
2.  $D_i = L$ ,  $u_i = u'_i b_i$  und  $v'_i = b_i a'_i v_i$ ,
3.  $D_i = R$ ,  $u'_i = u_i a'_i$  und  $v'_i = \begin{cases} \sqcup, & v_i = \varepsilon, \\ v_i, & \text{sonst,} \end{cases}$

Eine **Rechnung** von  $M$  bei Eingabe  $x$  ist eine Folge von Konfigurationen  $K_0, K_1, K_2, \dots$  mit  $K_0 = K_x$  und  $K_0 \vdash K_1 \xrightarrow{M} K_2 \dots$ .

Wir schreiben  $K \xrightarrow{M}^t K'$ , falls Konfigurationen  $K_0, \dots, K_t$  existieren mit  $K_0 = K$  und  $K_t = K'$ , sowie  $K_i \xrightarrow{M} K_{i+1}$  für  $i = 0, \dots, t - 1$ . Die reflexive, transitive Hülle von  $\xrightarrow{M}$  bezeichnen wir mit  $\xrightarrow{M}^*$ , d.h.  $K \xrightarrow{M}^* K'$  bedeutet, dass ein  $t \geq 0$  existiert mit  $K \xrightarrow{M}^t K'$ .

**Definition 4.** Sei  $x \in \Sigma^*$  eine Eingabe. Die zugehörige **Startkonfiguration** ist

$$K_x = (q_0, \varepsilon, \underbrace{\triangleright x, \varepsilon, \triangleright, \dots, \varepsilon, \triangleright}_{(k-1)\text{-mal}}).$$

**Definition 5.** Eine Konfiguration  $K = (q, u_1, v_1, \dots, u_k, v_k)$  mit  $q \in \{q_h, q_{ja}, q_{nein}\}$  heißt **Endkonfiguration**. Im Fall  $q = q_{ja}$  (bzw.  $q = q_{nein}$ ) heißt  $K$  **akzeptierende** (bzw. **verwerfende**) **Endkonfiguration**.

**Definition 6.**

Eine DTM  $M$  **hält** bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  (kurz:  $M(x)$  hält), falls es eine Endkonfiguration  $K = (q, u_1, v_1, \dots, u_k, v_k)$  gibt mit

$$K_x \xrightarrow[M]{*} K.$$

Weiter definieren wir das **Ergebnis**  $M(x)$  der Rechnung von  $M$  bei Eingabe  $x$ ,

$$M(x) = \begin{cases} \text{ja,} & M(x) \text{ hält im Zustand } q_{\text{ja}}, \\ \text{nein,} & M(x) \text{ hält im Zustand } q_{\text{nein}}, \\ y, & M(x) \text{ hält im Zustand } q_h, \\ \uparrow \text{ (undefiniert),} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dabei ergibt sich  $y$  aus  $u_k v_k$ , indem das erste Symbol  $\triangleright$  und sämtliche Blanks am Ende entfernt werden, d. h.  $u_k v_k = \triangleright y \sqcup^i$  für ein  $i \geq 0$ . Für  $M(x) = \text{ja}$  sagen wir auch „ $M(x)$  akzeptiert“ und für  $M(x) = \text{nein}$  „ $M(x)$  verwirft“.

**Definition 7.** Die von einer DTM  $M$  **akzeptierte Sprache** ist

$$L(M) = \{x \in \Sigma^* \mid M(x) \text{ akzeptiert}\}.$$

Eine DTM, die eine Sprache  $L$  akzeptiert, darf also bei Eingaben  $x \notin L$  unendlich lange rechnen. In diesem Fall heißt  $L$  **semi-entscheidbar** (oder **rekursiv aufzählbar**). Dagegen muss eine DTM, die eine Sprache  $L$  entscheidet, bei jeder Eingabe halten.

**Definition 8.** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$ . Eine DTM  $M$  **entscheidet**  $L$ , falls für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow M(x) \text{ hält und akzeptiert} \\ x \notin L &\Rightarrow M(x) \text{ hält und akzeptiert nicht.} \end{aligned}$$

In diesem Fall heißt  $L$  **entscheidbar** (oder **rekursiv**).

**Definition 9.** Sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  eine Funktion. Eine DTM  $M$  **berechnet**  $f$ , falls für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$M(x) = f(x).$$

$f$  heißt dann **berechenbar** (oder **rekursiv**).

Aus dem Grundstudium wissen wir, dass eine nichtleere Sprache  $L \subseteq \Sigma^*$  genau dann semi-entscheidbar ist, wenn eine berechenbare Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  existiert, deren Bild  $\text{range}(f) = \{f(x) \mid x \in \Sigma^*\}$  die Sprache  $L$  ist.

## 2.2 Nichtdeterministische Berechnungen

Anders als eine DTM, für die in jeder Konfiguration höchstens eine Anweisung ausführbar ist, hat eine nichtdeterministische Turingmaschine in jedem Rechenschritt die Wahl unter einer endlichen Anzahl von Anweisungen.

**Definition 10.** Eine **nichtdeterministische  $k$ -Band-Turingmaschine** (kurz  **$k$ -NTM** oder einfach **NTM**) ist ein 5-Tupel  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$ , wobei  $Q, \Sigma, \Gamma, q_0$  genau wie bei einer  $k$ -DTM definiert sind und

$$\delta : Q \times \Gamma^k \rightarrow \mathcal{P}(Q \cup \{q_h, q_{\text{ja}}, q_{\text{nein}}\} \times (\Gamma \times \{R, L, N\})^k)$$

die Eigenschaft hat, dass für  $(q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k) \in \delta(q, a_1, \dots, a_k)$  im Fall  $a_i = \triangleright$  immer  $a'_i = \triangleright$  und  $D_i = R$  gilt.

Die Begriffe **Konfiguration**, **Start-** und **Endkonfiguration** übertragen sich unmittelbar von DTMs auf NTMs. Der Begriff der **Folgekonfiguration** lässt sich übertragen, indem wir  $\delta(q, a_1, \dots, a_k) = (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$  durch  $(q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k) \in \delta(q, a_1, \dots, a_k)$  ersetzen. In beiden Fällen schreiben wir auch  $(q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$ .

Wir werden NTMs nur zum Erkennen von Sprachen (d.h. als Akzeptoren) und nicht zum Berechnen von Funktionen benutzen.

**Definition 11.** Sei  $M$  eine NTM.

- $M(x)$  **hält** (kurz  $M(x) \downarrow$ ), falls  $M(x)$  nur endlich lange Rechnungen ausführt. Andernfalls schreiben wir  $M(x) \uparrow$ .
- Eine Rechnung von  $M(x)$  heißt **akzeptierend** (bzw. **verwerfend**), falls sie  $K_x$  in eine akzeptierende (bzw. verwerfende) Endkonfiguration überführt.
- $M(x)$  **akzeptiert**, falls  $M(x)$  mindestens eine akzeptierende Rechnung ausführt.
- Die von  $M$  **akzeptierte Sprache** ist

$$L(M) = \{x \in \Sigma^* \mid M(x) \text{ akzeptiert}\}.$$

- $M$  **entscheidet**  $L(M)$ , falls  $M$  bei allen Eingaben hält.

