

Vorlesungsskript

# Einführung in die Komplexitätstheorie

Wintersemester 2012/13

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

*19. Dezember 2012*

# 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        |
| <b>4</b> | <b>Hierarchiesätze</b>  | <b>15</b> |
| 4.1      | Diagonalisierung und die Unentscheidbarkeit des Halteproblems . . . . .         | 15        |
| 4.2      | Das Gap-Theorem . . . . .   | 16        |
| 4.3      | Zeit- und Platzhierarchiesätze . . . . .  | 17        |
| <b>5</b> | <b>Reduktionen</b>  | <b>20</b> |
| 5.1      | Logspace-Reduktionen . . . . .  | 20        |
| 5.2      | P-vollständige Probleme und polynomielle Schaltkreiskomplexität . . . . .       | 22        |
| 5.3      | NP-vollständige Probleme . . . . .  | 24        |
| 5.4      | NL-vollständige Probleme . . . . .  | 28        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>Probabilistische Berechnungen</b>             | <b>29</b> |
| 6.1      | Die Klassen BPP, RP und ZPP . . . . .            | 31        |
| 6.2      | Anzahl-Operatoren . . . . .                      | 31        |
| 6.3      | Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit . . . . . | 33        |
| <b>7</b> | <b>Die Polynomialzeithierarchie</b>              | <b>38</b> |

# 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 Graphen (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:

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

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: Gerichteter Graph  $G = (V, E)$  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 Verbrauch hängt auch davon ab, wie wir die Eingabe kodieren.

## Komplexitätsbetrachtungen:

- REACH ist in Zeit  $n^3$  entscheidbar.

- REACH ist nichtdeterministisch in Platz  $\log n$  entscheidbar (und daher deterministisch in Platz  $\log^2 n$ ; 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 maximalem Wert  $w(f) = \sum_{(1,v) \in E} f(1,v)$ .

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  $n^5$  lösbar.
- MAXFLOW ist in Platz  $n^2$  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  $n^3$  entscheidbar.
- MATCHING ist in Platz  $n^2$  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.

### 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  $n!$  lösbar (Ausprobieren aller Rundreisen).
- TSP ist in Platz  $n$  lösbar (mit demselben Algorithmus, der TSP in Zeit  $n!$  löst).
- Durch dynamisches Programmieren<sup>a</sup> lässt sich TSP in Zeit  $n^2 \cdot 2^n$  lösen, der Platzverbrauch erhöht sich dabei jedoch auf  $n \cdot 2^n$  (siehe Übungen).

<sup>a</sup>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 Quadrupel  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$ . 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  $v'_i = \begin{cases} \sqcup, & v_i = \varepsilon, \\ v_i, & \text{sonst,} \end{cases}$

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 Hölle 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

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

**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 **Resultat**  $M(x)$  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  $L$  **rekursiv aufzählbar** (oder **semi-entscheidbar**). 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:

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow M(x) \text{ akz.} \\ x \notin L &\Rightarrow M(x) \text{ verw.} \end{aligned}$$

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 rekursiv aufzählbar ist, wenn eine rekursive 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 oft

$$\delta : (q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$$

oder einfach  $(q, a_1, \dots, a_k) \mapsto (q', a'_1, D_1, \dots, a'_k, D_k)$ .

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.

- a) Wir sagen  $M(x)$  **akzeptiert**, falls  $M(x)$  nur endlich lange Rechnungen ausführt und eine akzeptierende Endkonfiguration  $K$  existiert mit  $K_x \rightarrow^* K$ .
- b) Akzeptiert  $M(x)$  nicht und hat  $M(x)$  nur endlich lange Rechnungen, so **verwirft**  $M(x)$ .
- c) Falls  $M(x)$  unendlich lange Rechnungen ausführt, ist  $M(x) = \uparrow$  (undefiniert).
- d) Die von  $M$  **akzeptierte Sprache** ist

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

- e)  $M$  **entscheidet**  $L(M)$ , falls  $M$  alle Eingaben  $x \notin L(M)$  verwirft.

## 2.3 Zeitkomplexität

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

**Definition 12.**

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

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

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

- b) Sei  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion. Dann ist  $M$   **$t(n)$ -zeitbeschränkt**, falls für alle  $n \geq 0$  und alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $|x| \leq n$  gilt:

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

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

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

bzw.

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

zusammen. Ferner sei

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

Für eine Klasse  $F$  von Funktionen  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  sei  $\text{DTIME}(F) = \bigcup_{t \in F} \text{DTIME}(t(n))$ .  $\text{NTIME}(F)$  und  $\text{FTIME}(F)$  sind analog definiert. Die Klasse  $\mathcal{O}(n^{\mathcal{O}(1)})$  aller polynomiell beschränkten Funktionen bezeichnen wir mit  $\text{poly}(n)$ . Die wichtigsten Zeitkomplexitätsklassen sind

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

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 hier können keine Berechnungen durchgeführt 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

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

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  $\sum_{i=2}^{k-1} |u_i v_i|$ .

- b) Sei  $s : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ . Dann ist  $M$   **$s(n)$ -platzbeschränkt**, falls für alle  $n \geq 0$  und alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $|x| \leq n$  gilt:

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

D.h.,  $space_M(x)$  ist undefiniert, falls  $time_M(x) = \infty$  undefiniert ist.

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

$$L = LOGSPACE = DSPACE(O(\log n))$$

$$L^c = DSPACE(O(\log^c n))$$

$$LINSPEACE = DSPACE(O(n))$$

$$PSPACE = DSPACE(\text{poly}(n))$$

$$ESPACE = DSPACE(2^{\mathcal{O}(n)})$$

$$EXSPACE = DSPACE(2^{\text{poly}(n)})$$

Die Klassen NL, NLINSPEACE und NPSPACE, sowie FL, FLINSPEACE und FSPACE 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-DTM  $M$  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  $\Gamma' = \Gamma \cup (\Gamma \cup \hat{\Gamma})^{k-1}$ , 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  $\text{space}_{M'}(x) \leq \text{space}_M(x)$ . ■

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

*Beweis.* i) Sei  $L \in \text{DSPACE}(s(n))$  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

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

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  $\Gamma' = \Gamma \cup \Gamma^m$  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 unendlich viele  $n$ , so folgt  $L \in \text{DSpace}(\mathcal{O}(1)) = \text{DSpace}(0)$ . Gilt dagegen  $s(n) \geq 6$  für fast alle  $n$ , so existiert für  $c' = 1/2c$  eine Offline- $k$ -DTM  $M$ , die  $L$  für fast alle Eingaben in Platz  $2 + c's(n) + c'c \leq 3 + s(n)/2 \leq s(n)$  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  $c \geq 0$ . Nach vorigem Satz existiert für  $c' = \varepsilon/(2 + 2\varepsilon)c$  eine DTM  $M$ , die  $L$  in Zeit  $2 + n + c'ct(n) + c'c$  entscheidet. Wegen  $c'ct(n) = \varepsilon t(n)/(2 + 2\varepsilon)$  und da wegen  $t(n) \geq (1 + \varepsilon)n$  für fast alle  $n$  gilt, dass  $(2 + \varepsilon)t(n)/(2 + 2\varepsilon) \geq (2 + \varepsilon)n/2 \geq 2 + c'c + n$  ist, folgt  $2 + c'c + n + c'ct(n) \leq t(n)$  für fast alle  $n$ . Wegen  $t(n) \geq n + 2$  können wir  $M$  leicht so modifizieren, dass sie auch die endlich vielen Ausnahmen in Zeit  $t(n)$  entscheidet.

iii) Klar, da  $\text{DTIME}(O(n)) = \text{DTIME}(O((1 + \varepsilon)n + 2))$  und letztere 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. Um  $N$  zu simulieren, generiert  $M$  auf dem Band 2 für  $t = 1, 2, \dots$  der Reihe nach alle Folgen  $(i_1, \dots, i_t) \in \{1, \dots, d\}^t$ . 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  $q_h$  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. Bei einer Eingabe  $x$  der Länge  $n$  kann  $N$

- die Köpfe des Eingabe- bzw. Arbeitsbandes auf höchstens  $n + 2$  bzw.  $s(n)$  verschiedenen Bandfeldern positionieren,
- das Arbeitsband mit höchstens  $\|\Gamma\|^{s(n)}$  verschiedenen Beschriftungen versehen und
- höchstens  $\|Q\|$  verschiedene Zustände annehmen.

D.h. ausgehend von der Startkonfiguration  $K_x$  kann  $N$  in Platz  $s(n)$  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  $|u_2 v_2| = s$  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. ■

**Korollar 19.**  $s(n) \geq \log n \Rightarrow \text{NSPACE}(s(n)) \subseteq \text{DTIME}(2^{O(s(n))})$ .

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

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

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

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

Insbesondere erhalten wir somit die Inklusionskette

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

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

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

wovon sich letztere noch erheblich verbessern lässt, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden.

### 3.3 Der Satz von Savitch

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

**Definition 20.** 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 21** (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. Zudem können wir annehmen, dass  $N(x)$  höchstens eine akzeptierende Endkonfiguration  $\hat{K}_x$  erreichen kann.

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:

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

Nun können wir  $N(x)$  durch folgende Offline-3-DTM  $M(x)$  simulieren.

**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.  $K_x = (q_0, 1, \varepsilon, \triangleright)$ ). Während der Simulation wird auf dem 2. Band ein Keller (*stack*) von Tripeln der Form  $(K, K', i)$  implementiert, die jeweils für die Frage stehen, ob  $K \xrightarrow[N]{\leq 2^i} K'$  gilt. Zur Beantwortung dieser Frage arbeitet  $M$  den Stack wie folgt ab, wobei das 3. Band zum Kopieren von Tripeln auf dem 2. Band und zur Berechnung von  $K_{j+1}$  aus  $K_j$  benutzt wird.

**Simulation:** Sei  $(K, K', i)$  das am weitesten rechts auf dem 2. Band stehende Tripel (also das oberste Kellerelement).

In den Fällen  $K = K'$  und  $i = 0$  testet  $M$  direkt, ob  $K \xrightarrow[N]{\leq 1} K'$  gilt und gibt die Antwort zurück.

Andernfalls fügt  $M$  für wachsendes  $j = 1, 2, \dots$  das Tripel  $(K, K_j, i - 1)$  hinzu und berechnet (rekursiv) die Antwort für diese 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).

Ist die Antwort auf das Tripel  $(K, K_j, i - 1)$  dagegen positiv, 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 dagegen das Tripel  $(K, K', i)$  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  $O(s^2(|x|))$  Felder. ■

**Korollar 22.**

- i)  $\text{NL} \subseteq \text{L}^2$ ,
- ii)  $\text{NPSpace} = \bigcup_{k>0} \text{NSpace}(n^k) \subseteq \bigcup_{k>0} \text{DSpace}(n^{2k}) = \text{PSPACE}$ ,
- iii)  $\text{NPSpace}$  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

**Definition 23.**

- a) Für eine Sprache  $L \in \Sigma^*$  bezeichne  $\bar{L} = \Sigma^* - L$  das **Komplement** von  $L$ .
- b) Für eine Sprachklasse  $\mathcal{C}$  bezeichne  $\text{co-}\mathcal{C} = \{\bar{L} \mid L \in \mathcal{C}\}$  die zu  $\mathcal{C}$  **komplementäre Sprachklasse**.

**Beispiel 24.**

- 1) 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  $\text{TAUT}$ :

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

**Gefragt:** Ist  $F$  eine Tautologie, d.h. gilt  $f(\vec{a}) = 1$  für alle Belegungen  $\vec{a} \in \{0, 1\}^n$ ?

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

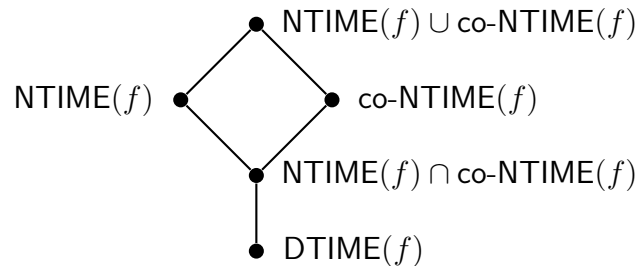
- 2) Wir wie gesehen haben, impliziert der Satz von Savitch den Abschluss von  $\text{NPSpace}$  unter Komplementbildung.
- 3) Dagegen wurde die Frage ob die Klasse  $\text{CSL} = \text{NSpace}(n)$  der kontextsensitiven Sprachen unter Komplementbildung abgeschlossen ist, erst in den 80ern gelöst (siehe Satz von Immerman und Szelepcsényi), d.h. es gilt  $\text{CSL} = \text{co-CSL}$ .
- 4) Andererseits ist  $\text{co-CFL} \neq \text{CFL}$ . Dies folgt aus der Tatsache, dass kontextfreie Sprachen zwar unter Vereinigung abgeschlossen sind, aber nicht unter Schnitt.  $\triangleleft$

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

**Proposition 25.**

- 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 lassen sich nichtdeterministische Berechnungen nicht ohne weiteres komplementieren; es sei denn, man fordert gewisse Zusatzeigenschaften.

**Definition 26.** Eine NTM  $N$  heißt **strong** bei Eingabe  $x$ , falls es entweder akzeptierende oder verwerfende Rechnungen bei Eingabe  $x$  gibt (aber nicht beides zugleich).

**Satz 27** (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. Sei

$$L_0 = \{(x, r, t, K) \mid t \geq 1 \text{ und } K_x \xrightarrow{N}^{\leq t} K\}.$$

**Behauptung 28.** Es existiert eine  $O(s(n))$ -platzbeschränkte Offline-NTM  $N_0$  mit  $L(N_0) = L_0$ , die auf allen Eingaben der Form  $(x, r(x, t-1), t, K)$ ,  $t \geq 1$ , strong ist.

*Beweis der Behauptung.*  $N_0(x, r, t, K)$  benutzt einen mit dem Wert 0 initialisierten Zähler  $c$  und rät der Reihe nach für jede Konfiguration  $K_i$ , die Platz  $\leq s(|x|)$  benötigt, eine Rechnung von  $N(x)$  der Länge  $\leq t-1$ , die in  $K_i$  endet. Falls dies gelingt, erhöht  $N_0$  den Zähler  $c$  um 1 und testet, ob  $K_i \xrightarrow{N}^{\leq 1} K$  gilt. Falls ja, so hält  $N_0$  im Zustand  $q_{\text{ja}}$ . Nachdem  $N_0$  alle Konfigurationen  $K_i$  durchlaufen hat, hält  $N_0$  im Zustand  $q_{\text{nein}}$ , wenn  $c$  den Wert  $r$  hat, andernfalls im Zustand  $q_{\text{h}}$ .