## 2.3 Zeitkomplexität

Der Zeitverbrauch  $time_M(x)$  einer Turingmaschine  $M$  bei Eingabe  $x$  ist die maximale Anzahl von Rechenschritten, die  $M$  ausgehend von der Startkonfiguration  $K_x$  ausführen kann (bzw.  $\infty$ , falls unendlich lange Rechnungen existieren).

**Definition 12.**

- Sei  $M$  eine TM (d.h. eine DTM oder NTM) und sei  $x \in \Sigma^*$  eine Eingabe. Dann ist

$$time_M(x) = \max\{t \geq 0 \mid \exists K : K_x \rightarrow^t K\}$$

die **Rechenzeit** von  $M$  bei Eingabe  $x$ , wobei  $\max \mathbb{N} = \infty$  ist.

- Sei  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  eine monoton wachsende Funktion. Dann ist  $M$   **$t(n)$ -zeitbeschränkt**, falls für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$time_M(x) \leq t(|x|).$$

Alle Sprachen, die in (nicht-)deterministischer Zeit  $t(n)$  entscheidbar sind, fassen wir in den Komplexitätsklassen

$$DTIME(t(n)) = \{L(M) \mid M \text{ ist eine } t(n)\text{-zeitbeschränkte DTM}\}$$

bzw.

$$NTIME(t(n)) = \{L(M) \mid M \text{ ist eine } t(n)\text{-zeitbeschränkte NTM}\}$$

zusammen. Ferner sei

$$FTIME(t(n)) = \left\{ f \mid \begin{array}{l} f \text{ wird von einer } t(n)\text{-zeitbe-} \\ \text{schränkten DTM berechnet} \end{array} \right\}.$$

Für eine Klasse  $F$  von Funktionen  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  sei  $DTIME(F) = \bigcup_{t \in F} DTIME(t(n))$ .  $NTIME(F)$  und  $FTIME(F)$  sind analog definiert. Die Klasse aller polynomiell beschränkten Funktionen bezeichnen wir mit  $\text{poly}(n)$ . Die wichtigsten Zeitkomplexitätsklassen sind

$$\begin{aligned} LINTIME &= DTIME(\mathcal{O}(n)) = \bigcup_{c \geq 1} DTIME(cn + c) && \text{„Linearzeit“}, \\ P &= DTIME(\text{poly}(n)) = \bigcup_{c \geq 1} DTIME(n^c + c) && \text{„Polynomialzeit“}, \\ E &= DTIME(2^{\mathcal{O}(n)}) = \bigcup_{c \geq 1} DTIME(2^{cn+c}) && \text{„Lineare Exponentialzeit“}, \\ EXP &= DTIME(2^{\text{poly}(n)}) = \bigcup_{c \geq 1} DTIME(2^{n^c+c}) && \text{„Exponentialzeit“}. \end{aligned}$$

Die Klassen NP, NE, NEXP und FP, FE, FEXP sind analog definiert.

## 2.4 Platzkomplexität

Zur Definition von Platzkomplexitätsklassen verwenden wir so genannte Offline-Turingmaschinen und Transducer. Diese haben die Eigenschaft, dass sie das erste Band nur als Eingabeband (also nur zum Lesen) bzw. das  $k$ -te Band nur als Ausgabeband (also nur zum Schreiben) benutzen. Der Grund für diese Einschränkungen liegt darin, sinnvolle Definitionen für Komplexitätsklassen mit einem sublinearen Platzverbrauch zu erhalten.

**Definition 13.** Eine TM  $M$  heißt **Offline-TM**, falls für jede Anweisung  $(q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$  die Bedingung

$$a'_1 = a_1 \wedge [a_1 = \sqcup \Rightarrow D_1 = L]$$

gilt. Gilt weiterhin immer  $D_k \neq L$  und ist  $M$  eine DTM, so heißt  $M$  **Transducer**.

Dies bedeutet, dass eine Offline-TM nicht auf das Eingabeband schreiben darf (*read-only*). Beim Transducer dient das letzte Band als Ausgabeband, auch dieses kann nicht als Speicher benutzt werden (*write-only*).

Der Zeitverbrauch  $time_M(x)$  von Offline-TMs und von Transducern ist genauso definiert wie bei DTMs. Als nächstes definieren wir den Platzverbrauch einer TM als die Anzahl aller während der Rechnung besuchten Bandfelder.

**Definition 14.**

a) Sei  $M$  eine TM und sei  $x \in \Sigma^*$  eine Eingabe mit  $time_M(x) < \infty$ . Dann ist

$$space_M(x) = \max\{s \geq 1 \mid \exists K = (q, u_1, v_1, \dots, u_k, v_k) \\ \text{mit } K_x \rightarrow^* K \text{ und } s = \sum_{i=1}^k |u_i v_i|\}$$

der **Platzverbrauch** von  $M$  bei Eingabe  $x$ . Für eine Offline-TM ersetzen wir  $\sum_{i=1}^k |u_i v_i|$  durch  $\sum_{i=2}^k |u_i v_i|$  und für einen Transducer durch  $\sum_{i=2}^{k-1} |u_i v_i|$ . Man beachte, dass  $space_M(x)$  im Fall  $time_M(x) = \infty$  undefiniert ist.

b) Sei  $s : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  monoton wachsend. Dann ist  $M$   **$s(n)$ -platzbeschränkt**, falls für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$space_M(x) \leq s(|x|) \text{ und } time_M(x) < \infty.$$

Alle Sprachen, die in (nicht-) deterministischem Platz  $s(n)$  entscheidbar sind, fassen wir in den Komplexitätsklassen

$$DSPACE(s(n)) = \left\{ L(M) \mid \begin{array}{l} M \text{ ist eine } s(n)\text{-platzbe-} \\ \text{schränkte Offline-DTM} \end{array} \right\}$$

bzw.

$$NSPACE(s(n)) = \left\{ L(M) \mid \begin{array}{l} M \text{ ist eine } s(n)\text{-platzbe-} \\ \text{schränkte Offline-NTM} \end{array} \right\}$$

zusammen. Ferner sei

$$FSPACE(s(n)) = \left\{ f \mid \begin{array}{l} f \text{ wird von einem } s(n)\text{-platzbe-} \\ \text{schränkten Transducer berechnet} \end{array} \right\}.$$

Die wichtigsten Platzkomplexitätsklassen sind

$$\begin{aligned} L &= LOGSPACE = DSPACE(O(\log n)) \\ L^c &= DSPACE(O(\log^c n)) \\ LINSPACE &= DSPACE(O(n)) \\ PSPACE &= DSPACE(\text{poly}(n)) \\ ESPACE &= DSPACE(2^{\mathcal{O}(n)}) \\ EXPSPACE &= DSPACE(2^{\text{poly}(n)}) \end{aligned}$$

Die Klassen NL, NLINSPACE und NPSPACE, sowie FL, FLINSPACE und FPSPACE sind analog definiert, wobei NPSPACE mit PSPACE zusammenfällt (wie wir bald sehen werden).



### 3 Grundlegende Beziehungen

In diesem Kapitel leiten wir die wichtigsten Inklusionsbeziehungen zwischen deterministischen und nichtdeterministischen Platz- und Zeitkomplexitätsklassen her. Zuerst befassen wir uns jedoch mit Robustheitseigenschaften dieser Klassen.

#### 3.1 Robustheit von Komplexitätsklassen

Wir zeigen zuerst, dass platzbeschränkte TMs nur ein Arbeitsband benötigen.

**Lemma 15** (Bandreduktion).

*Zu jeder  $s(n)$ -platzbeschränkten Offline- $k$ -DTM  $M$  mit  $k \geq 3$  ex. eine  $s(n)$ -platzbeschränkte Offline-2-DTM  $M'$  mit  $L(M') = L(M)$ .*

*Beweis.* Sei  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  eine Offline- $k$ -DTM mit  $k \geq 3$ . Betrachte die Offline-2-DTM  $M' = (Q', \Sigma, \Gamma', \delta', q'_0)$  mit  $\Gamma' = \Sigma \cup \{\sqcup, \triangleright\} \cup (\Gamma \cup \hat{\Gamma})^{k-1}$ , wobei  $\hat{\Gamma}$  für jedes  $a \in \Gamma$  die markierte Variante  $\hat{a}$  enthält.  $M'$  hat dasselbe Eingabeband wie  $M$ , speichert aber die Inhalte von  $(k-1)$  übereinander liegenden Feldern der Arbeitsbänder von  $M$  auf einem Feld ihres Arbeitsbandes. Zur Speicherung der Kopfpositionen von  $M$  werden Markierungen benutzt.

**Initialisierung:** In den ersten beiden Rechenschritten erzeugt  $M'$  auf ihrem Arbeitsband (Band 2)  $k-1$  Spuren, die jeweils mit dem markierten Anfangszeichen  $\hat{\triangleright}$  initialisiert werden:

$$K_x = (q'_0, \varepsilon, \triangleright x, \varepsilon, \triangleright) \xrightarrow{M'} (q'_1, \triangleright, x, \triangleright, \sqcup) \xrightarrow{M'} (q'_2, \varepsilon, \triangleright x, \triangleright, \begin{pmatrix} \hat{\triangleright} \\ \vdots \\ \hat{\triangleright} \end{pmatrix})$$

**Simulation:**  $M'$  simuliert einen Rechenschritt von  $M$ , indem sie den Kopf auf dem Arbeitsband soweit nach rechts bewegt, bis sie alle  $(k-1)$  markierten Zeichen  $a_2, \dots, a_k$  gefunden hat. Diese speichert sie neben dem aktuellen Zustand  $q$  von  $M$  in ihrem Zustand. Während  $M'$  den Kopf wieder nach links bewegt, führt  $M'$  folgende Aktionen durch: Ist  $a_1$  das von  $M'$  (und von  $M$ ) gelesene Eingabezeichen und ist  $\delta(q, a_1, a_2, \dots, a_k) = (q', a_1, D_1, a'_2, D_2, \dots, a'_k, D_k)$ , so bewegt  $M'$  den Eingabekopf gemäß  $D_1$ , ersetzt auf dem Arbeitsband die markierten Zeichen  $a_i$  durch  $a'_i$  und verschiebt deren Marken gemäß  $D_i, i = 2, \dots, k$ .

**Akzeptanzverhalten:**  $M'$  akzeptiert genau dann, wenn  $M$  akzeptiert.

Offenbar gilt nun  $L(M') = L(M)$  und  $space_{M'}(x) \leq space_M(x)$ . ■

In den Übungen wird gezeigt, dass die Sprache der Palindrome durch eine 2-DTM zwar in Linearzeit entscheidbar ist, eine 1-DTM hierzu jedoch Zeit  $\Omega(n^2)$  benötigt. Tatsächlich lässt sich jede  $t(n)$ -zeitbeschränkte  $k$ -DTM  $M$  von einer 1-DTM  $M'$  in Zeit  $O(t(n)^2)$  simulieren. Bei Verwendung einer 2-DTM ist die Simulation sogar in Zeit  $O(t(n) \log t(n))$  durchführbar (siehe Übungen). Als nächstes wenden wir uns wichtigen Robustheitseigenschaften von Platz- und Zeitkomplexitätsklassen zu.

**Satz 16** (Lineare Platzkompression und Beschleunigung).

Für alle  $c > 0$  gilt

- i)  $DSPACE(s(n)) \subseteq DSPACE(2 + cs(n))$ , (lin. space compression)
- ii)  $DTIME(t(n)) \subseteq DTIME(2 + n + c \cdot t(n))$ . (linear speedup)

*Beweis.* i) Sei  $L \in DSPACE(s(n))$  und sei  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  eine  $s(n)$ -platzbeschränkte Offline- $k$ -DTM mit  $L(M) = L$ . Nach vorigem Lemma können wir  $k = 2$  annehmen. O.B.d.A. sei  $c < 1$ . Wähle  $m = \lceil 1/c \rceil$  und betrachte die Offline-2-DTM

$$M' = (Q \times \{1, \dots, m\}, \Sigma, \Sigma \cup \{\sqcup, \triangleright\} \cup \Gamma^m, \delta', (q_0, m))$$

mit

$$\delta'((q, i), a, b) = \begin{cases} ((q', 1), a, D_1, \triangleright, R), \\ \text{falls } b = \triangleright \text{ und } \delta(q, a, \triangleright) = (q', a, D_1, \triangleright, R), \\ ((q', j), a, D_1, (b_1, \dots, b_{i-1}, b'_i, b_{i+1}, \dots, b_m), D'_2), \\ \text{falls } [b = (b_1, \dots, b_m) \text{ oder } b = \sqcup = b_1 = \\ \dots = b_m] \text{ und } \delta(q, a, b_i) = (q', a, D_1, b'_i, D_2), \end{cases}$$

wobei

$$j = \begin{cases} i, & D_2 = N \\ i + 1, & D_2 = R, i < m \\ 1, & D_2 = R, i = m \\ m, & D_2 = L, i = 1 \\ i - 1, & D_2 = L, i > 1 \end{cases} \quad \text{und} \quad D'_2 = \begin{cases} L, & D_2 = L, i = 1 \\ R, & D_2 = R, i = m \\ N, & \text{sonst} \end{cases}$$

ist. Identifizieren wir die Zustände  $(q_{ja}, i)$  mit  $q_{ja}$  und  $(q_{nein}, i)$  mit  $q_{nein}$ , so ist leicht zu sehen, dass  $L(M') = L(M) = L$  gilt. Zudem gilt

$$\begin{aligned} space_{M'} &\leq 1 + \lceil (space_M(x) - 1)/m \rceil \\ &\leq 2 + space_M(x)/m \\ &\leq 2 + c \cdot space_M(x) \quad (\text{wegen } m = \lceil 1/c \rceil \geq 1/c). \end{aligned}$$

ii) Sei  $L \in \text{DTIME}(t(n))$  und sei  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  eine  $t(n)$ -zeitbeschränkte  $k$ -DTM mit  $L(M) = L$ , wobei wir  $k \geq 2$  annehmen. Wir konstruieren eine  $k$ -DTM  $M'$  mit  $L(M') = L$  und  $time_{M'}(x) \leq 2 + |x| + c \cdot time_M(x)$ .  $M'$  verwendet das Alphabet  $\Gamma' = \Sigma \cup \{\sqcup, \triangleright\} \cup \Gamma^m$  mit  $m = \lceil 8/c \rceil$  und simuliert  $M$  wie folgt.