Pseudocode für  $N_0(x, r, t, K)$ 


---

```

1  if  $t = 0$  then halte im Zustand  $q_{\text{nein}}$ 
2   $c := 0$ 
3  for each Konfiguration  $K_i$  do
4    rate eine Rechnung  $\alpha$  der Laenge  $\leq t - 1$  von  $N(x)$ 
5    if  $\alpha$  endet in  $K_i$  then
6       $c := c + 1$ 
7      if  $K_i \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  then
8        halte im Zustand  $q_{\text{ja}}$ 
9  if  $c = r$  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  $K_i$  mit  $K_x \xrightarrow[N]{\leq t-1} K_i$  und  $K_i \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  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 Eingaben der Form  $x_0 = (x, r(x, t - 1), t, K)$ ,  $t \geq 1$ , strong ist, also  $N_0(x_0)$  genau im Fall  $x_0 \notin L_0$  eine verwerfende Endkonfiguration erreichen kann.

Um bei Eingabe  $x_0$  eine verwerfende Endkonfiguration zu erreichen, muss  $N_0$   $r = r(x, t - 1)$  Konfigurationen  $K_i$  finden, für die zwar  $K_x \xrightarrow[N]{\leq t-1} K_i$  aber nicht  $K_i \xrightarrow[N]{\leq 1} K$  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  $x_0$  tatsächlich nicht zu  $L_0$  gehört. Die Umkehrung folgt analog. ■

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) und mit Hilfe dieser Anzahlen im

Fall  $x \notin L$  verifiziert, dass keine der erreichbaren Konfigurationen akzeptierend ist.

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 Konfiguration  $K_i$  do
8      simuliere  $N_0(x, r^-, t, K_i)$ 
9      if  $N_0$  akzeptiert then
10         $r := r + 1$ 
11        if  $K_i$  ist akzeptierende Endkonfiguration then
12          halte im Zustand  $q_{\text{ja}}$ 
13        if  $N_0$  haelte 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 29.** *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  $(x, r(x, t - 1), t, K_i)$  aufgerufen.*

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

$t = 1$ : Im ersten Durchlauf der repeat-Schleife erhält  $r^-$  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 Induktionsvoraussetzung wird  $N_0$  im  $t$ -ten Durchlauf nur mit Eingaben der Form  $(x, r(x, t - 1), t, K_i)$  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. ■

**Behauptung 30.** 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  $r = r^- = r(x, t_e) = r(x, t_e - 1)$ .

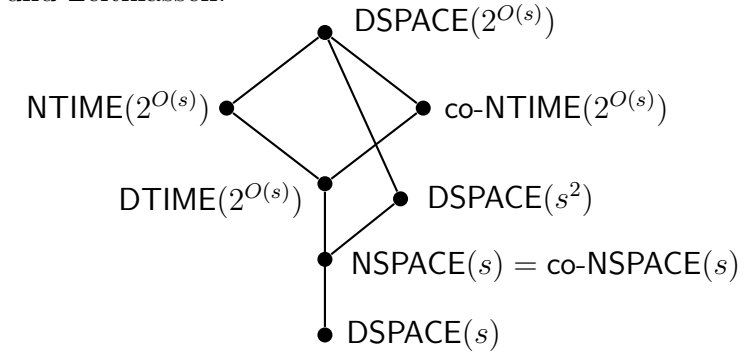
Angenommen  $r(x, t_e) < \|\{K | K_x \xrightarrow{N^*} K\}\|$ . Dann gibt es eine Konfiguration  $K$ , die für ein  $t' > t_e$  in  $t'$  Schritten, aber nicht in  $t_e$  Schritten erreichbar ist. Betrachte eine Rechnung  $K_x = K_0 \xrightarrow{N} K_1 \xrightarrow{N} \dots \xrightarrow{N} K_{t'} = K$  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! ■

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 30 hat  $N'(x)$  genau dann eine verwerfende Rechnung, wenn im letzten Durchlauf der repeat-Schleife alle erreichbaren Konfigurationen  $K$  als solche erkannt werden und darunter keine akzeptierende Endkonfiguration ist. Dies impliziert  $x \notin L$ . Umgekehrt ist leicht zu sehen, dass  $N'(x)$  im Fall  $x \notin L$  eine verwerfende Rechnung hat. ■

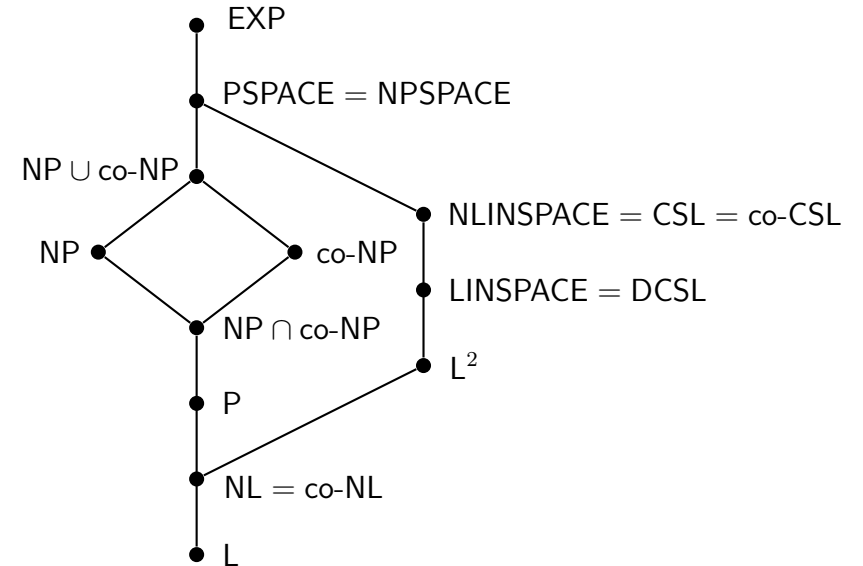
**Korollar 31.**

1.  $NL = co-NL$ ,
2.  $CSL = NLSPACE = co-CSL$ .

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. Dieser Frage gehen wir im nächsten Kapitel nach.



## 4 Hierarchiesätze

### 4.1 Diagonalisierung und die Unentscheidbarkeit des Halteproblems

Wir benutzen folgende Kodierung (Gödelisierung) von 1-DTMs  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$ . O.B.d.A. sei  $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_m\}$ ,  $\{0, 1, \#\} \subseteq \Sigma$  und  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_l\}$  (also z.B.  $a_1 = \sqcup$ ,  $a_2 = \triangleright$ ,  $a_3 = 0$ ,  $a_4 = 1$  etc.). Dann kodieren wir jedes  $\alpha \in Q \cup \Gamma \cup \{q_h, q_{ja}, q_{nein}, L, R, N\}$  wie folgt durch eine Binärzahl  $c(\alpha)$  der Länge  $b = \lceil \log_2(\|Q\| + \|\Gamma\| + 6) \rceil = \lceil \log_2(m + l + 7) \rceil$ :

| $\alpha$                         | $c(\alpha)$                                 |
|----------------------------------|---|
| $q_i, i = 0, \dots, m$           | $bin_b(i)$                                  |
| $a_j, j = 1, \dots, l$           | $bin_b(m + j)$                              |
| $q_h, q_{ja}, q_{nein}, L, R, N$ | $bin_b(m + l + 1), \dots, bin_b(m + l + 6)$ |

$M$  wird nun durch eine Folge von Binärzahlen, die durch  $\#$  getrennt sind, kodiert:

$$\begin{aligned}
& c(q_0)\#c(a_1)\#c(p_{0,1})\#c(b_{0,1})\#c(D_{0,1})\# \\
& c(q_0)\#c(a_2)\#c(p_{0,2})\#c(b_{0,2})\#c(D_{0,2})\# \\
& \quad \vdots \\
& c(q_m)\#c(a_l)\#c(p_{m,l})\#c(b_{m,l})\#c(D_{m,l})\#
\end{aligned}$$

wobei

$$\delta(q_i, a_j) = (p_{i,j}, b_{i,j}, D_{i,j})$$

für  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, l$  ist. Kodieren wir die Zeichen  $0, 1, \#$  binär (z.B.  $0 \mapsto 00$ ,  $1 \mapsto 11$ ,  $\# \mapsto 10$ ), so gelangen wir zu einer Binärkodierung von  $M$ . Diese Kodierung lässt sich auch auf  $k$ -DTM's und  $k$ -NTM's erweitern. Die Kodierung einer TM  $M$  bezeichnen wir mit  $\langle M \rangle$ . Ein Paar  $(M, x)$  bestehend aus einer TM  $M$  und einer Eingabe  $x \in \{0, 1\}^*$  kodieren wir durch das Wort  $\langle M, x \rangle = \langle M \rangle \# x$ .

**Definition 32.** Das **Halteproblem** ist

$$H = \{\langle M, x \rangle \mid M \text{ ist eine DTM, die bei Eingabe } x \text{ hält}\}.$$

**Satz 33.**  $H$  ist rekursiv aufzählbar, aber nicht entscheidbar.

*Beweis.* Es ist klar, dass  $H$  rekursiv aufzählbar ist, da es eine (universelle) TM  $U$  gibt, die bei Eingabe  $\langle M, x \rangle$  die Berechnung von  $M(x)$  simuliert und genau dann akzeptiert, wenn  $M(x)$  hält.

Unter der Annahme, dass  $H$  entscheidbar ist, ist auch die Sprache

$$D = \{\langle M \rangle \mid M \text{ ist eine DTM, die die Eingabe } \langle M \rangle \text{ verwirft}\} \quad (*)$$

entscheidbar. Sei also  $M_d$  eine Turingmaschine, die  $D$  entscheidet,

$$L(M_d) = D \quad (**).$$

Dann verhält sich  $M_d$  „komplementär“ zur Diagonalen der Matrix, deren Eintrag in Zeile  $M$  und Spalte  $\langle M \rangle$  das Resultat von  $M(\langle M \rangle)$  angibt.

|          | $\langle M_1 \rangle$ | $\langle M_2 \rangle$        | $\langle M_3 \rangle$ | $\langle M_4 \rangle$ | $\dots$  |
|----------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| $M_1$    | <b>ja</b>             | $\uparrow$                   | nein                  | nein                  | $\dots$  |
| $M_2$    | nein                  | <b><math>\uparrow</math></b> | nein                  | $\uparrow$            | $\dots$  |
| $M_3$    | ja                    | $\uparrow$                   | <b>nein</b>           | $\uparrow$            | $\dots$  |
| $M_4$    | $\uparrow$            | nein                         | $\uparrow$            | <b>ja</b>             | $\dots$  |
| $\vdots$ | $\vdots$              | $\vdots$                     | $\vdots$              | $\vdots$              | $\ddots$ |

|       |             |             |           |             |         |
|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------|
| $M_d$ | <b>nein</b> | <b>nein</b> | <b>ja</b> | <b>nein</b> | $\dots$ |
|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------|

Folglich kann keine Zeile dieser Matrix mit  $M_d$  übereinstimmen:

$$\begin{aligned} \langle M_d \rangle \in D &\stackrel{(*)}{\Rightarrow} M_d(\langle M_d \rangle) = \text{nein} \stackrel{(**)}{\Rightarrow} \langle M_d \rangle \notin D \quad \text{!} \\ \langle M_d \rangle \notin D &\stackrel{(*)}{\Rightarrow} M_d(\langle M_d \rangle) \neq \text{nein} \stackrel{(**)}{\Rightarrow} \langle M_d \rangle \in D \quad \text{!} \end{aligned}$$

■

**Satz 34.** Für jede rekursive Funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  existiert eine rekursive Sprache  $D_f \notin \text{DTIME}(f(n))$ .

*Beweis.* Wir definieren

$$D_f = \{ \langle M \rangle \mid M(\langle M \rangle) \text{ verwirft nach } \leq f(|\langle M \rangle|) \text{ Schritten} \} \quad (*)$$

Offensichtlich ist  $D_f$  entscheidbar. Unter der Annahme, dass  $D_f \in \text{DTIME}(f(n))$  ist, existiert eine  $f(n)$ -zeitbeschränkte DTM  $M_d$ , die  $D_f$  entscheidet, d.h.

$$L(M_d) = D \quad (**)$$

Dies führt jedoch auf einen Widerspruch:

$$\begin{aligned} \langle M_d \rangle \in D_f &\stackrel{(*)}{\Rightarrow} M_d(\langle M_d \rangle) \text{ verw.} \stackrel{(**)}{\Rightarrow} \langle M_d \rangle \notin D_f \quad \text{!} \\ \langle M_d \rangle \notin D_f &\stackrel{(*, **)}{\Rightarrow} M_d(\langle M_d \rangle) \text{ akz.} \stackrel{(**)}{\Rightarrow} \langle M_d \rangle \in D_f \quad \text{!} \end{aligned}$$

■

Eine interessante Frage ist nun, wieviel Zeit eine DTM benötigt um die Sprache  $D_f$  zu entscheiden. Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, dass  $D_f$  i.a. sehr hohe Komplexität haben kann.

## 4.2 Das Gap-Theorem

**Satz 35** (Gap-Theorem).

Es gibt eine rekursive Funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit

$$\text{DTIME}(2^{f(n)}) = \text{DTIME}(f(n)).$$

*Beweis.* Wir definieren  $f(n) \geq n + 2$  so, dass für jede  $2^{f(n)}$ -zeitb. DTM  $M$  gilt:

$$\text{time}_M(x) \leq f(|x|) \text{ für fast alle Eingaben } x.$$

Betrachte hierzu das Prädikat:

$$P(k, t) : t \geq k + 2 \text{ und für } i = 1, \dots, k \text{ und alle } x \in \Sigma_i^k \text{ gilt:} \\ \text{time}_{M_i}(x) \notin [t + 1, 2^t].$$

Hierbei bezeichnet  $\Sigma_i$  das Eingabealphabet von  $M_i$ . Da für jedes  $n$  alle  $t \geq \max\{\text{time}_{M_i}(x) < \infty \mid 1 \leq i \leq n, x \in \Sigma_i^n\}$  das Prädikat  $P(n, t)$  erfüllen, können wir  $f(n)$  wie folgt induktiv definieren:

$$f(n) = \begin{cases} 2, & n = 0, \\ \min\{t \geq f(n-1) + n \mid P(n, t)\}, & n > 0. \end{cases}$$

Da  $P$  entscheidbar ist, ist  $f$  rekursiv. Um zu zeigen, dass jede Sprache  $L \in \text{DTIME}(2^{f(n)})$  bereits in  $\text{DTIME}(f(n))$  enthalten ist, sei  $M_k$  eine beliebige  $2^{f(n)}$ -zeitbeschränkte DTM mit  $L(M_k) = L$ . Dann muss  $M_k$  alle Eingaben  $x$  mit  $|x| \geq k$  in Zeit  $\text{time}_{M_k}(x) \leq f(n)$  ( $n = |x|$ ) entscheiden, da andernfalls  $P(n, f(n))$  verletzt wäre. Folglich ist  $L \in \text{DTIME}(f(n))$ , da die endlich vielen Eingaben  $x$  mit  $|x| < k$  durch table-lookup in Zeit  $|x| + 2$  entscheidbar sind. ■

Es ist leicht zu sehen, dass der Beweis des Gap-Theorems für jede rekursive Funktion  $g$  eine rekursive Zeitschranke  $f$  liefert, so dass  $\text{DTIME}(g(f(n))) = \text{DTIME}(f(n))$  ist. Folglich ist  $D_f$  nicht in Zeit  $g(f(n))$  entscheidbar.

### 4.3 Zeit- und Platzhierarchiesätze

Wie der folgende Satz zeigt, ist  $D_f$  für jede echte Komplexitätsfunktion  $f$  mit einem relativ geringen Mehraufwand entscheidbar. Da die Rechenressourcen bei praktisch relevanten Komplexitätsklassen durch eine echte Komplexitätsfunktion  $f$  beschränkt sind, lassen sich daher mit Hilfe von  $D_f$  die wichtigsten deterministischen Zeitkomplexitätsklassen trennen.

**Satz 36.** Für jede echte Komplexitätsfunktion  $f(n) \geq n + 2$  gilt

$$D_f \in \text{DTIME}(nf^2(n)) - \text{DTIME}(f(n)).$$

*Beweis.* Betrachte folgende 4-DTM  $M'$ :

**Initialisierung:**  $M'$  überprüft bei einer Eingabe  $x$  der Länge  $n$  zuerst, ob  $x$  die Kodierung  $\langle M \rangle$  einer  $k$ -DTM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$  ist. Falls ja, erzeugt  $M'$  die Startkonfiguration  $K_x$  von  $M$  bei Eingabe  $x = \langle M \rangle$ , wobei sie die Inhalte von  $k$  übereinander liegenden Feldern der Bänder von  $M$  auf ihrem 2. Band in je einem Block von  $kb$ ,  $b = \lceil \log_2(\|Q\| + \|\Gamma\| + 6) \rceil$ , Feldern speichert und den aktuellen Zustand von  $M$  zusammen mit den gerade von  $M$  gelesenen Zeichen auf ihrem 3. Band notiert (Letztere werden zusätzlich auf dem 2. Band markiert). Hierfür benötigt  $M'$  Zeit  $\mathcal{O}(kbn) = \mathcal{O}(n^2)$ . Abschließend erzeugt  $M'$  auf dem 4. Band den String  $1^{f(n)}$  in Zeit  $\mathcal{O}(f(n))$ .

**Simulation:**  $M'$  simuliert jeden Rechenschritt von  $M$  wie folgt: Zunächst inspiziert  $M'$  die auf dem 1. Band gespeicherte Kodierung von  $M$ , um die durch den Inhalt des 3. Bandes bestimmte Aktion von  $M$  zu ermitteln. Diese führt sie sodann auf dem 2. Band aus und aktualisiert dabei auf dem 3. Band den Zustand und die gelesenen Zeichen von  $M$ . Schließlich vermindert  $M'$  noch auf dem 4. Band die Anzahl der Einsen um 1. Insgesamt benötigt  $M'$  für die Simulation eines Rechenschrittes von  $M$  Zeit  $\mathcal{O}(kbf(n)) = \mathcal{O}(n \cdot f(n))$ .

**Akzeptanzverhalten:**  $M'$  bricht die Simulation ab, sobald  $M$  stoppt oder der Zähler auf Band 4 den Wert 0 erreicht.  $M'$  hält genau dann im Zustand  $q_{\text{ja}}$ , wenn die Simulation von  $M$  im Zustand  $q_{\text{nein}}$  endet.

Nun ist leicht zu sehen, dass  $M'$   $\mathcal{O}(n \cdot f(n)^2)$ -zeitbeschränkt ist und die Sprache  $D_f$  entscheidet. ■

**Korollar 37.** (Zeithierarchiesatz)

Für jede echte Komplexitätsfunktion  $f(n) \geq n + 2$  gilt

$$\text{DTIME}(n \cdot f(n)^2) - \text{DTIME}(f(n)) \neq \emptyset$$

**Korollar 38.**

$$\text{P} \subsetneq \text{E} \subsetneq \text{EXP}$$

*Beweis.*

$$\begin{aligned} \text{P} &= \bigcup_{c>0} \text{DTIME}(n^c + c) \subseteq \text{DTIME}(2^n) \\ &\subsetneq \text{DTIME}(n2^{2n}) \subseteq \text{E} = \bigcup_{c>0} \text{DTIME}(2^{cn}) \subseteq \text{DTIME}(2^{n^2}) \\ &\subsetneq \text{DTIME}(n2^{2n^2}) \subseteq \bigcup_{c>0} \text{DTIME}(2^{n^c+c}) = \text{EXP} \end{aligned}$$

Aus dem Beweis von Satz 36 können wir weiterhin die Existenz einer universellen TM folgern.

**Korollar 39.** Es gibt eine universelle 3-DTM  $U$ , die bei Eingabe  $\langle M, x \rangle$  eine Simulation von  $M$  bei Eingabe  $x$  durchführt und dasselbe Ergebnis liefert:

$$U(\langle M, x \rangle) = M(x)$$

Hierbei können wir annehmen, dass  $U$  verwirft, falls die Eingabe keine zulässige Kodierung eines Paares  $(M, x)$  mit  $x \in \Sigma^*$  darstellt.

Wir bemerken, dass sich mit Hilfe einer aufwändigeren Simulationstechnik von  $k$ -DTMs durch eine 2-DTM in Zeit  $\mathcal{O}(f(n) \cdot \log f(n))$  folgende schärfere Form des Zeithierarchiesatzes erhalten lässt (ohne Beweis).

**Satz 40.** *Sei  $f(n) \geq n + 2$  eine echte Komplexitätsfunktion und gelte*

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n) \cdot \log g(n)}{f(n)} = 0.$$

Dann ist

$$\text{DTIME}(f(n)) \setminus \text{DTIME}(g(n)) \neq \emptyset.$$

Für  $g(n) = n^2$  erhalten wir beispielsweise die echten Inklusionen  $\text{DTIME}(g(n)) \subsetneq \text{DTIME}(f(n))$  für die Funktionen  $f(n) = n^3, n^2 \log^2 n$  und  $n^2 \log n \log \log n$ . In den Übungen zeigen wir, dass die Inklusion

$$\text{DTIME}(n^k) \subsetneq \text{DTIME}(n^k \log^a n)$$

tatsächlich für alle  $k \geq 1$  und  $a > 0$  echt ist. Für Platzklassen erhalten wir sogar eine noch feinere Hierarchie (siehe Übungen).

**Satz 41** (Platzhierarchiesatz). *Sind  $g(n), f(n) \geq 2$  und ist  $f$  eine echte Komplexitätsfunktion mit*

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)} = 0,$$

dann ist

$$\text{DSPACE}(f(n)) \setminus \text{DSPACE}(g(n)) \neq \emptyset.$$

Damit lässt sich im Fall  $g(n) \leq f(n)$  die Frage, ob die Inklusion von  $\text{DSPACE}(g(n))$  in  $\text{DSPACE}(f(n))$  echt ist, eindeutig beantworten: Sie ist genau dann echt, wenn  $\liminf_{n \rightarrow \infty} g(n)/f(n) = 0$  ist, da andernfalls  $f(n) = O(g(n))$  ist und somit beide Klassen gleich sind.

**Korollar 42.**

$$\text{L} \subsetneq \text{L}^2 \subsetneq \text{DCSL} \subseteq \text{CSL} \subsetneq \text{PSPACE} \subsetneq \text{ESPACE} \subsetneq \text{EXPSPACE}.$$

Durch Kombination der Beweistechnik von Satz 41 mit der Technik von Immerman und Szelepcsényi erhalten wir auch für nichtdeterministische Platzklassen eine sehr fein abgestufte Hierarchie.

**Satz 43** (Nichtdeterministischer Platzhierarchiesatz). *Sind  $g(n), f(n) \geq 2$  und ist  $f$  eine echte Komplexitätsfunktion mit*

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)} = 0,$$

dann ist

$$\text{NSPACE}(f(n)) \setminus \text{NSPACE}(g(n)) \neq \emptyset.$$

Ob sich auch der Zeithierarchiesatz auf nichtdeterministische Klassen übertragen lässt, ist dagegen nicht bekannt. Hier gilt jedoch folgender Hierarchiesatz.

**Satz 44** (Nichtdeterministischer Zeithierarchiesatz). *Sei  $f(n) \geq n + 2$  eine echte Komplexitätsfunktion und gelte*

$$g(n + 1) = o(f(n)).$$

Dann ist

$$\text{NTIME}(g(n)) \subsetneq \text{NTIME}(f(n)).$$

*Beweis.* Sei  $M_1, M_2, \dots$  eine Aufzählung aller 2-NTMs. Für  $x \in \{0, 1, \#\}^*$  sei

$$i(x) = \begin{cases} i, & x = 0^k \# \langle M_i \rangle \\ 1, & \text{sonst} \end{cases}$$

und  $x^+$  ( $x^-$ ) sei der lexikografische Nachfolger (bzw. Vorgänger) von  $x$  in  $\{0, 1, \#\}^*$ . Wir ordnen jedem  $x \in \{0, 1, \#\}^*$  ein Intervall  $I_x = [s(x), s(x^+) - 1]$  zu, wobei die Funktion  $s$  induktiv durch

$$s(x) = \begin{cases} 0, & x = \varepsilon \\ h(s(x^-) + |x|) + 1, & \text{sonst} \end{cases}$$

definiert ist. Hierbei ist  $h(n) \geq 2^n$  eine monotone Funktion mit folgenden Eigenschaften:

- die Sprache

$$D = \{0^s \# \langle M_i \rangle \mid M_i(0^s) \text{ akz. nicht in } \leq f(s) \text{ Schritten}\}$$

ist von einer 2-NTM  $M_D$  in Zeit  $\text{time}_{M_D}(x) \leq h(|x|)$  entscheidbar.

- die Funktion  $0^n \rightarrow 0^{h(n)}$  ist von einem Transducer  $T$  in Zeit  $h(n) + 1$  berechenbar, d.h.  $T(0^n)$  schreibt in jedem Rechenschritt (außer dem ersten) eine weitere Null auf's Ausgabeband.

Betrachte folgende NTM  $M$ :

---