**Initialisierung:**  $M'$  kopiert die Eingabe  $x = x_1 \dots x_n$  in Blockform auf das zweite Band. Hierzu fasst  $M'$  je  $m$  Zeichen von  $x$  zu einem Block  $(x_{im+1}, \dots, x_{(i+1)m})$ ,  $i = 0, \dots, l = \lceil n/m \rceil - 1$ , zusammen, wobei der letzte Block  $(x_{lm+1}, \dots, x_n, \sqcup, \dots, \sqcup)$  mit  $(l+1)m - n$

Blanks auf die Länge  $m$  gebracht wird. Sobald  $M'$  das erste Blank hinter der Eingabe  $x$  erreicht, ersetzt sie dieses durch das Zeichen  $\triangleright$ , d.h. das erste Band von  $M'$  ist nun mit  $\triangleright x \triangleright$  und das zweite Band mit

$$\triangleright (x_1, \dots, x_m) \dots (x_{(l-1)m+1}, \dots, x_{lm}) (x_{lm+1}, \dots, x_n, \sqcup, \dots, \sqcup)$$

beschriftet. Hierzu benötigt  $M'$  genau  $n + 2$  Schritte. In weiteren  $l + 1 = \lceil n/m \rceil$  Schritten kehrt  $M'$  an den Beginn des 2. Bandes zurück. Von nun an benutzt  $M'$  das erste Band als Arbeitsband und das zweite als Eingabeband.

**Simulation:**  $M'$  simuliert jeweils eine Folge von  $m$  Schritten von  $M$  in 6 Schritten:

$M'$  merkt sich in ihrem Zustand den Zustand  $q$  von  $M$  vor Ausführung dieser Folge und die aktuellen Kopfpositionen  $i_j \in \{1, \dots, m\}$  von  $M$  innerhalb der gerade gelesenen Blöcke auf den Bändern  $j = 1, \dots, k$ . Die ersten 4 Schritte verwendet  $M'$ , um die beiden Nachbarblöcke auf jedem Band zu erfassen ( $LRRL$ ). Mit dieser Information kann  $M'$  die nächsten  $m$  Schritte von  $M$  vorausberechnen und die entsprechende Konfiguration in 2 weiteren Schritten herstellen.

**Akzeptanzverhalten:**  $M'$  akzeptiert genau dann, wenn  $M$  dies tut.

Es ist klar, dass  $L(M') = L$  ist. Zudem gilt für jede Eingabe  $x$  der Länge  $|x| = n$

$$\begin{aligned} time_{M'}(x) &\leq n + 2 + \lceil n/m \rceil + 6 \lceil t(n)/m \rceil \\ &\leq n + 2 + 7 \lceil t(n)/m \rceil \\ &\leq n + 2 + 7ct(n)/8 + 7 \\ &\leq n + 2 + ct(n), \text{ falls } c \cdot t(n)/8 \geq 7. \end{aligned}$$

Da das Ergebnis der Rechnung von  $M(x)$  im Fall  $t(n) < 56/c$  nur von konstant vielen Eingabezeichen abhängt, kann  $M'$  diese Eingaben schon während der Initialisierungsphase (durch table-lookup) in Zeit  $n + 2$  entscheiden. ■

**Korollar 17.**

- i)  $\text{DSPACE}(O(s(n))) = \text{DSPACE}(s(n))$ , falls  $s(n) \geq 2$ .
- ii)  $\text{DTIME}(O(t(n))) = \text{DTIME}(t(n))$ , falls  $t(n) \geq (1 + \varepsilon)n + 2$  für ein  $\varepsilon > 0$  ist.
- iii)  $\text{DTIME}(O(n)) = \bigcap_{\varepsilon > 0} \text{DTIME}((1 + \varepsilon)n + 2)$ .

*Beweis.* i) Sei  $L \in \text{DSPACE}(cs(n) + c)$  für eine Konstante  $c \geq 0$ . Ist  $s(n) < 6$  für alle  $n$ , so folgt  $L \in \text{DSPACE}(O(1)) = \text{DSPACE}(0)$ . Gilt dagegen  $s(n) \geq 6$  für alle  $n \geq n_0$ , so existiert für  $c' = 1/2c$  eine Offline- $k$ -DTM  $M$ , die  $L$  für fast alle Eingaben in Platz  $2 + c'cs(n) + c'c \leq 3 + s(n)/2 \leq s(n)$  entscheidet. Wegen  $s(n) \geq 2$  können wir  $M$  leicht so modifizieren, dass sie auch die endlich vielen Ausnahmen in Platz  $s(n)$  entscheidet.

ii) Sei  $L \in \text{DTIME}(ct(n) + c)$  für ein  $c > 0$ . Nach vorigem Satz existiert für  $c' = \varepsilon/(2 + 2\varepsilon)c$  eine DTM  $M$ , die  $L$  in Zeit  $\text{time}_M(x) \leq 2 + n + c'(ct(n) + c)$  entscheidet. Wegen  $t(n) \geq (1 + \varepsilon)n$  und da für alle  $n \geq n_0 := \lceil (4 + 2c')/\varepsilon \rceil$  die Ungleichung  $2 + c'c \leq \varepsilon n/2$  gilt, folgt

$$\text{time}_M(x) \leq 2 + n + c'ct(n) + c'c = \underbrace{c'ct(n)}_{=\frac{\varepsilon t(n)}{2+2\varepsilon}} + \underbrace{2 + c'c + n}_{\leq \frac{(\varepsilon+2)n}{2} \leq \frac{(\varepsilon+2)t(n)}{2+2\varepsilon}} \leq t(n)$$

für alle  $n \geq n_0$ . Zudem können wir  $M$  im Beweis des vorigen Satzes so konstruieren, dass  $M(x)$  auch alle Eingaben  $x$  mit  $|x| < n_0$  in Zeit  $n + 2 \leq t(n)$  entscheidet.

iii) Klar, da  $\text{DTIME}(O(n)) = \text{DTIME}(O((1 + \varepsilon)n + 2))$  und diese Klasse nach ii) für jedes  $\varepsilon > 0$  gleich  $\text{DTIME}((1 + \varepsilon)n + 2)$  ist. ■

### 3.2 Deterministische Simulationen von nichtdeterministischen Berechnungen

In diesem Abschnitt betrachten wir möglichst platz- und zeiteffiziente deterministische Simulationen von nichtdeterministischen TMs.

**Satz 18.**

- i)  $\text{NTIME}(t(n)) \subseteq \text{DSPACE}(O(t(n)))$ ,
- ii)  $\text{NSPACE}(s(n)) \subseteq \text{DTIME}(2^{O(s(n) + \log n)})$ .