```

1  input  $0^n$ 
2     $x := \varepsilon$ 
3     $s := 0$ 
4    while  $h(s + |x|) + 1 \leq n$  do
5       $s := h(s + |x|) + 1$ 
6       $x := x^+$ 
7    if  $n < h(s + |x|)$  then (*  $s = s(x) \leq n < s(x^+) - 1$  *)
8      akz. falls  $M_{i(x)}(0^{n+1})$  in  $\leq \frac{f(n)}{|\langle M_{i(x)} \rangle|}$  Schritten akz.
9    else (*  $n = s(x^+) - 1$  *)
10   akz. falls  $0^s \# \langle M_{i(x)} \rangle \in D$  ist

```

---

Es ist leicht zu sehen, dass  $M$   $\mathcal{O}(f(n))$ -zeitb. und somit  $L = L(M) \in \text{NTIME}(f(n))$  enthalten ist. Dies liegt daran, dass

- die Berechnung von  $x$  und  $s = s(x)$  mit  $n \in I_x$  in der while-Schleife wegen  $h(n) \geq 2^n$  und der Eigenschaften von  $T$  in Zeit  $\mathcal{O}(n)$  ausführbar, sowie
- die Frage, ob  $M_{i(x)}(0^{n+1})$  in  $\leq \frac{f(n)}{|\langle M_{i(x)} \rangle|}$  Schritten akz., in Zeit  $\mathcal{O}(f(n))$  und
- die Frage, ob  $0^s \# \langle M_{i(x)} \rangle \in D$  enthalten ist, in Zeit  $h(|0^s \# \langle M_{i(x)} \rangle|) \leq h(s + |x|) = n$  entscheidbar ist.

$L$  kann aber nicht in  $\text{NTIME}(g(n))$  enthalten sein, da sonst eine Konstante  $c$  und eine 2-NTM  $M_i$  ex. würden mit  $L(M_i) = L$  und  $\text{time}_{M_i}(0^n) \leq cg(n)$  für fast alle  $n$  (siehe Übungen; Simulation von NTMs durch 2-NTMs). Wählen wir nun  $k \geq 0$  so groß, dass für  $x = 0^k \# \langle M_i \rangle$  und alle  $n \geq s(x)$  die Ungleichung  $|\langle M_i \rangle| \text{time}_{M_i}(0^{n+1}) \leq f(n)$  gilt, so folgt für alle  $n \in [s(x), s(x^+) - 2]$ :

$$0^n \in L(M) \Leftrightarrow 0^{n+1} \in L(M_i),$$

was  $0^{s(x)} \in L \Leftrightarrow 0^{s(x^+)-1} \in L$  impliziert. Zudem gilt

$$0^{s(x^+)-1} \in L(M) \Leftrightarrow 0^{s(x)} \# \langle M_i \rangle \in D \Leftrightarrow 0^{s(x)} \notin L(M_i),$$

was wegen  $L(M) = L = L(M_i)$  ein Widerspruch ist. ■

Satz 44 liefert für langsam wachsende Zeitschranken eine feinere Hierarchie als Satz 40. Beispielsweise impliziert Satz 44, dass  $\text{NTIME}(n^k)$  für jede unbeschränkte monotone Funktion  $h$  echt in der Klasse  $\text{NTIME}(n^k h(n))$  enthalten ist, da  $(n+1)^k = \mathcal{O}(n^k) = o(n^k h(n))$  ist.

Für schnell wachsende Zeitschranken liefert dagegen Satz 40 eine feinere Hierarchie. So impliziert Satz 40 zum Beispiel, dass die Klasse  $\text{DTIME}(2^{2^n})$  für jede unbeschränkte monotone Funktion  $h$  echt in  $\text{DTIME}(h(n)2^n 2^{2^n})$  enthalten ist, während sich  $\text{NTIME}(2^{2^n})$  mit Satz 44 nur von  $\text{NTIME}(h(n)2^{2^{n+1}}) = \text{NTIME}(h(n)2^{2^n} 2^{2^n})$  separieren lässt.

## 5 Reduktionen

### 5.1 Logspace-Reduktionen

Oft können wir die Komplexitäten zweier Probleme  $A$  und  $B$  vergleichen, indem wir die Frage, ob  $x \in A$  ist, auf eine Frage der Form  $y \in B$  zurückführen. Lässt sich  $y$  leicht aus  $x$  berechnen, so kann jeder Algorithmus für  $B$  in einen Algorithmus für  $A$  verwandelt werden, der vergleichbare Komplexität hat.

**Definition 45.** Seien  $A$  und  $B$  Sprachen über einem Alphabet  $\Sigma$ .  $A$  ist auf  $B$  **logspace-reduzierbar** (in Zeichen:  $A \leq_m^{\log} B$  oder einfach  $A \leq B$ ), falls eine Funktion  $f \in \text{FL}$  existiert, so dass für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt,

$$x \in A \Leftrightarrow f(x) \in B.$$

**Lemma 46.**  $\text{FL} \subseteq \text{FP}$ .

*Beweis.* Sei  $f \in \text{FL}$  und sei  $M$  ein logarithmisch platzbeschränkter Transducer (kurz: FL-Transducer), der  $f$  berechnet. Da  $M$  bei einer Eingabe der Länge  $n$  nur  $2^{O(\log n)}$  verschiedene Konfigurationen einnehmen kann, ist  $M$  dann auch polynomiell zeitbeschränkt. ■

**Beispiel 47.** Wir reduzieren das Hamiltonkreisproblem auf das Erfüllbarkeitsproblem SAT für aussagenlogische Formeln.

**Hamiltonkreisproblem (HAM):**

**Gegeben:** Ein Graph  $G = (V, E)$ .

**Gefragt:** Hat  $G$  einen Hamiltonkreis?

**Erfüllbarkeitsproblem für boolesche Formeln (SAT):**

**Gegeben:** Eine boolesche Formel  $F$  über  $n$  Variablen.

**Gefragt:** Ist  $F$  erfüllbar?

Hierzu benötigen wir eine Funktion  $f \in \text{FL}$ , die einen Graphen  $G = (V, E)$  so in eine Formel  $f(G) = F_G$  transformiert, dass  $F_G$  genau dann erfüllbar ist, wenn  $G$  hamiltonsch ist. Wir konstruieren  $F_G$  über den Variablen  $x_{1,1}, \dots, x_{n,n}$ , wobei  $x_{i,j}$  für die Aussage steht, dass Knoten  $j \in V = \{1, \dots, n\}$  in der Rundreise an  $i$ -ter Stelle besucht wird. Betrachte nun folgende Klauseln.

a) An der  $i$ -ten Stelle wird mindestens ein Knoten besucht:

$$x_{i,1} \vee x_{i,2} \vee \dots \vee x_{i,n}, \quad i = 1, \dots, n.$$

b) An der  $i$ -ten Stelle wird höchstens ein Knoten besucht:

$$\neg x_{i,j} \vee \neg x_{i,k}, \quad i = 1, \dots, n, \quad 1 \leq j < k \leq n.$$

c) Jeder Knoten  $j$  wird mindestens einmal besucht:

$$x_{1,j} \vee \dots \vee x_{n,j}, \quad j = 1, \dots, n.$$

d) Für  $(i, j) \notin E$  wird Knoten  $j$  nicht unmittelbar nach Knoten  $i$  besucht:

$$\neg x_{1,i} \vee \neg x_{2,j}, \dots, \neg x_{n-1,i} \vee \neg x_{n,j}, \neg x_{n,i} \vee \neg x_{1,j}, \quad (i, j) \notin E.$$

Die Klauseln in a) und b) stellen sicher, dass die Relation  $\pi = \{(i, j) \mid x_{i,j} = 1\}$  eine Funktion  $\pi : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$  ist. Bedingung c) besagt, dass  $\pi$  surjektiv (und damit auch bijektiv) ist, und d) sorgt dafür, dass der durch  $\pi$  beschriebene Kreis entlang der Kanten von  $G$  verläuft. Bilden wir daher  $F_G(x_{1,1}, \dots, x_{n,n})$  als Konjunktion dieser

$$n + n \binom{n}{2} + n + n \left[ \binom{n}{2} - \|E\| \right] = O(n^3)$$

Klauseln, so ist leicht zu sehen, dass die Reduktionsfunktion  $f$  in FL berechenbar ist und  $G$  genau dann einen Hamiltonkreis besitzt, wenn  $F_G$  erfüllbar ist. ◀

Ein zentraler Begriff in der Komplexitätstheorie ist die Vollständigkeit einer Sprache für eine Komplexitätsklasse.

**Definition 48.**

- Sei  $C$  eine Sprachklasse. Eine Sprache  $L$  heißt **C-hart** (bzgl.  $\leq$ ), falls für alle Sprachen  $A \in C$  gilt,  $A \leq L$ .
- Eine  $C$ -harte Sprache, die zur Klasse  $C$  gehört, heißt **C-vollständig**.
- $C$  heißt **abgeschlossen** unter  $\leq$ , falls gilt:

$$B \in C, A \leq B \Rightarrow A \in C.$$

**Lemma 49.**

- Die  $\leq_m^{\log}$ -Reduzierbarkeit ist reflexiv und transitiv.
- Die Klassen  $L, NL, NP, co-NP, PSPACE, EXP$  und  $EXPSPACE$  sind unter  $\leq$  abgeschlossen.
- Sei  $L$  vollständig für eine Klasse  $C$ , die unter  $\leq$  abgeschlossen ist. Dann gilt

$$C = \{A \mid A \leq L\}.$$

*Beweis.* Siehe Übungen. ■

**Definition 50.** Ein **boolescher Schaltkreis**  $c$  mit  $n$  Eingängen ist eine Folge  $(g_1, \dots, g_m)$  von **Gattern**

$$g_l \in \{0, 1, x_1, \dots, x_n, (\neg, j), (\wedge, j, k), (\vee, j, k)\}$$

mit  $1 \leq j, k < l$ . Der am Gatter  $g_l$  berechnete Wert bei Eingabe  $a = a_1 \cdots a_n$  ist induktiv wie folgt definiert.

|          |   |   |       |              |                  |                                  |
|----------|---|---|-------|--------------|------------------|----------------------------------|
| $g_l$    | 0 | 1 | $x_i$ | $(\neg, j)$  | $(\wedge, j, k)$ | $(\vee, j, k)$                   |
| $g_l(a)$ | 0 | 1 | $a_i$ | $1 - g_j(a)$ | $g_j(a)g_k(a)$   | $g_j(a) + g_k(a) - g_j(a)g_k(a)$ |

Der Schaltkreis  $c$  berechnet die boolesche Funktion  $c(a) = g_m(a)$ . Er heißt **erfüllbar**, wenn es eine Eingabe  $a \in \{0, 1\}^n$  mit  $c(a) = 1$  gibt.

**Bemerkung:** Die Anzahl der Eingänge eines Gatters  $g$  wird als **Fan-in** von  $g$  bezeichnet, die Anzahl der Ausgänge (also die Anzahl der Gatter, die  $g$  als Eingabe benutzen) als **Fanout**. Boolesche Formeln entsprechen also den booleschen Schaltkreisen mit (maximalem) Fanout 1 und umgekehrt.

Ähnlich wie bei booleschen Formeln sind auch für Schaltkreise die beiden folgenden Entscheidungsprobleme von Interesse.

**Auswertungsproblem für boolesche Schaltkreise (CIRVAL):**

**Gegeben:** Ein boolescher Schaltkreis  $c$  mit  $n$  Eingängen und eine Eingabe  $a \in \{0, 1\}^n$ .

**Gefragt:** Ist der Wert von  $c(a)$  gleich 1?

**Erfüllbarkeitsproblem für boolesche Schaltkreise (CIRSAT):**

**Gegeben:** Ein boolescher Schaltkreis  $c$  mit  $n$  Eingängen.

**Gefragt:** Ist  $c$  erfüllbar?

Im folgenden Beispiel führen wir die Lösung des Erreichbarkeitsproblems in gerichteten Graphen auf die Auswertung von booleschen Schaltkreisen zurück.

**Beispiel 51.** Für die Reduktion  $REACH \leq CIRVAL$  benötigen wir eine Funktion  $f \in FL$  mit der Eigenschaft, dass für alle Graphen  $G$  gilt:

$$G \in REACH \Leftrightarrow f(G) \in CIRVAL.$$

Der Schaltkreis  $f(G)$  besteht aus den Gattern

$$g_{i,j,k'} \text{ und } h_{i,j,k} \text{ mit } 1 \leq i, j, k \leq n \text{ und } 0 \leq k' \leq n,$$

wobei die Gatter  $g_{i,j,0}$  für  $1 \leq i, j \leq n$  die booleschen Konstanten

$$g_{i,j,0} = \begin{cases} 1, & i = j \text{ oder } (i, j) \in E, \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

sind und für  $k = 1, 2, \dots, n$  gilt,

$$\begin{aligned} h_{i,j,k} &= g_{i,k,k-1} \wedge g_{k,j,k-1}, \\ g_{i,j,k} &= g_{i,j,k-1} \vee h_{i,j,k}. \end{aligned}$$

Dann folgt

$$\begin{aligned} g_{i,j,k} = 1 &\Leftrightarrow \text{es existiert in } G \text{ ein Pfad von } i \text{ nach } j, \text{ der} \\ &\text{nur Zwischenknoten } l \leq k \text{ durchläuft,} \\ h_{i,j,k} = 1 &\Leftrightarrow \text{es existiert in } G \text{ ein Pfad von } i \text{ nach } j, \text{ der} \\ &\text{den Knoten } k, \text{ aber keinen Knoten } l > k \\ &\text{durchläuft.} \end{aligned}$$

Wählen wir also  $g_{1,n,n}$  als Ausgabegatter, so liefert der aus diesen Gattern aufgebaute Schaltkreis  $c$  genau dann den Wert 1, wenn es in  $G$  einen Weg von Knoten 1 zu Knoten  $n$  gibt. Es ist auch leicht zu sehen, dass die Reduktionsfunktion  $f$  in FL berechenbar ist.  $\triangleleft$

Der in Beispiel 51 konstruierte Schaltkreis hat Tiefe  $2n$ . In den Übungen werden wir sehen, dass sich REACH auch auf die Auswertung eines Schaltkreises der Tiefe  $O(\log^2 n)$  reduzieren lässt. Als nächstes leiten wir Vollständigkeitsresultate für CIRVAL und CIRSAT her.

## 5.2 P-vollständige Probleme und polynomielle Schaltkreiskomplexität

**Satz 52.** CIRVAL ist P-vollständig.

*Beweis.* Es ist leicht zu sehen, dass CIRVAL  $\in$  P ist. Um zu zeigen, dass CIRVAL hart für P ist, müssen wir für jede Sprache  $L \in$  P eine Funktion  $f \in$  FL finden, die  $L$  auf CIRVAL reduziert, d.h. es muss für alle Eingaben  $x$  die Äquivalenz  $x \in L \Leftrightarrow f(x) \in$  CIRVAL gelten.

Zu  $L \in$  P existiert eine 1-DTM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0)$ , die  $L$  in Zeit  $n^c + c$  entscheidet. Wir beschreiben die Rechnung von  $M(x)$ ,  $|x| = n$ , durch

## 5.2 P-vollständige Probleme und polynomielle Schaltkreiskomplexität

eine Tabelle  $T = (T_{i,j})$ ,  $(i,j) \in \{1, \dots, n^c + c\} \times \{1, \dots, n^c + c + 2\}$ , mit

$$T_{i,j} = \begin{cases} (q_i, a_{i,j}), & \text{nach } i \text{ Schritten besucht } M \text{ das } j\text{-te Bandfeld,} \\ a_{i,j}, & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei  $q_i$  der Zustand von  $M(x)$  nach  $i$  Rechenschritten ist und  $a_{i,j}$  das nach  $i$  Schritten an Position  $j$  befindliche Zeichen auf dem Arbeitsband ist.  $T = (T_{i,j})$  kodiert also in ihren Zeilen die von  $M(x)$  der Reihe nach angenommenen Konfigurationen. Dabei

- überspringen wir jedoch alle Konfigurationen, bei denen sich der Kopf auf dem ersten Bandfeld befindet (zur Erinnerung: In diesem Fall wird der Kopf sofort wieder nach rechts bewegt) und
- behalten die in einem Schritt  $i < n^c + c$  erreichte Endkonfiguration bis zum Zeitpunkt  $i = n^c + c$  bei.

Da  $M$  in  $n^c + c$  Schritten nicht das  $(n^c + c + 2)$ -te Bandfeld erreichen kann, ist  $T_{i,1} = \triangleright$  und  $T_{i,n^c+c+2} = \sqcup$  für  $i = 1, \dots, n^c + c$ . Außerdem nehmen wir an, dass  $M$  bei jeder Eingabe  $x$  auf dem zweiten Bandfeld auf einem Blank hält, d.h. es gilt

$$x \in L \Leftrightarrow T_{n^c+c,2} = (q_{ja}, \sqcup).$$

Da  $T$  nicht mehr als  $l = \|\Gamma\| + \|(Q \cup \{q_h, q_{ja}, q_{nein}\}) \times \Gamma\|$  verschiedene Tabelleneinträge besitzt, können wir jeden Eintrag  $T_{i,j}$  durch eine Bitfolge  $t_{i,j,1} \dots t_{i,j,m}$  der Länge  $m = \lceil \log_2 l \rceil$  kodieren.

Da der Eintrag  $T_{i,j}$  im Fall  $i \in \{2, \dots, n^c + c\}$  und  $j \in \{2, \dots, n^c + c + 1\}$  eine Funktion  $T_{i,j} = g(T_{i-1,j-1}, T_{i-1,j}, T_{i-1,j+1})$  der drei Einträge  $T_{i-1,j-1}$ ,  $T_{i-1,j}$  und  $T_{i-1,j+1}$  ist, existieren für  $k = 1, \dots, m$  Schaltkreise  $c_k$  mit

$$\begin{aligned} t_{i,j,k} &= \\ &c_k(t_{i-1,j-1,1} \dots t_{i-1,j-1,m}, t_{i-1,j,1} \dots t_{i-1,j,m}, t_{i-1,j+1,1} \dots t_{i-1,j+1,m}). \end{aligned}$$

Die Reduktionsfunktion  $f$  liefert nun bei Eingabe  $x$  folgenden Schaltkreis  $c_x$  mit 0 Eingängen.



- Für jeden der  $n^c + c + 2 + 2(n^c + c - 1) = 3(n^c + c)$  Randeinträge  $T_{i,j}$  mit  $i = 1$  oder  $j \in \{1, n^c + c + 2\}$  enthält  $c_x$   $m$  konstante Gatter  $c_{i,j,k} = t_{i,j,k}$ ,  $k = 1, \dots, m$ , die diese Einträge kodieren.
- Für jeden der  $(n^c + c - 1)(n^c + c)$  übrigen Einträge  $T_{i,j}$  enthält  $c_x$  für  $k = 1, \dots, m$  je eine Kopie  $c_{i,j,k}$  von  $c_k$ , deren  $3m$  Eingänge mit den Ausgängen der Schaltkreise  $c_{i-1,j-1,1} \cdots c_{i-1,j-1,m}, c_{i-1,j,1} \cdots c_{i-1,j,m}, c_{i-1,j+1,1} \cdots c_{i-1,j+1,m}$  verdrahtet sind.
- Als Ausgabegatter von  $c_x$  fungiert das Gatter  $c_{n^c+c,2,1}$ , wobei wir annehmen, dass das erste Bit der Kodierung von  $(q_{ja}, \sqcup)$  eine Eins und von  $(q_{nein}, \sqcup)$  eine Null ist.

Nun lässt sich induktiv über  $i = 1, \dots, n^c + c$  zeigen, dass die von den Schaltkreisen  $c_{i,j,k}$ ,  $j = 1, \dots, n^c + c$ ,  $k = 1, \dots, m$  berechneten Werte die Tabelleneinträge  $T_{i,j}$ ,  $j = 1, \dots, n^c + c$ , kodieren. Wegen

$$x \in L \Leftrightarrow T_{n^c+c,2} = (q_{ja}, \sqcup) \Leftrightarrow c_x = 1$$

folgt somit die Korrektheit der Reduktion. Außerdem ist leicht zu sehen, dass  $f$  in logarithmischem Platz berechenbar ist, da ein  $O(\log n)$ -platzbeschränkter Transducer existiert, der bei Eingabe  $x$

- zuerst die  $3(n^c + c)$  konstanten Gatter von  $c_x$  ausgibt und danach
- die  $m(n^c + c - 1)(n^c + c)$  Kopien der Schaltkreise  $c_1, \dots, c_k$  erzeugt und diese Kopien richtig verdrahtet. ■

Eine leichte Modifikation des Beweises von Satz 52 liefert folgendes Resultat.

**Korollar 53.** Sei  $L \subseteq \{0,1\}^*$  eine beliebige Sprache in P. Dann existiert eine Funktion  $f \in \text{FL}$ , die bei Eingabe  $1^n$  einen Schaltkreis  $c_n$  mit  $n$  Eingängen berechnet, so dass für alle  $x \in \{0,1\}^n$  gilt:

$$x \in L \Leftrightarrow c_n(x) = 1.$$

Korollar 53 besagt insbesondere, dass es für jede Sprache  $L \subseteq \{0,1\}^*$  in P eine Schaltkreisfamilie  $(c_n)_{n \geq 0}$  polynomieller Größe gibt, so dass

$c_n$  für alle Eingaben  $x \in \{0,1\}^n$  die charakteristische Funktion von  $L$  berechnet.

Die Turingmaschine ist ein **uniformes** Rechenmodell, da alle Instanzen eines Problems von einer einheitlichen Maschine entschieden werden. Im Gegensatz hierzu stellen Schaltkreise ein **nichtuniformes** Berechnungsmodell dar, da für jede Eingabegröße  $n$  ein anderer Schaltkreis  $c_n$  verwendet wird. Um im Schaltkreis-Modell eine unendliche Sprache entscheiden zu können, wird also eine unendliche Folge  $c_n$ ,  $n \geq 0$ , von Schaltkreisen benötigt. Probleme, für die Schaltkreisfamilien polynomieller Größe existieren, werden zur Klasse PSK zusammengefasst.

**Definition 54.**

- a) Eine Sprache  $L$  über dem Binäralphabet  $\{0,1\}$  hat **polynomielle Schaltkreiskomplexität** (kurz:  $L \in \text{PSK}$ ), falls es eine Folge von booleschen Schaltkreisen  $c_n$ ,  $n \geq 0$ , mit  $n$  Eingängen und  $n^{O(1)} + O(1)$  Gattern gibt, so dass für alle  $x \in \{0,1\}^*$  gilt:

$$x \in L \Leftrightarrow c_{|x|}(x) = 1.$$

- b) Eine Sprache  $L$  über einem Alphabet  $\Sigma = \{a_0, \dots, a_{k-1}\}$  hat **polynomielle Schaltkreiskomplexität** (kurz:  $L \in \text{PSK}$ ), falls die Binärokodierung

$$\text{bin}(L) = \{\text{bin}(x_1) \cdots \text{bin}(x_n) \mid x_1 \cdots x_n \in L\}$$

von  $L$  polynomielle Schaltkreiskomplexität hat. Hierbei kodieren wir  $a_i$  durch die  $m$ -stellige Binärdarstellung  $\text{bin}(i) \in \{0,1\}^m$  von  $i$ , wobei  $m = \max\{1, \lceil \log_2 k \rceil\}$  ist.

**Korollar 55** (Savage 1972).

Es gilt  $\text{P} \subseteq \text{PSK}$ .

Ob auch alle NP-Sprachen polynomielle Schaltkreiskomplexität haben, ist ein berühmtes offenes Problem. Gelingt es nämlich, für ein

NP-Problem superpolynomielle untere Schranken für die Schaltkreisgröße zu zeigen, so folgt mit dem Resultat von Savage  $P \neq NP$ . Selbst für NEXP ist die Inklusion in PSK offen. Dagegen zeigt ein einfaches Diagonalisierungsargument, dass in EXPSPACE Sprachen mit superpolynomieller Schaltkreiskomplexität existieren. Wir werden später sehen, dass bereits die Annahme  $NP \subseteq PSK$  schwerwiegende Konsequenzen für uniforme Komplexitätsklassen hat.

Es ist nicht schwer zu sehen, dass die Inklusion  $P \subseteq PSK$  echt ist. Hierzu betrachten wir Sprachen über einem einelementigen Alphabet.

**Definition 56.** Eine Sprache  $T$  heißt **tally** (kurz:  $T \in TALLY$ ), falls jedes Wort  $x \in T$  die Form  $x = 1^n$  hat.

Es ist leicht zu sehen, dass alle tally Sprachen polynomielle Schaltkreiskomplexität haben.

**Proposition 57.**  $TALLY \subseteq PSK$ .

Andererseits wissen wir aus der Berechenbarkeitstheorie, dass es tally Sprachen  $T$  gibt, die nicht einmal rekursiv aufzählbar sind (etwa wenn  $T$  das Komplement des Halteproblems unär kodiert). Folglich sind in PSK beliebig schwierige Sprachen (im Sinne der Berechenbarkeit) enthalten.

**Korollar 58.**  $PSK \not\subseteq RE$ .

### 5.3 NP-vollständige Probleme

Wir wenden uns nun der NP-Vollständigkeit von CIRSAT zu. Hierbei wird sich folgende Charakterisierung von NP als nützlich erweisen.

**Definition 59.** Sei  $B \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache und sei  $p$  ein Polynom.

- a)  $B$  heißt  **$p$ -balanciert**, falls  $B$  nur Strings der Form  $x\#y$  mit  $|y| = p(|x|)$  enthält.

- b) Die Sprache  $\exists B$  ist definiert durch

$$\exists B = \{x \in \Sigma^* \mid \exists y \in \{0,1\}^* : x\#y \in B\}.$$

- c) Für eine Sprachklasse  $C$  sei

$$\exists C = \{\exists B \mid B \in C \text{ ist polynomiell balanciert}\}.$$

Jeder String  $y \in \{0,1\}^*$  mit  $x\#y \in B$  wird auch als **Zeuge** (engl. *witness, certificate*) für die Zugehörigkeit von  $x$  zu  $\exists B$  bezeichnet.

**Satz 60** (Zeugen-Charakterisierung von NP).  
 $NP = \exists P$ .

*Beweis.* Zu jeder NP-Sprache  $A \subseteq \Sigma^*$  existiert eine NTM  $M$ , die  $A$  in Zeit  $p(n)$  für ein Polynom  $p$  entscheidet. Dabei können wir annehmen, dass jede Konfiguration höchstens zwei Folgekonfigurationen hat, die entsprechend der zugehörigen Anweisungen angeordnet sind. Folglich lässt sich jede Rechnung von  $M(x)$  durch einen Binärstring  $y$  der Länge  $p(n)$  eindeutig beschreiben. Das Ergebnis der durch  $y$  beschriebenen Rechnung von  $M(x)$  bezeichnen wir mit  $M_y(x)$ . Nun ist leicht zu sehen, dass

$$B = \{x\#y \mid |y| = p(|x|) \text{ und } M_y(x) = \text{ja}\}$$

eine  $p$ -balancierte Sprache in  $P$  mit  $L = \exists B$  ist.

Gilt umgekehrt  $A = \exists B$  für eine  $p$ -balancierte Sprache  $B \in P$ , dann kann  $A$  in Polynomialzeit durch eine NTM  $M$  entschieden werden, die bei Eingabe  $x$  einen String  $y \in \{0,1\}^{p(|x|)}$  geeigneter Länge rät und testet, ob  $x\#y \in B$  ist. Diese Vorgehensweise von nichtdeterministischen Algorithmen wird im Englischen auch als “guess and verify” bezeichnet. ■

**Satz 61.** CIRSAT ist NP-vollständig.

*Beweis.* Es ist leicht zu sehen, dass  $\text{CIRSAT} \in \text{NP}$  ist. Um zu zeigen, dass  $\text{CIRSAT}$  hart für  $\text{NP}$  ist, müssen wir für jede Sprache  $L \in \text{NP}$  eine Funktion  $f \in \text{FL}$  finden, die  $L$  auf  $\text{CIRSAT}$  reduziert, d.h. es muss für alle Eingaben  $x$  die Äquivalenz  $x \in L \Leftrightarrow f(x) \in \text{CIRSAT}$  gelten.

Im Beweis von Satz 60 haben wir gezeigt, dass für jede NP-Sprache  $A \subseteq \Sigma^*$  eine  $p$ -balancierte Sprache  $B \in \text{P}$  mit  $A = \exists B$  existiert,

$$x \in A \Leftrightarrow \exists y \in \{0, 1\}^{p(|x|)} : x \# y \in B.$$

Sei  $m = \lceil \log_2 \|\Sigma \cup \{\#\}\| \rceil$ . Da die Sprache

$$\{ \text{bin}_m(x_1) \cdots \text{bin}_m(x_n) \text{bin}_m(\#)y \mid x_1 \cdots x_n \# y \in B \}$$

in  $\text{P}$  entscheidbar ist, existiert nach Korollar 53 eine  $\text{FL}$ -Funktion  $f$ , die für  $1^n$  einen Schaltkreis  $c_n$  mit  $m(n+1) + p(n)$  Eingängen berechnet, so dass für alle  $x \in \Sigma^*$ ,  $x = x_1 \cdots x_n$ , und  $y \in \{0, 1\}^{p(n)}$  gilt:

$$x \# y \in B \Leftrightarrow c_n(\text{bin}_m(x_1) \cdots \text{bin}_m(x_n) \text{bin}_m(\#)y) = 1.$$

Betrachte nun die Funktion  $g$ , die bei Eingabe  $x$  den Schaltkreis  $c_x$  ausgibt, der sich aus  $c_n$  dadurch ergibt, dass die ersten  $m(n+1)$  Input-Gatter durch konstante Gatter mit den durch  $\text{bin}_m(x_1) \cdots \text{bin}_m(x_n) \text{bin}_m(\#)$  vorgegebenen Werten ersetzt werden. Dann ist auch  $g$  in  $\text{FL}$  berechenbar und es gilt für alle Eingaben  $x$ ,  $|x| = n$ ,

$$\begin{aligned} x \in A &\Leftrightarrow \exists y \in \{0, 1\}^{p(n)} : x \# y \in B \\ &\Leftrightarrow \exists y \in \{0, 1\}^{p(n)} : c_n(\text{bin}_m(x_1) \cdots \text{bin}_m(x_n) \text{bin}_m(\#)y) = 1 \\ &\Leftrightarrow \exists y \in \{0, 1\}^{p(n)} : c_x(y) = 1 \\ &\Leftrightarrow c_x \in \text{CIRSAT}. \end{aligned} \quad \blacksquare$$