*Beweis.* i) Sei  $L \in \text{NTIME}(t(n))$  und sei  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  eine  $k$ -NTM, die  $L$  in Zeit  $t(n)$  entscheidet. Weiter sei

$$d = \max_{(q, \vec{a}) \in Q \times \Gamma^k} \|\delta(q, \vec{a})\|$$

der maximale Verzweigungsgrad von  $N$ . Dann ist jede Rechnung

$$K_x = K_0 \xrightarrow{N} K_1 \xrightarrow{N} \dots \xrightarrow{N} K_t$$

der Länge  $t$  von  $N(x)$  eindeutig durch eine Folge  $(i_1, \dots, i_t) \in \{1, \dots, d\}^t$  beschreibbar. Betrachte die Offline- $(k+2)$ -DTM  $M$ , die auf ihrem 2. Band für  $t = 1, 2, \dots$  der Reihe nach alle Folgen  $(i_1, \dots, i_t) \in \{1, \dots, d\}^t$  generiert. Für jede solche Folge kopiert  $M$  die Eingabe auf Band 3 und simuliert die zugehörige Rechnung von  $N(x)$  auf den Bändern 3 bis  $k+2$ .  $M$  akzeptiert, sobald  $N$  bei einer dieser Simulationen in den Zustand  $q_{\text{ja}}$  gelangt. Wird dagegen ein  $t$  erreicht, für das alle  $d^t$  Simulationen von  $N$  im Zustand  $q_{\text{nein}}$  oder  $q_{\text{h}}$  enden, so verwirft  $M$ . Nun ist leicht zu sehen, dass  $L(M) = L(N)$  und der Platzverbrauch von  $M$  durch

$$\text{space}_M(x) \leq \text{time}_N(x) + \text{space}_N(x) \leq (k+1)(\text{time}_N(x) + 1)$$

beschränkt ist.

ii) Sei  $L \in \text{NSPACE}(s(n))$  und sei  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  eine Offline-2-NTM, die  $L$  in Platz  $s(n)$  entscheidet. Da  $N$  bei einer Eingabe  $x$  der Länge  $n$

- höchstens  $\|Q\|$  verschiedene Zustände annehmen,
- die Köpfe des Eingabe- bzw. Arbeitsbandes auf höchstens  $n + 2$  bzw.  $s(n)$  verschiedenen Bandfeldern positionieren,

- und das Arbeitsband mit höchstens  $\|\Gamma\|^{s(n)}$  verschiedenen Beschriftungen versehen kann,

kann  $N(x)$  ausgehend von der Startkonfiguration  $K_x$  höchstens

$$t(n) = (n + 2)s(n)\|\Gamma\|^{s(n)}\|Q\| \leq c^{s(n)+\log n}$$

verschiedene Konfigurationen erreichen, wobei  $c$  eine von  $N$  abhängige Konstante ist. Um  $N$  zu simulieren, testet  $M$  für  $s = 1, 2, \dots$ , ob  $N(x)$  eine akzeptierende Endkonfiguration  $K = (q_{ja}, u_1, v_1, u_2, v_2)$  der Größe  $|u_2v_2| = s$  erreichen kann. Ist dies der Fall, akzeptiert  $M$ . Erreicht dagegen  $s$  einen Wert, so dass  $N(x)$  keine Konfiguration der Größe  $s$  erreichen kann, verwirft  $M$ . Hierzu muss  $M$  für  $s = 1, 2, \dots, s(n)$  jeweils alle von der Startkonfiguration  $K_x$  erreichbaren Konfigurationen der Größe  $s$  bestimmen, was in Zeit  $(c^{s(n)+\log n})^{O(1)} = 2^{O(s(n)+\log n)}$  möglich ist. ■

Es gilt somit für jede Funktion  $s(n) \geq \log n$ ,

$$\text{DSPACE}(s) \subseteq \text{NSPACE}(s) \subseteq \text{DTIME}(2^{O(s)})$$

und für jede Funktion  $t(n) \geq n + 2$ ,

$$\text{DTIME}(t) \subseteq \text{NTIME}(t) \subseteq \text{DSPACE}(t).$$

Insbesondere erhalten wir somit die Inklusionskette

$$\begin{aligned} L &\subseteq NL \subseteq P \subseteq NP \subseteq \text{PSPACE} \subseteq \text{NSPACE} \\ &\subseteq \text{EXP} \subseteq \text{NEXP} \subseteq \text{EXSPACE} \subseteq \dots \end{aligned}$$

Des Weiteren impliziert Satz 16 für  $t(n) \geq n + 2$  und  $s(n) \geq \log n$  die Inklusionen

$$\text{NTIME}(t) \subseteq \text{DTIME}(2^{O(t)}) \text{ und } \text{NSPACE}(s) \subseteq \text{DTIME}(2^{O(s)}),$$

was wiederum  $\text{NSPACE}(s) \subseteq \text{DSPACE}(2^{O(s)})$  impliziert. Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, lässt sich dies noch erheblich verbessern.

### 3.3 Der Satz von Savitch

Praktisch relevante Komplexitätsklassen werden durch Zeit- und Platzschranken  $t(n)$  und  $s(n)$  definiert, die sich mit relativ geringem Aufwand berechnen lassen.

**Definition 19.** Eine monotone Funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  heißt **echte** (engl. proper) **Komplexitätsfunktion**, falls es einen Transducer  $M$  gibt mit

- $M(x) = 1^{f(|x|)}$ ,
- $\text{space}_M(x) = O(f(|x|))$  und
- $\text{time}_M(x) = O(f(|x|) + |x|)$ .

Beispiele für echte Komplexitätsfunktionen sind  $k$ ,  $\lceil \log n \rceil$ ,  $\lceil \log^k n \rceil$ ,  $\lceil n \cdot \log n \rceil$ ,  $n^k + k$ ,  $2^n$ ,  $n! \cdot \lfloor \sqrt{n} \rfloor$  (siehe Übungen).

**Satz 20** (Savitch, 1970).

Für jede echte Komplexitätsfunktion  $s(n) \geq \log n$  gilt

$$\text{NSPACE}(s) \subseteq \text{DSPACE}(s^2).$$

*Beweis.* Sei  $L \in \text{NSPACE}(s)$  und sei  $N$  eine Offline-2-NTM, die  $L$  in Platz  $s(n)$  entscheidet. Wie im Beweis von Satz 18 gezeigt, kann  $N$  bei einer Eingabe  $x$  der Länge  $n$  höchstens  $c^{s(n)}$  verschiedene Konfigurationen einnehmen. Daher muss im Fall  $x \in L$  eine akzeptierende Rechnung der Länge  $\leq c^{s(n)}$  existieren.