Als nächstes zeigen wir, dass auch  $\text{SAT}$   $\text{NP}$ -vollständig ist, indem wir  $\text{CIRSAT}$  auf  $\text{SAT}$  reduzieren. Tatsächlich können wir  $\text{CIRSAT}$  sogar auf ein Teilproblem von  $\text{SAT}$  reduzieren.

**Definition 62.** Eine boolesche Formel  $F$  über den Variablen  $x_1, \dots, x_n$  ist in **konjunktiver Normalform** (kurz **KNF**), falls  $F$  eine Konjunktion

$$F = \bigwedge_{i=1}^m C_i$$

von Disjunktionen  $C_i = \bigvee_{j=1}^{k_i} l_{ij}$  von **Literalen**  $l_{ij} \in \{x_1, \dots, x_n, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n\}$  ist. Hierbei verwenden wir  $\bar{x}$  als abkürzende Schreibweise für  $\neg x$ . Gilt  $k_i \leq k$  für  $i = 1, \dots, m$ , so heißt  $F$  in  **$k$ -KNF**.

Eine Disjunktion  $C = \bigvee_{j=1}^k l_j$  von Literalen wird auch als **Klausel** bezeichnet. Klauseln werden meist als Menge  $C = \{l_1, \dots, l_k\}$  der zugehörigen Literale und KNF-Formeln als Menge  $F = \{C_1, \dots, C_m\}$  ihrer Klauseln dargestellt.

**Erfüllbarkeitsproblem für  $k$ -KNF Formeln ( $k$ -SAT):**

**Gegeben:** Eine boolesche Formel in  $k$ -KNF.

**Gefragt:** Ist  $F$  erfüllbar?

**Beispiel 63.** Die Formel  $F = (x_1 \vee \bar{x}_2) \wedge (\bar{x}_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee \bar{x}_3 \vee x_4)$  ist in 3-KNF und lässt sich in Mengennotation durch  $F = \{\{x_1, \bar{x}_2\}, \{\bar{x}_1, x_3\}, \{x_2, \bar{x}_3, x_4\}\}$  beschreiben.  $F$  ist offensichtlich erfüllbar, da in jeder Klausel ein positives Literal vorkommt.  $\triangleleft$

**Satz 64.** 3-SAT ist NP-vollständig.

*Beweis.* Es ist leicht zu sehen, dass  $3\text{-SAT} \in \text{NP}$  ist. Um 3-SAT als hart für  $\text{NP}$  nachzuweisen, reicht es aufgrund der Transitivität von  $\leq$   $\text{CIRSAT}$  auf 3-SAT zu reduzieren.

*Idee:* Wir transformieren einen Schaltkreis  $c = \{g_1, \dots, g_m\}$  mit  $n$  Eingängen in eine 3-KNF-Formel  $F_c$  mit  $n + m$  Variablen

$x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m$ , wobei  $y_i$  den Wert des Gatters  $g_i$  wiedergibt. Konkret enthält  $F_c$  für jedes Gatter  $g_i$  folgende Klauseln:

| Gatter $g_i$     | zugeh. Klauseln   | Semantik                             |
|------------------|---|--------------------------------------|
| 0                | $\{\bar{y}_i\}$   | $y_i = 0$                            |
| 1                | $\{y_i\}$   | $y_i = 1$                            |
| $x_j$            | $\{\bar{y}_i, x_j\}, \{\bar{x}_j, y_i\}$                                | $y_i \leftrightarrow x_j$            |
| $(\neg, j)$      | $\{\bar{y}_i, \bar{y}_j\}, \{y_j, y_i\}$                                | $y_i \leftrightarrow \bar{y}_j$      |
| $(\wedge, j, k)$ | $\{\bar{y}_i, y_j\}, \{\bar{y}_i, y_k\}, \{\bar{y}_j, \bar{y}_k, y_i\}$ | $y_i \leftrightarrow y_j \wedge y_k$ |
| $(\vee, j, k)$   | $\{\bar{y}_j, y_i\}, \{\bar{y}_k, y_i\}, \{\bar{y}_i, y_j, y_k\}$       | $y_i \leftrightarrow y_j \vee y_k$   |

Außerdem fügen wir noch die Klausel  $\{y_m\}$  zu  $F_c$  hinzu. Nun ist leicht zu sehen, dass für alle  $x \in \{0, 1\}^n$  die Äquivalenz

$$c(x) = 1 \Leftrightarrow \exists y \in \{0, 1\}^m : F_c(x, y) = 1$$

gilt. Dies bedeutet jedoch, dass der Schaltkreis  $c$  und die 3-KNF-Formel  $F_c$  erfüllbarkeitsäquivalent sind, d.h.

$$c \in \text{CIRSAT} \Leftrightarrow F_c \in \text{3-SAT}.$$

Zudem ist leicht zu sehen, dass die Reduktion  $c \mapsto F_c$  in FL berechenbar ist. ■

3-SAT ist also nicht in Polynomialzeit entscheidbar, außer wenn  $P = NP$  ist. Am Ende dieses Abschnitts werden wir sehen, dass dagegen 2-SAT effizient entscheidbar ist. Zunächst betrachten wir folgende Variante von 3-SAT.

#### Not-All-Equal-Satisfiability (NAESAT):

**Gegeben:** Eine Formel  $F$  in 3-KNF.

**Gefragt:** Existiert eine Belegung für  $F$ , unter der in jeder Klausel beide Wahrheitswerte angenommen werden?

**Satz 65.** NAESAT  $\in$  NPC.

*Beweis.* NAESAT  $\in$  NP ist klar. Wir zeigen  $\text{CIRSAT} \leq \text{NAESAT}$  durch eine leichte Modifikation der Reduktion  $C(x_1, \dots, x_n) \mapsto F_c(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m)$  von CIRSAT auf 3-SAT:

Sei  $F'_c(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z)$  die 3-KNF Formel, die aus  $F_c$  dadurch entsteht, dass wir zu jeder Klausel mit  $\leq 2$  Literalen die neue Variable  $z$  hinzufügen.

Dann ist die Reduktion  $f : c \mapsto F'_c$  in FL berechenbar. Es bleibt also nur noch die Korrektheit von  $f$  zu zeigen, d.h.

$$c \in \text{CIRSAT} \Leftrightarrow F'_c \in \text{NAESAT}.$$

Ist  $c = (g_1, \dots, g_m) \in \text{CIRSAT}$ , so existiert eine Eingabe  $x \in \{0, 1\}^n$  mit  $c(x) = 1$ . Wir betrachten die Belegung  $a = xyz \in \{0, 1\}^{n+m+1}$  mit  $y = y_1 \dots y_m$ , wobei  $y_i = g_i(x)$  und  $z = 0$ . Da  $F_c(xy) = 1$  ist, enthält jede Klausel von  $F_c$  (und damit auch von  $F'_c$ ) mindestens ein wahres Literal. Wegen  $z = 0$  müssen wir nur noch zeigen, dass nicht alle Literale in den Dreierklauseln von  $F_c$  unter  $a$  wahr werden. Da  $a$  jedoch für jedes oder-Gatter  $g_i = (\vee, j, k)$  die drei Klauseln

$$\{\bar{y}_i, y_j, y_k\}, \{\bar{y}_j, y_i\}, \{\bar{y}_k, y_i\}$$

und für jedes und-Gatter  $g_i = (\wedge, j, k)$  die drei Klauseln

$$\{y_i, \bar{y}_j, \bar{y}_k\}, \{y_j, \bar{y}_i\}, \{y_k, \bar{y}_i\}$$

erfüllt, kann weder  $y_i = 0$  und  $y_j = y_k = 1$  noch  $y_i = 1$  und  $y_j = y_k = 0$  gelten, da im ersten Fall die Klausel  $\{\bar{y}_j, y_i\}$  und im zweiten Fall die Klausel  $\{y_j, \bar{y}_i\}$  falsch wäre.

Ist umgekehrt  $F'_c \in \text{NAESAT}$ , so existiert eine Belegung  $xyz \in \{0, 1\}^{n+m+1}$  unter der in jeder Klausel von  $F'_c$  beide Wahrheitswerte vorkommen. Da dies dann auch auf die Belegung  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  zutrifft, können wir  $z = 0$  annehmen. Dann erfüllt aber die Belegung  $xy$  die Formel  $F_c$ . ■

**Definition 66.** Sei  $G = (V, E)$  ein ungerichteter Graph.

- a) Eine Menge  $C \subseteq V$  heißt **Clique** in  $G$ , falls für alle  $u, v \in C$  mit  $u \neq v$  gilt:  $\{u, v\} \in E$ .
- b)  $I \subseteq V$  heißt **unabhängig** (oder **stabil**), falls für alle  $u, v \in I$  gilt:  $\{u, v\} \notin E$ .
- c)  $K \subseteq V$  heißt **Kantenüberdeckung**, falls für alle  $e \in E$  gilt:  $e \cap K \neq \emptyset$ .

Für einen gegebenen Graphen  $G$  und eine Zahl  $k$  betrachten wir die folgenden Fragestellungen:

**Clique:** Besitzt  $G$  eine Clique der Größe  $k$ ?

**Independent Set (IS):** Besitzt  $G$  eine stabile Menge der Größe  $k$ ?

**Vertex Cover (VC):** Besitzt  $G$  eine Kantenüberdeckung der Größe  $k$ ?

**Satz 67.** IS ist NP-vollständig.

*Beweis.* Wir reduzieren 3-SAT auf IS. Sei

$$F = \{C_1, \dots, C_m\} \text{ mit } C_i = \{l_{i,1}, \dots, l_{i,k_i}\} \text{ und } k_i \leq 3 \text{ für } i = 1, \dots, m$$

eine 3-KNF-Formel über den Variablen  $x_1, \dots, x_n$ . Betrachte den Graphen  $G = (V, E)$  mit

$$\begin{aligned} V &= \{v_{ij} \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq k_i\} \\ E &= \{\{v_{ij}, v_{ij'}\} \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j < j' \leq k_i\} \\ &\quad \cup \{\{v_{s,t}, v_{u,v}\} \mid l_{st} \text{ und } l_{uv} \text{ sind komplementär}\}. \end{aligned}$$

Dabei heißen zwei Literale **komplementär**, wenn das eine die Nega-

tion des anderen ist. Nun gilt

$$\begin{aligned} F \in 3\text{-SAT} &\Leftrightarrow \text{es gibt eine Belegung, die in jeder Klausel } C_i \text{ mindestens ein Literal wahr macht} \\ &\Leftrightarrow \text{es gibt } m \text{ Literale } l_{1,j_1}, \dots, l_{m,j_m}, \text{ die paarweise nicht komplementär sind} \\ &\Leftrightarrow \text{es gibt } m \text{ Knoten } v_{1,j_1}, \dots, v_{m,j_m}, \text{ die nicht durch Kanten verbunden sind} \\ &\Leftrightarrow G \text{ besitzt eine stabile Knotenmenge der Größe } m. \end{aligned}$$

**Korollar 68.** CLIQUE ist NP-vollständig.

*Beweis.* Es ist leicht zu sehen, dass jede Clique in einem Graphen  $G = (V, E)$  eine stabile Menge in dem zu  $G$  komplementären Graphen  $\bar{G} = (V, E')$  mit  $E' = \binom{V}{2} \setminus E$  ist und umgekehrt. Daher lässt sich IS mittels der Reduktionsfunktion

$$f : (G, k) \mapsto (\bar{G}, k)$$

auf CLIQUE reduzieren. ■

**Korollar 69.** VC ist NP-vollständig.

*Beweis.* Offensichtlich ist eine Menge  $I$  genau dann stabil, wenn ihr Komplement  $V \setminus I$  eine Kantenüberdeckung ist. Daher lässt sich IS mittels der Reduktionsfunktion

$$f : (G, k) \mapsto (G, n - k)$$

auf VC reduzieren, wobei  $n = \|V\|$  die Anzahl der Knoten in  $G$  ist. ■

## 5.4 NL-vollständige Probleme

In diesem Abschnitt präsentieren wir einen effizienten Algorithmus für das 2-SAT-Problem.

**Satz 70.** 2-SAT  $\in$  NL.

*Beweis.* Sei  $F$  eine 2-KNF-Formel über den Variablen  $x_1, \dots, x_n$ . Betrachte den Graphen  $G = (V, E)$  mit

$$V = \{x_1, \dots, x_n, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n\},$$

der für jede Zweierklausel  $\{l_1, l_2\}$  von  $F$  die beiden Kanten  $(\bar{l}_1, l_2)$  und  $(\bar{l}_2, l_1)$  und für jede Einerklausel  $\{l\}$  die Kante  $(\bar{l}, l)$  enthält. Hierbei sei  $\bar{\bar{x}}_i = x_i$ . Aufgrund der Konstruktion von  $G$  ist klar, dass

- (\*) eine Belegung  $\alpha$  genau dann  $F$  erfüllt, wenn für jede Kante  $(l, l') \in E$  mit  $\alpha(l) = 1$  auch  $\alpha(l') = 1$  ist, und
- (\*\*)  $l'$  von  $l$  aus genau dann erreichbar ist, wenn  $\bar{l}$  von  $\bar{l}'$  aus erreichbar ist.

**Behauptung 71.**  $F$  ist genau dann erfüllbar, wenn für keinen Knoten  $x_i$  in  $G$  ein Pfad von  $x_i$  über  $\bar{x}_i$  zurück nach  $x_i$  existiert.

*Beweis von Beh. 1.* Wenn in  $G$  ein Pfad von  $x_i$  über  $\bar{x}_i$  nach  $x_i$  existiert, kann  $F$  nicht erfüllbar sein, da wegen (\*) jede erfüllende Belegung, die  $x_i$  (bzw.  $\bar{x}_i$ ) den Wert 1 zuweist, auch  $\bar{x}_i$  (bzw.  $x_i$ ) diesen Wert zuweisen müsste. Existiert dagegen kein derartiger Pfad, so lässt sich für  $F$  wie folgt eine erfüllende Belegung  $\alpha$  konstruieren:

- 1) Wähle einen beliebigen Knoten  $l$  aus  $G$ , für den  $\alpha(l)$  noch undefiniert ist. Falls  $\bar{l}$  von  $l$  aus erreichbar ist, ersetze  $l$  durch  $\bar{l}$  (dies garantiert, dass  $\bar{l}$  von  $l$  aus nun nicht mehr erreichbar ist).
- 2) Weise jedem von  $l$  aus erreichbaren Knoten  $l'$  den Wert 1 (und  $\bar{l}'$  den Wert 0) zu.
- 3) Falls  $\alpha$  noch nicht auf allen Knoten definiert ist, gehe zu 1).

Wir müssen noch zeigen, dass bei der Ausführung von 2) keine Konflikte auftreten können. Tatsächlich existiert aufgrund der Symmetriebedingung (\*\*) für jeden von  $l$  aus erreichbaren Knoten  $l'$  ein Pfad von  $\bar{l}'$  zu  $\bar{l}$ .

- Daher kann  $l'$  nicht schon in einer früheren Runde den Wert 0 erhalten haben (sonst hätte in dieser Runde  $\bar{l}'$  und somit auch  $\bar{l}$  den Wert 1 erhalten, was der Wahl von  $l$  widerspricht).
- Zudem kann von  $l$  aus nicht auch  $\bar{l}'$  erreichbar sein (sonst würde ein Pfad von  $l$  über  $\bar{l}'$  nach  $\bar{l}$  existieren, was wir durch die Wahl von  $l$  ebenfalls ausgeschlossen haben).

Eine NL-Maschine kann bei Eingabe einer 2-KNF Formel  $F$  eine Variable  $x_i$  und einen Pfad von  $x_i$  über  $\bar{x}_i$  zurück nach  $x_i$  raten. Dies zeigt, dass das Komplement von 2-SAT in NL ist. Wegen NL = co-NL folgt 2-SAT  $\in$  NL. ■

In den Übungen werden wir sehen, dass 2-SAT und REACH NL-vollständig sind.

## 6 Probabilistische Berechnungen

Eine **probabilistische Turingmaschine (PM)**  $M$  ist genau so definiert wie eine NTM. Es wird jedoch ein anderes Akzeptanzkriterium benutzt. Wir stellen uns vor, dass  $M$  in jedem Rechenschritt zufällig einen Konfigurationsübergang wählt. Dabei wird jeder mögliche Übergang  $K \rightarrow_M K'$  mit derselben Wahrscheinlichkeit

$$\Pr[K \rightarrow_M K'] = \begin{cases} \|\{K'' | K \rightarrow_M K''\}\|^{-1}, & K \rightarrow_M K' \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

gewählt. Eine Rechnung  $\alpha = (K_1, K_2, \dots, K_m)$  wird also mit der Wahrscheinlichkeit

$$\Pr[\alpha] = \Pr[K_1 \rightarrow_M K_2 \rightarrow_M \dots \rightarrow_M K_m] = \prod_{i=1}^{m-1} \Pr[K_i \rightarrow_M K_{i+1}]$$

ausgeführt. Die **Akzeptanzwahrscheinlichkeit** von  $M(x)$  ist

$$\Pr[M(x) \text{ akz.}] = \sum_{\alpha} \Pr[\alpha],$$

wobei sich die Summation über alle akzeptierenden Rechnungen  $\alpha$  von  $M(x)$  erstreckt. Wir vereinbaren für PMs, dass  $M(x)$  am Ende jeder haltenden Rechnung entweder akzeptiert (hierfür schreiben wir kurz  $M(x) = 1$ ) oder verwirft ( $M(x) = 0$ ) oder „?“ ausgibt ( $M(x) = ?$ ).

### Definition 72.

a) Die von einer PM  $M$  akzeptierte Sprache ist

$$L(M) = \{x \in \Sigma^* \mid \Pr[M(x) = 1] \geq 1/2\}.$$

b) Eine Sprache  $L \subseteq \Sigma^*$  gehört zur Klasse **PP** (probabilistic polynomial time), falls eine polynomiell zeitbeschränkte PM (PPTM)  $M$  mit  $L(M) = L$  existiert.

**Satz 73.**  $\text{co-NP} \subseteq \text{PP}$ .

*Beweis.* Sei  $L \in \text{co-NP}$  und sei  $N$  eine polynomiell zeitbeschränkte NTM mit  $L(N) = \bar{L}$ . Ersetzen wir in  $N$  den Zustand  $q_{\text{ja}}$  durch  $q_{\text{nein}}$  bzw.  $q_{\text{nein}}$  und  $q_{\text{h}}$  durch  $q_{\text{ja}}$  und fassen wir  $N$  als PPTM auf, so gilt für alle  $x \in \Sigma^*$ ,

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[N(x) = 1] = 1, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[N(x) = 1] < 1. \end{aligned}$$

Betrachte folgende PPTM  $M$ , die bei Eingabe  $x$  zufällig eine der beiden folgenden Möglichkeiten wählt:

- $M$  verwirft sofort,
- $M$  simuliert  $N$  bei Eingabe  $x$ .

Dann gilt für alle  $x \in \Sigma^*$ ,

$$\Pr[M(x) = 1] = \Pr[N(x) = 1]/2$$

und somit

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] = 1/2, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] < 1/2. \end{aligned}$$

■

Als nächstes zeigen wir, dass **PP** unter Komplementbildung abgeschlossen ist. Das folgende Lemma zeigt, wie sich eine PPTM, die sich bei manchen Eingaben indifferent verhält (also genau mit Wahrscheinlichkeit  $1/2$  akzeptiert) in eine äquivalente PPTM verwandeln lässt, die dies nicht tut.

**Lemma 74.** Für jede Sprache  $L \in \text{PP}$  existiert eine PPTM  $M$  mit  $L(M) = L$ , die bei keiner Eingabe  $x \in \Sigma^*$  mit Wahrscheinlichkeit  $1/2$  akzeptiert, d.h. für alle  $x$  gilt

$$\Pr[M(x) \neq L(x)] < 1/2,$$

wobei  $L(x)$  für alle  $x \in L$  gleich 1 und für alle  $x \notin L$  gleich 0 ist.

*Beweis.* Sei  $L \in \text{PP}$  und sei  $N$  eine PPTM mit  $L(N) = L$ . Weiter sei  $p$  eine polynomielle Zeitschranke und  $c \geq 2$  der maximale Verzweigungsgrad von  $N$ . Da  $\Pr[N(x) = 1]$  nur Werte der Form  $i/k^{-p(|x|)}$  für  $k = \text{kgV}(2, \dots, c)$  annehmen kann, folgt für  $\epsilon(x) = k^{-p(|x|)}$ ,

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[N(x) = 1] \geq 1/2, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[N(x) = 1] \leq 1/2 - \epsilon(x). \end{aligned}$$

Sei  $N'$  eine PPTM mit  $\Pr[N'(x) = 1] = 1/2 + \epsilon(x)/2$  und betrachte die PPTM  $M$ , die bei Eingabe  $x$  zufällig wählt, ob sie  $N$  oder  $N'$  bei Eingabe  $x$  simuliert. Dann gilt

$$\Pr[M(x) = 1] = \frac{\Pr[N(x) = 1] + \Pr[N'(x) = 1]}{2}$$

und somit

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] \geq \frac{1/2 + 1/2 + \epsilon(x)/2}{2} > 1/2 \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] \leq \frac{1/2 - \epsilon(x) + 1/2 + \epsilon(x)/2}{2} < 1/2. \end{aligned}$$

■

Eine direkte Folgerung von Lemma 74 ist der Komplementabschluss von PP.

**Korollar 75.**  $\text{PP} = \text{co-PP}$ .

Tatsächlich liefert Lemma 74 sogar den Abschluss von PP unter symmetrischer Differenz.

**Satz 76.** PP ist unter symmetrischer Differenz abgeschlossen, d.h.

$$L_1, L_2 \in \text{PP} \Rightarrow L_1 \triangle L_2 = (L_1 \setminus L_2) \cup (L_2 \setminus L_1) \in \text{PP}.$$

*Beweis.* Nach obigem Lemma existieren PPTMs  $M_1$  und  $M_2$  mit

$$\begin{aligned} x \in L_i &\Rightarrow \Pr[M_i(x) = 1] = 1/2 + \epsilon_i, \\ x \notin L_i &\Rightarrow \Pr[M_i(x) = 1] = 1/2 - \epsilon_i. \end{aligned}$$

wobei  $\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$  sind und von  $x$  abhängen dürfen. Dann hat die PPTM  $M$ , die bei Eingabe  $x$  zunächst  $M_1(x)$  und dann  $M_2(x)$  simuliert und nur dann akzeptiert, wenn dies genau eine der beiden Maschinen tut, eine Akzeptanzwzk von

$$\Pr[M_1(x) = 1] \cdot \Pr[M_2(x) = 0] + \Pr[M_1(x) = 0] \cdot \Pr[M_2(x) = 1].$$

Folglich akzeptiert  $M$  alle Eingaben  $x \in (L_1 \setminus L_2) \cup (L_2 \setminus L_1)$  mit Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} \Pr[M(x) = 1] &= (1/2 + \epsilon_1)(1/2 - \epsilon_2) + (1/2 - \epsilon_1)(1/2 + \epsilon_2) \\ &= (1/2 + 2\epsilon_1\epsilon_2) > 1/2 \end{aligned}$$

und alle Eingaben  $x \in (L_1 \cap L_2) \cup \overline{L_1 \cup L_2}$  mit Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} \Pr[M(x) = 1] &= (1/2 + \epsilon_1)(1/2 + \epsilon_2) + (1/2 - \epsilon_1)(1/2 - \epsilon_2) \\ &= (1/2 - 2\epsilon_1\epsilon_2) < 1/2. \end{aligned}$$

■

Anfang der 90er Jahre konnte auch der Abschluss von PP unter Schnitt und Vereinigung bewiesen werden. In den Übungen werden wir sehen, dass folgendes Problem PP-vollständig ist.

**MajoritySat (MAJSAT):**

**Gegeben:** Eine boolsche Formel  $F(x_1, \dots, x_n)$ .

**Gefragt:** Wird  $F$  von mindestens der Hälfte aller  $2^n$  Belegungen erfüllt?



## 6.1 Die Klassen BPP, RP und ZPP

**Definition 77.** Sei  $M$  eine PPTM und sei  $L = L(M)$ .  $M$  heißt

- BPPTM, falls für alle  $x$  gilt:  $\Pr[M(x) \neq L(x)] \leq 1/3$ ,
- RPTM, falls für alle  $x \notin L$  gilt:  $M(x) = 0$ ,
- ZPPTM, falls für alle  $x$  gilt:  $\Pr[M(x) = \bar{L}(x)] = 0$  und  $\Pr[M(x) = ?] \leq 1/2$ .

Die Klasse **BPP** (bounded error probabilistic polynomial time) enthält alle Sprachen, die von einer BPPTM akzeptiert werden. Entsprechend sind die Klassen **RP** (random polynomial time) und **ZPP** (zero error probabilistic polynomial time) definiert.

Man beachte, dass wir im Falle einer RPTM oder BPPTM  $M$  o.B.d.A. davon ausgehen können, dass  $M$  niemals ? ausgibt. Allerdings ist nicht ausgeschlossen, dass  $M$  ein falsches Ergebnis  $M(x) = \bar{L}(x)$  liefert. Probabilistische Algorithmen mit dieser Eigenschaft werden auch als **Monte Carlo Algorithmen** bezeichnet. Im Unterschied zu einer BPPTM, die bei allen Eingaben  $x$  „lügen“ kann, ist dies einer RPTM nur im Fall  $x \in L$  erlaubt. Man spricht hier auch von **ein- bzw. zwei-seitigem Fehler**. Eine ZPPTM  $M$  darf dagegen überhaupt keine Fehler machen. Algorithmen von diesem Typ werden als **Las Vegas Algorithmen** bezeichnet.

**Satz 78.**  $ZPP = RP \cap \text{co-RP}$ .

*Beweis.* Die Inklusion von links nach rechts ist klar. Für die umgekehrte Richtung sei  $L$  eine Sprache in  $RP \cap \text{co-RP}$ . Dann existieren RPTMs  $M_1$  und  $M_2$  für  $L$  und  $\bar{L}$ , wobei wir annehmen, dass  $M_1$  und  $M_2$  niemals ? ausgeben. Weiter sei  $\bar{M}_2$  die PPTM, die aus  $M_2$  durch Vertauschen von  $q_{\text{ja}}$  und  $q_{\text{nein}}$  hervorgeht. Dann gilt

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M_1(x) = 1] \geq 1/2 \wedge \Pr[\bar{M}_2(x) = 1] = 1, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M_1(x) = 0] = 1 \wedge \Pr[\bar{M}_2(x) = 0] \geq 1/2. \end{aligned}$$

$M_1$  kann also nur Eingaben  $x \in L$  akzeptieren, während  $\bar{M}_2$  nur Eingaben  $x \notin L$  verwerfen kann. Daher kann die Kombination  $M_1(x) = 1$  und  $\bar{M}_2(x) = 0$  nicht auftreten. Weiter ergeben sich hieraus für die PPTM  $M$ , die bei Eingabe  $x$  die beiden PPTMs  $M_1(x)$  und  $\bar{M}_2(x)$  simuliert und sich gemäß der Tabelle

|                    | $M_1(x) = 1$ | $M_1(x) = 0$ |
|--------------------|--------------|--------------|
| $\bar{M}_2(x) = 1$ | 1            | ?            |
| $\bar{M}_2(x) = 0$ | –            | 0            |

verhält, folgende Äquivalenzen:

$$\begin{aligned} M(x) = 1 &\Leftrightarrow M_1(x) = 1, \\ M(x) = 0 &\Leftrightarrow \bar{M}_2(x) = 0. \end{aligned}$$

Nun ist leicht zu sehen, dass folgende Implikationen gelten:

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] = \Pr[M_1(x) = 1] \geq 1/2 \text{ und} \\ &\Pr[M(x) = 0] = \Pr[\bar{M}_2(x) = 0] = 0 \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] = \Pr[\bar{M}_2(x) = 0] \geq 1/2 \text{ und} \\ &\Pr[M(x) = 1] = \Pr[M_1(x) = 1] = 0. \end{aligned}$$

Dies zeigt, dass  $M$  eine ZPPTM für  $L$  ist, da für alle Eingaben  $x$  gilt:

$$\Pr[M(x) = \bar{L}(x)] = 0 \text{ und } \Pr[M(x) = ?] \leq 1/2.$$

■

## 6.2 Anzahl-Operatoren

**Definition 79** (Anzahlklassen). Sei  $\mathcal{C}$  eine Sprachklasse und sei  $B \subseteq \Sigma^*$  eine  $p$ -balancierte Sprache in  $\mathcal{C}$ . Durch  $B$  werden die Funktion  $\#B : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  mit

$$\#B(x) = \|\{y \in \{0, 1\}^* \mid x\#y \in B\}\|$$

und folgende Sprachen definiert ( $n$  bezeichnet die Länge von  $x$ ):

$$\begin{aligned}\exists B &= \{x \in \Sigma^* \mid \#B(x) > 0\}, \\ \forall B &= \{x \in \Sigma^* \mid \#B(x) = 2^{p(n)}\}, \\ \exists^{\geq 1/2} B &= \{x \in \Sigma^* \mid \#B(x) \geq 2^{p(n)-1}\} \\ \oplus B &= \{x \in \Sigma^* \mid \#B(x) \text{ ist ungerade}\}.\end{aligned}$$

Für  $\text{Op} \in \{\#, \exists, \forall, \exists^{\geq 1/2}, \oplus\}$  sei

$$\text{Op} \cdot \mathcal{C} = \{\text{Op}B \mid B \in \mathcal{C} \text{ ist polynomiell balanciert}\}$$

die durch Anwendung des Operators  $\text{Op}$  auf  $\mathcal{C}$  definierte Funktionen- bzw. Sprachklasse. Für  $\exists^{\geq 1/2} \cdot \mathcal{C}$  schreiben wir auch  $\mathbf{P} \cdot \mathcal{C}$ . Zudem definieren wir die Operatoren  $\mathbf{R}$  und  $\mathbf{BP}$  durch