Sei  $K_1, \dots, K_{c^{s(n)}}$  eine Aufzählung aller Konfigurationen von  $N(x)$  die Platz höchstens  $s(n)$  benötigen. Dann ist leicht zu sehen, dass für je zwei solche Konfigurationen  $K, K'$  und jede Zahl  $i$  folgende Äquivalenz gilt:

$$K \xrightarrow{N}^{\leq 2^i} K' \Leftrightarrow \exists K_j : K \xrightarrow{N}^{\leq 2^{i-1}} K_j \wedge K_j \xrightarrow{N}^{\leq 2^{i-1}} K'.$$

Diese Beobachtung führt sofort auf folgende Prozedur  $\text{reach}(K, K', i)$ , um die Gültigkeit von  $K \xrightarrow{N}^{\leq 2^i} K'$  zu testen.

**Prozedur**  $\text{reach}(K, K', i)$ 


---

```

1  if  $i = 0$  then return( $K = K'$  or  $K \xrightarrow{N} K'$ )
2  for each Konfiguration  $K_j$  do
3    if  $\text{reach}(K, K_j, i - 1)$  and  $\text{reach}(K_j, K', i - 1)$  then
4      return(true)
5  return(false)

```

---

Nun können wir  $N$  durch folgende Offline- $\beta$ -DTM  $M$  simulieren.  $M$  benutzt ihr 2. Band als Laufzeitkeller zur Verwaltung der Inkarnationen der rekursiven Aufrufe von **reach**. Hierzu speichert  $M$  auf ihrem 2. Band eine Folge von Tripeln der Form  $(K, K', i)$ . Das 3. Band wird zum Kopieren von Tripeln auf dem 2. Band und zur Berechnung von  $K_{j+1}$  aus  $K_j$  benutzt.

**Initialisierung:**  $M(x)$  schreibt das Tripel  $(K_x, \hat{K}_x, \lceil s(|n|) \log c \rceil)$  auf das 2. Band, wobei für das Eingabeband nur die Kopfposition, nicht jedoch die Beschriftung notiert wird (also z.B.  $K_x = (q_0, 1, \varepsilon, \triangleright)$ ) und jede akzeptierende Endkonfiguration mit der Konfiguration  $\hat{K}_x = (q_{ja}, 1, \varepsilon, \triangleright)$  identifiziert wird.

**Simulation:** Sei  $(K, K', i)$  das am weitesten rechts auf dem 2. Band stehende Tripel (also das oberste Kellerelement). Im Fall  $i = 0$  testet  $M$  direkt, ob  $K \xrightarrow{N}^{\leq 1} K'$  gilt und gibt die Antwort zurück.

Andernfalls fügt  $M$  beginnend mit  $j = 1$  das Tripel  $(K, K_j, i - 1)$  hinzu und berechnet (rekursiv) die Antwort für dieses Tripel.

Ist diese negativ, so wird das Tripel  $(K, K_j, i - 1)$  durch das nächste Tripel  $(K, K_{j+1}, i - 1)$  ersetzt (solange  $j < c^{s(n)}$  ist, andernfalls erfährt das Tripel  $(K, K', i)$  eine negative Antwort).

Erhält  $(K, K_j, i - 1)$  eine positive Antwort, so ersetzt  $M$  das Tripel  $(K, K_j, i - 1)$  durch das Tripel  $(K_j, K', i - 1)$  und berechnet die zugehörige Antwort. Bei einer negativen Antwort fährt  $M$  mit dem nächsten Tripel  $(K, K_{j+1}, i - 1)$  fort. Bei einer positiven Antwort erhält auch  $(K, K', i)$  eine positive Antwort.

**Akzeptanzverhalten:**  $M$  akzeptiert, falls die Antwort auf das Starttripel  $(K_x, \hat{K}_x, \lceil s(|n|) \log c \rceil)$  positiv ist.

Da sich auf dem 2. Band zu jedem Zeitpunkt höchstens  $\lceil s(|n|) \log c \rceil$  Tripel befinden und jedes Tripel  $O(s(|x|))$  Platz benötigt, besucht  $M$  nur  $O(s(|x|)^2)$  Felder. ■

**Korollar 21.**

- i)  $\text{NL} \subseteq \text{L}^2$ ,
- ii)  $\text{NSPACE} = \bigcup_{k>0} \text{NSPACE}(n^k) \subseteq \bigcup_{k>0} \text{DSPACE}(n^{2k}) = \text{PSPACE}$ ,
- iii)  $\text{NSPACE}$  ist unter Komplement abgeschlossen,
- iv)  $\text{CSL} = \text{NSPACE}(n) \subseteq \text{DSPACE}(n^2) \cap \text{E}$ .

Eine weitere Folgerung aus dem Satz von Savitch ist, dass das Komplement  $\bar{L}$  einer Sprache  $L \in \text{NSPACE}(s)$  in  $\text{DSPACE}(s^2)$  und somit auch in  $\text{NSPACE}(s^2)$  liegt. Wir werden gleich sehen, dass  $\bar{L}$  sogar in  $\text{NSPACE}(s)$  liegt, d.h. die nichtdeterministischen Platzklassen  $\text{NSPACE}(s)$  sind unter Komplementbildung abgeschlossen.

**3.4 Der Satz von Immerman und Szelepcsényi**

Wie wir gesehen haben, impliziert der Satz von Savitch den Abschluss von  $\text{NSPACE}$  unter Komplementbildung. Dagegen wurde die Frage ob auch die Klasse  $\text{CSL} = \text{NSPACE}(n)$  der kontextsensitiven Sprachen unter Komplementbildung abgeschlossen ist, erst in den 80ern von Neil Immerman und unabhängig davon von Robert Szelepcsényi gelöst.

**Definition 22.** Für eine Sprachklasse  $\mathcal{C}$  bezeichne  $\text{co-}\mathcal{C} = \{\bar{L} \mid L \in \mathcal{C}\}$  die zu  $\mathcal{C}$  **komplementäre Sprachklasse**. Dabei bezeichnet  $\bar{L} = \Sigma^* - L$  das **Komplement** einer Sprache  $L \subseteq \Sigma^*$ .

Die zu  $\text{NP}$  komplementäre Klasse ist  $\text{co-NP} = \{L \mid \bar{L} \in \text{NP}\}$ . Ein Beispiel für ein  $\text{co-NP}$ -Problem ist TAUT:

**Gegeben:** Eine boolsche Formel  $F$  über  $n$  Variablen  $x_1, \dots, x_n$ .

**Gefragt:** Ist  $F$  eine Tautologie, d. h. erfüllen alle Belegungen  $\vec{a} \in \{0, 1\}^n$  die Formel  $F$ ?

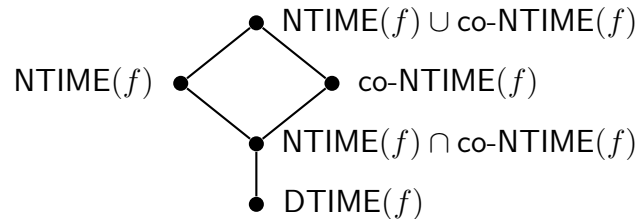
Die Frage ob NP unter Komplementbildung abgeschlossen ist (d. h., ob  $\text{NP} = \text{co-NP}$  gilt), ist ähnlich wie das  $\text{P} \stackrel{?}{=} \text{NP}$ -Problem ungelöst.

Deterministische Rechnungen lassen sich leicht komplementieren (durch Vertauschen der Zustände  $q_{\text{ja}}$  und  $q_{\text{nein}}$ ). Daher sind deterministische Komplexitätsklassen unter Komplementbildung abgeschlossen.

**Proposition 23.**

- i)  $\text{co-DSPACE}(s(n)) = \text{DSPACE}(s(n))$ ,
- ii)  $\text{co-DTIME}(t(n)) = \text{DTIME}(t(n))$ .

Damit ergibt sich folgende Inklusionsstruktur:



Dagegen erfordert die Komplementierung von nichtdeterministischen Berechnungen das Vorliegen gewisser Zusatzeigenschaften.

**Definition 24.** Eine NTM  $N$  heißt **strong** bei Eingabe  $x$ , falls  $N(x)$  mindestens eine akzeptierende oder mindestens eine verwerfende Rechnung ausführt, aber nicht beides.

**Proposition 25.**

- i)  $\text{NTIME}(t(n)) \cap \text{co-NTIME}(t(n)) = \{L(M) \mid M \text{ ist eine } t(n)\text{-zeitbeschränkte NTM, die bei allen Eingaben strong ist}\}$ ,

- ii)  $\text{NSPACE}(s(n)) \cap \text{co-NSPACE}(s(n)) = \{L(M) \mid M \text{ ist eine } s(n)\text{-platzbeschr. Offline-NTM, die bei allen Eingaben strong ist}\}$ .

*Beweis.* Siehe Übungen. ■

**Satz 26** (Immerman und Szelepcsényi, 1987).

Für jede echte Komplexitätsfunktion  $s(n) \geq \log n$  gilt

$$\text{NSPACE}(s) = \text{co-NSPACE}(s).$$

*Beweis.* Sei  $L \in \text{NSPACE}(s)$  und sei  $N$  eine  $s(n)$ -platzbeschränkte Offline-NTM mit  $L(N) = L$ . Wir konstruieren eine  $O(s(n))$ -platzbeschränkte Offline-NTM  $N'$  mit  $L(N') = L$ , die bei allen Eingaben strong ist. Hierzu zeigen wir zuerst, dass die Frage, ob  $N(x)$  eine Konfiguration  $K$  in höchstens  $t$  Schritten erreichen kann, durch eine  $O(s(n))$ -platzbeschränkte Offline-NTM  $N_0$  entscheidbar ist, die bei Kenntnis der Anzahl

$$r(x, t - 1) = \|\{K \mid K_x \xrightarrow{N}^{\leq t-1} K\}\|$$

aller in höchstens  $t - 1$  Schritten erreichbaren Konfigurationen strong ist. Betrachte die Sprache

$$L_0 = \{\langle x, r, t, K \rangle \mid 1 \leq r, t \leq c^{s(n)} \text{ und } K_x \xrightarrow{N}^{\leq t} K\}.$$

**Behauptung 27.** Es existiert eine Offline-NTM  $N_0$  mit  $L(N_0) = L_0$ , die  $O(s(|x|))$  Felder besucht und bei allen Eingaben  $w = \langle x, r, t, K \rangle$  mit  $r = r(x, t - 1)$  strong ist (d. h.  $N_0(w)$  hat genau im Fall  $w \notin L_0$  eine verwerfende Rechnung).

*Beweis der Behauptung.*  $N_0(\langle x, r, t, K \rangle)$  benutzt einen mit dem Wert 0 initialisierten Zähler  $z$  und rät der Reihe nach für jede Konfiguration  $K'$  der Größe  $\leq s(n)$  eine Rechnung von  $N(x)$  der Länge  $\leq t - 1$ , die in  $K'$  endet. Falls dies gelingt, erhöht  $N_0$  den Zähler  $z$  um 1 und testet, ob  $K' \xrightarrow{N}^{\leq 1} K$  gilt. Falls ja, so hält  $N_0$  im Zustand  $q_{\text{ja}}$ .

Nachdem  $N_0$  alle Konfigurationen  $K'$  der Größe  $\leq s(n)$  durchlaufen hat, hält  $N_0$  im Zustand  $q_{\text{nein}}$ , wenn  $z$  den Wert  $r$  hat, andernfalls im Zustand  $q_{\text{h}}$ .

Pseudocode für  $N_0(\langle x, r, t, K \rangle)$

---

```

1  if  $t = 0$  then halte im Zustand  $q_{\text{nein}}$ 
2   $z := 0$ 
3  for each Konfiguration  $K'$  der Größe  $\leq s(n)$  do
4    rate eine Rechnung  $\alpha$  der Laenge  $\leq t - 1$  von  $N(x)$ 
5    if  $\alpha$  endet in  $K'$  then
6       $z := z + 1$ 
7      if  $K' \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  then
8        halte im Zustand  $q_{\text{ja}}$ 
9  if  $z = r$  then
10   halte im Zustand  $q_{\text{nein}}$ 
11 else
12   halte im Zustand  $q_{\text{h}}$ 

```

---

Da  $N_0$  genau dann eine akzeptierende Rechnung hat, wenn eine Konfiguration  $K'$  mit  $K_x \xrightarrow[N]{\leq t-1} K'$  und  $K' \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  existiert, ist klar, dass  $N_0$  die Sprache  $L_0$  entscheidet. Da  $N_0$  zudem  $O(s(n))$ -platzbeschränkt ist, bleibt nur noch zu zeigen, dass  $N_0$  bei allen Eingaben  $w = \langle x, r, t, K \rangle$  mit  $r = r(x, t - 1)$  strong ist, also  $N_0(w)$  genau im Fall  $w \notin L_0$  eine verwerfende Rechnung hat.

Um bei Eingabe  $w = \langle x, r, t, K \rangle$  eine verwerfende Endkonfiguration zu erreichen, muss  $N_0$   $r = r(x, t - 1)$  Konfigurationen  $K'$  finden, für die zwar  $K_x \xrightarrow[N]{\leq t-1} K'$  aber nicht  $K' \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  gilt. Dies bedeutet jedoch, dass  $K$  von keiner der  $r(x, t - 1)$  in  $t - 1$  Schritten erreichbaren Konfigurationen in einem Schritt erreichbar ist und somit  $w$  tatsächlich nicht zu  $L_0$  gehört. Die Umkehrung folgt analog.  $\square$

Betrachte nun folgende NTM  $N'$ , die für  $t = 1, 2, \dots$  die Anzahl  $r(x, t)$  der in höchstens  $t$  Schritten erreichbaren Konfigurationen in

der Variablen  $r$  berechnet (diese Technik wird induktives Zählen, engl. *inductive counting*, genannt). Die Kenntnis der Anzahlen  $r(x, t)$  versetzt  $N'$  in die Lage, für alle Eingaben  $x \notin L$  zu verifizieren, dass  $N(x)$  keine akzeptierende Endkonfiguration erreichen kann.