$$\mathbf{R} \cdot \mathcal{C} = \{\exists^{\geq 1/2} B \mid B \in \mathcal{C} \text{ ist einseitig}\}$$

und

$$\mathbf{BP} \cdot \mathcal{C} = \{\exists^{\geq 1/2} B \mid B \in \mathcal{C} \text{ ist zweiseitig}\}.$$

Dabei heißt eine  $p$ -balancierte Sprache  $B$  **einseitig**, falls  $\#B(x)$  für keine Eingabe  $x$  einen Wert in  $[1, 2^{p(n)-1} - 1]$  und **zweiseitig**, falls  $\#B(x)$  für kein  $x$  einen Wert in  $(2^{p(n)}/3, 2^{p(n)+1}/3)$  annimmt.

**Lemma 80.** Sei  $\mathcal{C}$  eine Sprachklasse, die unter  $\leq_m^{\log}$  abgeschlossen ist. Dann gilt

- (i)  $\text{co-}\exists \cdot \mathcal{C} = \forall \cdot \text{co-}\mathcal{C}$ ,
- (ii)  $\text{co-BP} \cdot \mathcal{C} = \mathbf{BP} \cdot \text{co-}\mathcal{C}$ ,
- (iii)  $\oplus \cdot \mathcal{C} = \oplus \cdot \text{co-}\mathcal{C} = \text{co-}\oplus \cdot \mathcal{C}$ .

*Beweis.* Wir zeigen nur die Inklusionen von links nach rechts. Die umgekehrten Inklusionen folgen analog.

- (i) Sei  $A \in \text{co-}\exists \cdot \mathcal{C}$ . Dann existieren ein Polynom  $p$  und eine  $p$ -balancierte Sprache  $B \in \mathcal{C}$  mit  $\bar{A} = \exists B$ . Definiere die Sprache

$$\hat{B} = \{x\#y \mid x\#y \notin B \text{ und } |y| = p(|x|)\}.$$

Dann ist  $\hat{B}$  eine ebenfalls  $p$ -balancierte Sprache in  $\text{co-}\mathcal{C}$  mit  $\#\hat{B}(x) = 2^{p(n)} - \#B(x)$ . Daher folgt

$$x \in A \Leftrightarrow \#B(x) = 0 \Leftrightarrow \#\hat{B}(x) = 2^{p(n)},$$

also  $A = \forall \hat{B} \in \forall \cdot \text{co-}\mathcal{C}$ .

- (ii) Sei  $A \in \text{co-BP} \cdot \mathcal{C}$  und sei  $B \in \mathcal{C}$  eine  $p$ -balancierte zweiseitige Sprache mit  $\bar{A} = \exists^{\geq 1/2} B$ . Dann ist die in (i) definierte  $p$ -balancierte  $\text{co-}\mathcal{C}$ -Sprache  $\hat{B}$  ebenfalls zweiseitig und es gilt  $A = \exists^{\geq 1/2} \hat{B} \in \mathbf{BP} \cdot \text{co-}\mathcal{C}$ .
- (iii) Sei  $A \in \oplus \cdot \mathcal{C}$  und sei  $B \in \mathcal{C}$  eine  $p$ -balancierte Sprache mit  $A = \oplus B$ . Dann hat die in (i) definierte  $p$ -balancierte  $\text{co-}\mathcal{C}$ -Sprache  $\hat{B}$  die gleiche Parität wie  $\#B(x)$  und daher gilt  $A = \oplus \hat{B} \in \oplus \cdot \text{co-}\mathcal{C}$ . Zudem ist

$$B' = \{x\#0y \mid x\#y \in B\} \cup \{x\#1^{p(|x|)+1}\}$$

eine  $(p+1)$ -balancierte Sprache in  $\mathcal{C}$  mit  $\bar{A} = \oplus B'$ , d.h.  $A \in \text{co-BP} \cdot \mathcal{C}$ . ■

Wir wissen bereits, dass  $\exists \cdot \mathbf{P} = \mathbf{NP}$  und  $\forall \cdot \mathbf{P} = \text{co-NP}$  ist. Was passiert, wenn wir diese Operatoren mehrmals anwenden?

**Lemma 81.** Sei  $B \in \mathcal{C}$  eine  $p$ -balancierte Sprache und sei  $\mathcal{C}$  unter  $\leq_m^{\log}$  abgeschlossen. Dann existieren für jede Funktion  $f \in \mathbf{FL}$  ein Polynom  $q$  und eine  $q$ -balancierte Sprache  $B' \in \mathcal{C}$  mit

$$\#B'(x)/2^{q(|x|)} = \#B(f(x))/2^{p(|f(x)|)}.$$

*Beweis.* Sei  $q$  ein Polynom mit  $p(|f(x)|) \leq q(|x|)$  für alle  $x$  und sei  $B'$  die Sprache

$$B' = \{x\#y \mid |y| = q(n) \text{ und } f(x)\#y' \in B\},$$

wobei  $y'$  das Präfix der Länge  $p(|f(x)|)$  von  $y$  bezeichnet. Dann gilt  $B' \leq_m^{\log} B$ . Da jedes Präfix  $y'$  mit  $f(x)\#y' \in B$  genau  $2^{q(|x|)-p(|f(x)|)}$  Verlängerungen  $y$  mit  $x\#y \in B'$  hat, folgt

$$\#B'(x) = \#B(f(x))2^{q(|x|)-p(|f(x)|)}.$$

■

Mit obigem Lemma ist es nun leicht, folgende Abschlusseigenschaften der Anzahlklassen  $\exists \cdot C$ ,  $\forall \cdot C$ ,  $R \cdot C$  und  $BP \cdot C$  zu zeigen.

**Satz 82.** *Sei  $C$  eine unter  $\leq_m^{\log}$  abgeschlossene Sprachklasse. Dann gilt*

- (i) Für  $Op \in \{\exists, \forall, R, BP, P\}$  ist  $Op \cdot C$  unter  $\leq_m^{\log}$  abgeschlossen,
- (ii)  $\exists \cdot \exists \cdot C = \exists \cdot C$  and  $\forall \cdot \forall \cdot C = \forall \cdot C$ .

*Beweis.*

- (i) Sei  $A \in Op \cdot C$  mittels einem Polynom  $p$  und einer  $p$ -balancierten Sprache  $B \in C$ . Weiter gelte  $L \leq A$  mittels einer FL-Funktion  $f$ . Nach obigem Lemma existieren ein Polynom  $q$  und eine  $q$ -balancierte Sprache  $B' \in C$  mit

$$\#B'(x)/2^{q(|x|)} = \#B(f(x))/2^{p(|f(x)|)}.$$

Nun folgt z.B. für  $Op = \exists$ :

$$x \in L \Leftrightarrow f(x) \in A \Leftrightarrow \#B(f(x)) > 0 \Leftrightarrow \#B'(x) > 0.$$

Dies zeigt, dass  $L = \exists B' \in \exists \cdot C$  ist. Die übrigen Fälle folgen analog.

- (ii) Siehe Übungen.

■

### 6.3 Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit

In diesem Abschnitt zeigen wir, wie sich für RP-, ZPP- und BPP-Maschinen  $M$  die Wahrscheinlichkeit  $\Pr[M(x) \neq L(x)]$  für ein inkorrektes oder indifferentes Ergebnis auf einen exponentiell kleinen Wert  $2^{-q(|x|)}$  reduzieren lässt. Wir betrachten zunächst den Fall einer RPTM.

**Satz 83.** *Sei  $q$  ein beliebiges Polynom. Dann existiert zu jeder Sprache  $L \in RP$  eine RPTM  $M$  mit*

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 1] \geq 1 - 2^{-q(|x|)}, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] = 1. \end{aligned}$$

*Beweis.* Sei  $M$  eine RPTM für  $L$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] \leq 1/2, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] = 1. \end{aligned}$$

Betrachte die PPTM  $M'$ , die  $q(|x|)$  Simulationen von  $M$  ausführt und nur dann ihre Eingabe  $x$  verwirft, wenn  $M$  sie bei allen  $q(|x|)$  Simulationen verwirft, und andernfalls akzeptiert ( $M'$  gibt also niemals ? aus). Dann gilt

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] \leq 1/2 \Rightarrow \Pr[M'(x) = 0] \leq 2^{-q(|x|)}, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[M(x) = 0] = 1 \Rightarrow \Pr[M'(x) = 0] = 1. \end{aligned}$$

■

Ganz analog lässt sich die Zuverlässigkeit einer ZPPTM verbessern.

**Satz 84.** *Für jedes Polynom  $q$  und jede Sprache  $L \in ZPP$  existiert eine ZPPTM  $M$  mit  $\Pr[M(x) = ?] \leq 2^{-q(|x|)}$  bei allen Eingaben  $x$ .*

Für die Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit von BPPTMs benötigen wir das folgende Lemma.

**Lemma 85.** *Sei  $E$  ein Ereignis, das mit Wahrscheinlichkeit  $1/2 - \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$ , auftritt. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich  $E$  bei  $m = 2t + 1$  unabhängigen Wiederholungen mehr als  $t$ -mal ereignet, höchstens  $1/2(1 - 4\epsilon^2)^t$ .*

*Beweis.* Für  $i = 1, \dots, m$  sei  $X_i$  die Indikatorvariable

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{Ereignis } E \text{ tritt beim } i\text{-ten Versuch ein,} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

und  $X$  sei die Zufallsvariable  $X = \sum_{i=1}^m X_i$ . Dann ist  $X$  binomial verteilt mit Parametern  $m$  und  $p = 1/2 - \epsilon$ . Folglich gilt für  $i > m/2$ ,

$$\begin{aligned} \Pr[X = i] &= \binom{m}{i} (1/2 - \epsilon)^i (1/2 + \epsilon)^{m-i} \\ &= \binom{m}{i} (1/2 - \epsilon)^{m/2} (1/2 + \epsilon)^{m/2} \left( \frac{1/2 - \epsilon}{1/2 + \epsilon} \right)^{i-m/2} \\ &\leq \binom{m}{i} \underbrace{(1/2 - \epsilon)^{m/2} (1/2 + \epsilon)^{m/2}}_{(1/4 - \epsilon^2)^{m/2}}. \end{aligned}$$

Wegen

$$\sum_{i=t+1}^m \binom{m}{i} \leq 2^{m-1} = \frac{4^{m/2}}{2}$$

erhalten wir somit

$$\begin{aligned} \sum_{i=t+1}^m \Pr[X = i] &\leq (1/4 - \epsilon^2)^{m/2} \sum_{i=t+1}^m \binom{m}{i} \\ &\leq \frac{(1 - 4\epsilon^2)^{m/2}}{2} \leq \frac{(1 - 4\epsilon^2)^t}{2}. \end{aligned}$$

■

**Satz 86.** *Für jede Sprache  $L \in \text{BPP}$  und jedes Polynom  $q$  ex. eine BPTM  $M'$  mit*

$$\Pr[M'(x) = L(x)] \geq 1 - 2^{-q(n)}.$$

*Beweis.* Sei  $M$  eine BPTM mit

$$\Pr[M(x) \neq L(x)] \leq 1/3 = 1/2 - 1/6.$$

Sei  $t(n) = \lfloor (q(n) - 1) / \log_2(9/8) \rfloor$ . Betrachte die PPTM  $M'$ , die bei Eingabe  $x$   $2t(|x|) + 1$  Simulationen von  $M(x)$  ausführt und ihre Eingabe genau dann akzeptiert, wenn  $M$  bei mindestens  $t(|x|) + 1$  Simulationen akzeptiert. Dann folgt mit Lemma 85,

$$\Pr[M'(x) \neq L(x)] \leq 1/2 \underbrace{(1 - 4/36)^{t(n)}}_{8/9} \leq 2^{-q(|x|)}.$$

■

Als nächstes wollen wir zeigen, dass  $\text{R} \cdot \text{P} = \text{RP}$  ist. Hierfür benötigen wir folgendes Lemma.

**Lemma 87.** *Sei  $M$  eine PPTM. Dann existieren eine Sprache  $B \in \text{P}$  und ein Polynom  $q$ , so dass für alle Eingaben  $x$ ,  $|x| = n$ , gilt:*

$$\Pr[M(x) = 1]/2 \leq \Pr_{y \in_R \{0,1\}^{q(n)}}[x \# y \in B] \leq \Pr[M(x) = 1].$$

*Beweis.* Sei  $p$  eine polynomielle Zeitschranke für  $M$  und sei  $k = \text{kgV}(2, 3, \dots, c)$ , wobei  $c \in \mathbb{N}$  der maximale Verzweigungsgrad von  $M$  ist. Sei  $x$  eine Eingabe der Länge  $n$ . Wir ordnen jeder Folge  $r = r_1 \dots r_{p(n)}$  aus der Menge  $R_n = \{0, \dots, k-1\}^{p(n)}$  eindeutig eine Rechnung von  $M(x)$  zu, indem wir im  $i$ -ten Rechenschritt aus den  $c_i$  zur Auswahl stehenden Folgekonfigurationen  $K_0, \dots, K_{c_i-1}$  die  $(r_i \bmod c_i)$ -te wählen. Bezeichnen wir das Ergebnis der so beschriebenen Rechnung mit  $M_r(x)$ , so gilt

$$\Pr[M(x) = 1] = \Pr_{r \in_R R_n}[M_r(x) = 1].$$

Sei nun  $q(n) = \lceil \log_2(k^{p(n)}) \rceil$  und sei  $D_n \subseteq \{0, 1\}^{q(n)}$  die Menge der ersten  $k^{p(n)}$  Binärstrings der Länge  $q(n)$ . Dann können wir auch die Binärstrings  $y \in D_n$  zur Kodierung der Folgen  $r \in R_n$  verwenden und für  $M_r(x)$  auch  $M_y(x)$  schreiben. Betrachte nun die Sprache

$$B = \{x\#y \mid y \in D_n, M_y(x) = 1\}.$$

Definieren wir  $\alpha(n) = \|D_n\|/2^{q(n)}$ , so ist  $\alpha(n) \in (1/2, 1]$ , da  $D_n$  mehr als die Hälfte aller Strings der Länge  $q(n)$  enthält. Zudem gilt

$$\begin{aligned} \Pr_{y \in_R \{0,1\}^{q(n)}}[x\#y \in B] &= \Pr[y \in D_n] \cdot \Pr[M_y(x) = 1 \mid y \in D_n] \\ &= \alpha(n) \Pr[M(x) = 1], \end{aligned}$$

womit das Lemma bewiesen ist.  $\blacksquare$

**Korollar 88.**  $R \cdot P = RP$ .

Für den Nachweis von  $BP \cdot P = BPP$  und  $P \cdot P = PP$  genügt eine einfache Modifikation des obigen Lemmas.

**Lemma 89.** Sei  $M$  eine PPTM und sei  $\beta = \Pr[M(x) = 1] - 1/2$ . Dann existieren eine Sprache  $B' \in P$  und ein Polynom  $q$ , so dass für alle Eingaben  $x$ ,  $|x| = n$ , gilt:

$$\beta/2 \leq \Pr_{z \in_R \{0,1\}^{q(n)}}[x\#z \in B'] - 1/2 \leq \beta.$$

*Beweis.* Der Beweis verläuft vollkommen analog wie der Beweis von Lemma 87, nur dass wir jetzt anstelle von  $B$  folgende Sprache betrachten:

$$B' = B \cup \{x\#y \mid y \in \{0, 1\}^{q(|x|)} \setminus D_n \text{ endet mit } 0\}.$$

Da  $D_n$  eine gerade Anzahl von Strings enthält, enthält auch die Menge  $\{0, 1\}^{q(n)} \setminus D_n$  eine gerade Anzahl, wovon genau die Hälfte in  $B' \setminus B$

enthalten ist. Daher gilt für ein zufällig aus  $\{0, 1\}^{q(n)}$  gewähltes  $y$ :

$$\begin{aligned} \Pr[x\#y \in B'] &= \Pr[x\#y \in B] + \Pr[y \in \{0, 1\}^{q(n)} \setminus D_n] \cdot 1/2 \\ &= \alpha(n) \Pr[M(x) = 1] + (1 - \alpha(n)) 1/2 \\ &= \alpha(n) \underbrace{(\Pr[M(x) = 1] - 1/2)}_{\beta} + 1/2, \end{aligned}$$