Pseudocode für  $N'(x)$

---

```

1   $t := 0$ 
2   $r := 1$ 
3  repeat
4     $t := t + 1$ 
5     $r^- := r$ 
6     $r := 0$ 
7    for each  $K'$  der Größe  $\leq s(n)$  do
8      simuliere  $N_0$  bei Eingabe  $\langle x, r^-, t, K_i \rangle$ 
9      if  $N_0$  akzeptiert then
10        $r := r + 1$ 
11       if  $K'$  ist akzeptierende Endkonfiguration then
12         halte im Zustand  $q_{\text{ja}}$ 
13       if  $N_0$  haelt im Zustand  $q_{\text{h}}$  then
14         halte im Zustand  $q_{\text{h}}$ 
15  until ( $r = r^-$ )
16  halte im Zustand  $q_{\text{nein}}$ 

```

---

**Behauptung 28.** *Im  $t$ -ten Durchlauf der repeat-Schleife wird  $r^-$  in Zeile 5 auf den Wert  $r(x, t - 1)$  gesetzt. Folglich wird  $N_0$  von  $N'$  in Zeile 8 nur mit Eingaben der Form  $\langle x, r(x, t - 1), t, K_i \rangle$  aufgerufen.*

*Beweis der Behauptung.* Wir führen Induktion über  $t$ :

$t = 1$ : Im ersten Durchlauf der repeat-Schleife erhält  $r^-$  in Zeile 5 den Wert  $1 = r(x, 0)$ .

$t \rightsquigarrow t + 1$ : Da  $r^-$  zu Beginn des  $(t + 1)$ -ten Durchlaufs auf den Wert von  $r$  gesetzt wird, müssen wir zeigen, dass  $r$  im  $t$ -ten Durchlauf auf  $r(x, t)$  hochgezählt wird. Nach Induktionsvorausset-

zung wird  $N_0$  im  $t$ -ten Durchlauf nur mit Eingaben der Form  $\langle x, r(x, t - 1), t, K_i \rangle$  aufgerufen. Da  $N_0$  wegen Beh. 1 auf all diesen Eingaben strong ist und keine dieser Simulationen im Zustand  $q_h$  endet (andernfalls würde  $N'$  sofort stoppen), werden alle in  $\leq t$  Schritten erreichbaren Konfigurationen  $K_i$  als solche erkannt und somit wird  $r$  tatsächlich auf den Wert  $r(x, t)$  hochgezählt.  $\square$

**Behauptung 29.** Bei Beendigung der repeat-Schleife in Zeile 15 gilt  $r = r^- = \|\{K | K_x \xrightarrow{N^*} K\}\|$ .

*Beweis der Behauptung.* Wir wissen bereits, dass im  $t$ -ten Durchlauf der repeat-Schleife  $r$  den Wert  $r(x, t)$  und  $r^-$  den Wert  $r(x, t - 1)$  erhält. Wird daher die repeat-Schleife nach  $t_e$  Durchläufen verlassen, so gilt  $r = r^- = r(x, t_e) = r(x, t_e - 1)$ .

Angenommen  $r(x, t_e) < \|\{K | K_x \xrightarrow{N^*} K\}\|$ . Dann gibt es eine Konfiguration  $K$ , die für ein  $t' > t_e$  in  $t'$  Schritten, aber nicht in  $t_e$  Schritten erreichbar ist. Betrachte eine Rechnung  $K_x = K_0 \xrightarrow{N} K_1 \xrightarrow{N} \dots \xrightarrow{N} K_{t'} = K$  minimaler Länge, die in  $K$  endet. Dann gilt  $K_x \xrightarrow{N}^{t_e} K_{t_e}$ , aber nicht  $K_x \xrightarrow{N}^{\leq t_e - 1} K_{t_e}$  und daher folgt  $r(x, t_e) > r(x, t_e - 1)$ . Widerspruch!  $\square$

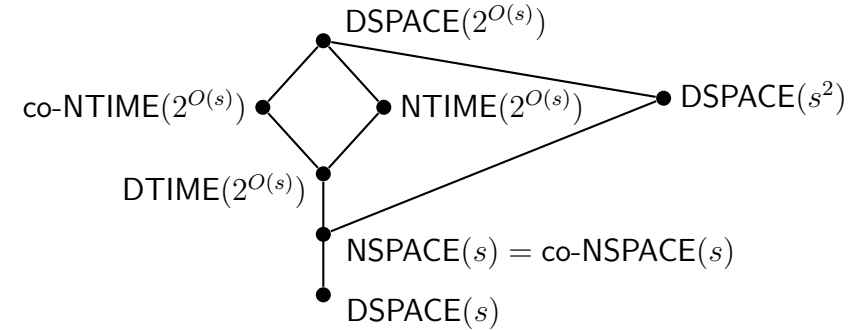
Da  $N'$  offenbar die Sprache  $L$  in Platz  $O(s(n))$  entscheidet, bleibt nur noch zu zeigen, dass  $N'$  bei allen Eingaben strong ist. Wegen Behauptung 29 hat  $N'(x)$  nur dann eine verwerfende Rechnung, wenn im letzten Durchlauf der repeat-Schleife alle erreichbaren Konfigurationen  $K$  gefunden wurden und sich darunter keine akzeptierende Endkonfiguration befand. Dies impliziert  $x \notin L$ . Die Umgekehrung, dass  $N'(x)$  für alle  $x \notin L$  eine verwerfende Rechnung hat, folgt analog.  $\blacksquare$

**Korollar 30.**

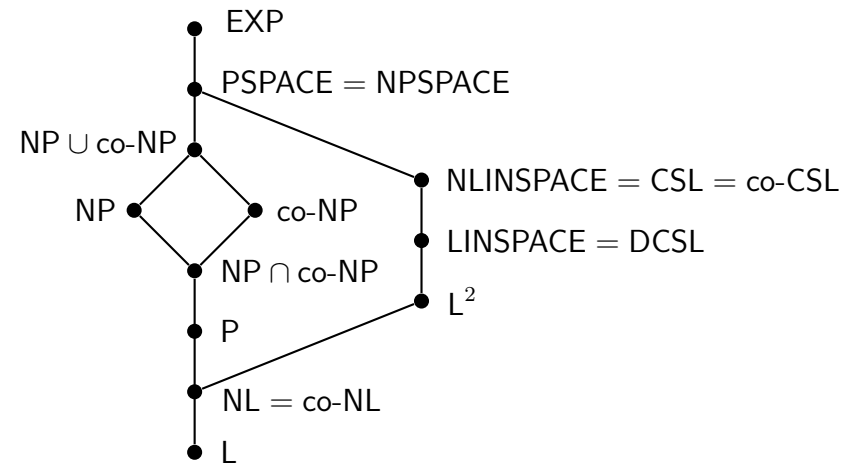
1.  $NL = co-NL$ ,

2.  $CSL = NLINSPACE = co-CSL$ .

Damit ergibt sich folgende Inklusionsstruktur für (nicht)deterministische Platz- und Zeitklassen:



Angewandt auf die wichtigsten bisher betrachteten Komplexitätsklassen erhalten wir folgende Inklusionsstruktur:



Eine zentrale Fragestellung der Komplexitätstheorie ist, welche dieser Inklusionen echt sind. Dies untersuchen wir im nächsten Kapitel.