womit das Lemma bewiesen ist.  $\blacksquare$

**Korollar 90.**  $BP \cdot P = BPP$  und  $P \cdot P = PP$ .

Wir sehen also, dass die Anwendung der Operatoren  $\exists$ ,  $\forall$ ,  $R$ ,  $BP$  und  $P$  auf die Klasse  $P$  die uns bereits bekannten Klassen  $NP$ ,  $co-NP$ ,  $RP$ ,  $BPP$  und  $PP$  liefert.

**Definition 91.**  $A$  ist auf  $B$  **disjunktiv reduzierbar** (in Zeichen:  $A \leq_d B$ ), falls eine Funktion  $f \in FL$  existiert, die für jedes Wort  $x$  eine Liste  $y_1\# \dots \# y_m$  von Wörtern  $y_i$  berechnet mit

$$x \in A \Leftrightarrow \exists i \in \{1, \dots, m\} : y_i \in B.$$

Gilt dagegen

$$x \in A \Leftrightarrow \|\{i \in \{1, \dots, m\} \mid y_i \in B\}\| \geq m/2,$$

so heißt  $A$  **majority-reduzierbar** auf  $B$ , wofür wir auch kurz  $A \leq_{maj} B$  schreiben.

Es ist leicht zu sehen, dass die Klassen  $P$ ,  $NP$  und  $co-NP$  unter beiden Typen von Reduktionen abgeschlossen sind. Falls  $C$  unter disjunktiven Reduktionen abgeschlossen ist, lässt sich Satz 83 leicht von  $RP$  auf  $R \cdot C$  verallgemeinern.

**Satz 92.** Falls  $C$  unter disjunktiven Reduktionen abgeschlossen ist, existieren für jede Sprache  $L \in R \cdot C$  und jedes Polynom  $q$  eine Sprache

$B \in \mathbf{C}$  und ein Polynom  $r$ , so dass für alle  $x$ ,  $|x| = n$ , und für ein zufällig gewähltes  $z \in_R \{0, 1\}^{r(n)}$  gilt

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr[B(x\#z) = 1] \geq 1 - 2^{-q(|x|)}, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr[B(x\#z) = 0] = 1. \end{aligned}$$

*Beweis.* Sei  $L \in \mathbf{R} \cdot \mathbf{C}$  und sei  $A \in \mathbf{C}$  eine  $p$ -balancierte Sprache mit

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \Pr_{y \in_R \{0,1\}^{p(n)}}[A(x\#y) = 1] \geq 1/2, \\ x \notin L &\Rightarrow \Pr_{y \in_R \{0,1\}^{p(n)}}[A(x\#y) = 0] = 1. \end{aligned}$$

Dann ist die Sprache

$$B = \{x\#y_1 \cdots y_{q(n)} \mid y_1, \dots, y_{q(n)} \in \{0, 1\}^{p(n)}, \exists i : x\#y_i \in A\}$$

disjunktiv auf  $A$  reduzierbar und somit in  $\mathbf{C}$ . Außerdem ist leicht zu sehen, dass  $B$  für  $r(n) = p(n)q(n)$  die im Satz genannten Eigenschaften besitzt. ■

**Satz 93.** *Falls  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, existieren für jede Sprache  $L \in \mathbf{BP} \cdot \mathbf{C}$  und jedes Polynom  $q$  eine Sprache  $B \in \mathbf{C}$  und ein Polynom  $r$ , so dass für alle  $x$ ,  $|x| = n$ , und für ein zufällig gewähltes  $z \in_R \{0, 1\}^{r(n)}$  gilt*

$$\Pr[L(x) = B(x\#z)] \geq 1 - 2^{-q(n)}.$$

*Beweis.* Sei  $L \in \mathbf{BP} \cdot \mathbf{C}$  und sei  $A \in \mathbf{C}$  eine  $p$ -balancierte Sprache mit

$$\Pr_{y \in_R \{0,1\}^{p(n)}}[L(x) \neq A(x\#y)] \leq 1/3 = 1/2 - 1/6.$$

Dann ist die Sprache

$$B = \left\{ x\#y_1 \cdots y_{2t(n)+1} \mid \begin{array}{l} y_1, \dots, y_{2t(n)+1} \in \{0, 1\}^{p(n)}, \\ \|\{i : x\#y_i \in A\}\| > t(n) \end{array} \right\},$$

wobei  $t(n) = (q(n) - 1)/\log_2(9/8)$  ist, auf  $A$  majority-reduzierbar und somit in  $\mathbf{C}$ . Weiter folgt nach Lemma 85 für  $r(n) = p(n)(2t(n) + 1)$  und für ein zufällig gewähltes  $z = y_1 \cdots y_{2t(n)+1} \in_R \{0, 1\}^{r(n)}$

$$\begin{aligned} \Pr[L(x) \neq B(x\#z)] &= \Pr[\|\{i : L(x) \neq A(x\#y_i)\}\| > t(n)] \\ &\leq 1/2 \underbrace{(1 - 4/36)^{t(n)}}_{8/9} \leq 2^{-q(|x|)}. \end{aligned}$$

**Satz 94.**  $\mathbf{BPP} \subseteq \mathbf{PSK}$ .

*Beweis.* Sei  $L \in \mathbf{BPP} = \mathbf{BP} \cdot \mathbf{P}$ . Nach vorigem Satz ex. ein Polynom  $r$  und eine  $r$ -balancierte Sprache  $B \in \mathbf{C}$ , so dass für alle  $x$ ,  $|x| = n$ , und für ein zufällig gewähltes  $z \in_R \{0, 1\}^{r(n)}$

$$\Pr[L(x) \neq B(x\#z)] < 2^{-q(n)}$$

gilt. Daher folgt

$$\begin{aligned} \Pr_{z \in_R \{0,1\}^{r(n)}}[\exists x \in \{0, 1\}^n : B(x\#z) \neq L(x)] \\ \leq \sum_{x \in \{0,1\}^n} \Pr_{z \in_R \{0,1\}^{r(n)}}[B(x\#z) \neq L(x)] < 1. \end{aligned}$$

Also muss für jede Eingabelänge  $n$  eine Folge  $z_n$  existieren, so dass für alle Eingaben der Länge  $n$   $L(x) = B(x\#z_n)$  ist. Da  $B \in \mathbf{P}$  ist, kann die Funktion  $x \mapsto B(x\#z_n)$  nach Korollar 53 durch einen Schaltkreis polynomieller Größe berechnet werden. ■

Das nächste Lemma zeigt, dass mit  $\mathbf{C}$  auch  $\mathbf{BP} \cdot \mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist.

**Lemma 95.** *Falls  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, dann auch  $\mathbf{BP} \cdot \mathbf{C}$ .*

*Beweis.* Sei  $A \in \text{BP} \cdot \mathbf{C}$ . Da  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, existieren ein Polynom  $p$  und eine  $p$ -balancierte Sprache  $B \in \mathbf{C}$  mit  $n \geq 0$  gilt:

$$\Pr_{y \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [B(x\#y) \neq L(x)] < 2^{-n}.$$

Gelte nun  $A' \leq_{maj} A$  mittels einer FL-Funktion  $f : x \mapsto y_1\# \dots \# y_m$ , wobei wir annehmen können, dass  $m = m(n)$  ein Polynom mit  $m \equiv_2 1$  ist. Da  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen (und damit auch unter  $\leq_m^{\log}$ ) abgeschlossen ist, können wir zudem annehmen, dass alle  $y_i \in \{0,1\}^{r(n)}$  für ein Polynom  $r$  sind. Weiterhin ist mit  $B$  auch die Sprache

$$B' = \left\{ x\#z_1 \dots z_m \left| \begin{array}{l} z_1, \dots, z_m \in \{0,1\}^{p(r(n))}, f(x) = y_1\# \dots \# y_m \\ \text{und } \|\{i \mid y_i\#z_i \in B\}\| \geq m/2 \end{array} \right. \right\}$$

in  $\mathbf{C}$  und es folgt für alle  $x$  und ein zufällig gewähltes  $z \in_R \{0,1\}^{mr(n)}$ ,

$$\Pr[B'(x\#z) \neq A'(x)] \leq \frac{m-1}{2m} + \frac{m+1}{2m} 2^{-n} \leq \frac{1}{2} - \frac{1}{2m} + 2^{-n}.$$

Da  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, können wir die Fehlerwahrscheinlichkeit für fast alle  $n$  von  $\frac{1}{2} - \frac{1}{2m} + 2^{-n}$  auf  $1/3$  verringern, womit  $A' \in \text{BP} \cdot \mathbf{C}$  gezeigt ist. ■

Nun ist leicht zu sehen, dass  $\text{BP} \cdot \mathbf{C}$  unter dem BP-Operator abgeschlossen ist, falls  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist.

**Lemma 96.** *Für jede Klasse  $\mathbf{C}$ , die unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, gilt*

$$\text{BP} \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C} = \text{BP} \cdot \mathbf{C}.$$

*Beweis.* Sei  $L \in \text{BP} \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C}$ . Da mit  $\mathbf{C}$  auch  $\text{BP} \cdot \mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist, existieren eine Sprache  $A \in \text{BP} \cdot \mathbf{C}$  und ein Polynom  $p$ , so dass für alle  $x$ ,  $|x| = n$ , gilt

$$\|\{y \in \{0,1\}^{p(n)} \mid L(x) = A(x\#y)\}\| \geq (5/6)2^{p(n)}.$$

Zudem existieren eine Sprache  $B \in \mathbf{C}$  und ein Polynom  $q$ , so dass für alle  $x$  und  $y \in \{0,1\}^{p(n)}$  gilt

$$\|\{z \in \{0,1\}^{q(m)} \mid A(x\#y) = B(x\#y\#z)\}\| \geq (5/6)2^{q(m)},$$

wobei  $m = n + p(n) + 1$  ist. Daher folgt für  $p'(n) = p(n) + q(n + p(n) + 1)$  und  $B' = \{x\#yz \mid |y| = p(|x|), |z| = q(|x| + p(|x|) + 1), x\#y\#z \in B\} \in \mathbf{C}$ ,

$$x \in L \Rightarrow \|\{u \in \{0,1\}^{p'(n)} \mid x\#u \in B'\}\| \geq \underbrace{(5/6)^2}_{>2/3} 2^{p'(n)},$$

$$x \notin L \Rightarrow \|\{u \in \{0,1\}^{p'(n)} \mid x\#u \in B'\}\| \leq \underbrace{(1/6 + 5/6 \cdot 1/6)}_{<1/3} 2^{p'(n)}$$

und somit  $L \in \text{BP} \cdot \mathbf{C}$ . ■

Folglich sind die Klassen BPP und  $\text{BP} \cdot \text{NP}$  unter dem BP-Operator abgeschlossen. Analog folgt für jede Sprachklasse  $\mathbf{C}$ , die unter disjunktiven Reduktionen abgeschlossen ist,

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{C}.$$

## 7 Die Polynomialzeithierarchie

**Definition 97.** Die *Polynomialzeithierarchie* besteht aus den Stufen  $\Sigma_k^p$  und  $\Pi_k^p$ ,  $k \geq 0$ , welche induktiv wie folgt definiert sind:

$$\begin{aligned}\Sigma_0^p &= P, & \Pi_0^p &= P, \\ \Sigma_{k+1}^p &= \exists \cdot \Pi_k^p, & \Pi_{k+1}^p &= \forall \cdot \Sigma_k^p, \quad k \geq 0.\end{aligned}$$

Die Vereinigung aller Stufen der Polynomialzeithierarchie bezeichnen wir mit PH,

$$\text{PH} = \bigcup_{k \geq 0} \Sigma_k^p = \bigcup_{k \geq 0} \Pi_k^p.$$

Es ist leicht zu sehen, dass  $\Sigma_k^p = \text{co-}\Pi_k^p$  ist. Es ist nicht bekannt, ob die Polynomialzeithierarchie echt ist, also  $\Sigma_k^p \neq \Sigma_{k+1}^p$  für alle  $k \geq 0$  gilt. Die Annahme  $\Sigma_k^p = \Sigma_{k+1}^p$  ist mit einem Kollaps von PH auf die  $k$ -te Stufe äquivalent. Es gilt allerdings als unwahrscheinlich, dass die Polynomialzeithierarchie auf eine kleine Stufe kollabiert.

**Satz 98.** Für alle  $k \geq 1$  gilt:  $\Sigma_k^p = \Sigma_{k+1}^p \Leftrightarrow \Sigma_k^p = \Pi_k^p \Leftrightarrow \text{PH} = \Sigma_k^p$ .

*Beweis.* Wegen  $\Pi_k^p \subseteq \Sigma_{k+1}^p$  impliziert die Inklusion  $\Sigma_k^p = \Sigma_{k+1}^p$  sofort  $\Pi_k^p \subseteq \Sigma_k^p$ , was mit  $\Sigma_k^p = \Pi_k^p$  gleichbedeutend ist. Für die zweite Implikation sei  $\Sigma_k^p = \Pi_k^p$  angenommen. Wir zeigen durch Induktion über  $l$ , dass dann  $\Sigma_{k+l}^p = \Sigma_k^p$  für alle  $l \geq 0$  gilt. Der Induktionsanfang  $l = 0$  ist klar. Für den Induktionsschritt setzen wir die Gleichheit  $\Sigma_{k+l}^p = \Sigma_k^p$  (bzw.  $\Pi_{k+l}^p = \Pi_k^p$ ) voraus und folgern

$$\Sigma_{k+l+1}^p = \exists \cdot \Pi_{k+l}^p = \exists \cdot \Pi_k^p = \exists \cdot \Sigma_k^p = \Sigma_k^p.$$

Die Implikation  $\text{PH} = \Sigma_k^p \Rightarrow \Sigma_k^p = \Sigma_{k+1}^p$  ist klar. ■

Als Folgerung hieraus ergibt sich, dass eine NP-vollständige Sprache nicht in P (bzw. co-NP) enthalten ist, außer wenn PH auf P bzw. NP kollabiert.

Als nächstes zeigen wir, dass BPP in der zweiten Stufe der Polynomialzeithierarchie enthalten ist.

**Satz 99** (Lautemann 1983, Sipser 1983).

$$\text{BPP} \subseteq \Sigma_2^p.$$

*Beweis.* Sei  $A \in \text{BPP}$ . Dann existieren ein Polynom  $p$  und eine  $p$ -balancierte Sprache  $B \in P$ , so dass für alle  $x$  der Länge  $n \geq 0$  gilt:

$$\Pr_{y \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [A(x) \neq B(x \# y)] < 2^{-n}.$$

Setzen wir  $B_x = \{y \in \{0,1\}^{p(n)} \mid x \# y \in B\}$ , so enthält  $B_x$  für  $x \in A$  mehr als  $(1 - 2^{-n})2^{p(n)}$  Wörter und für  $x \notin A$  weniger als  $2^{p(n)-n}$  Wörter. Sei  $\oplus$  die bitweise XOR-Operation auf  $\{0,1\}^n$ , d.h.

$$x_1 \cdots x_n \oplus y_1 \cdots y_n = (x_1 \oplus y_1) \cdots (x_n \oplus y_n).$$

Für  $u \in \{0,1\}^{p(n)}$  und  $U, V \subseteq \{0,1\}^{p(n)}$  sei

$$V \oplus u = \{v \oplus u \mid v \in V\} \text{ und } U \oplus V = \{u \oplus v \mid u \in U, v \in V\}.$$

Wir zeigen für alle Eingabelängen  $n \geq 1$  mit  $2^n \geq p(n)$  die Äquivalenz

$$\begin{aligned}x \in A &\Leftrightarrow \exists u_1, \dots, u_{p(n)} \in \{0,1\}^{p(n)} \forall v \in \{0,1\}^{p(n)} : \\ &\quad v \in B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\}.\end{aligned} \tag{7.1}$$

Dies beweist  $A \in \Sigma_2^p$ , da die Sprache

$$B' = \{x \# u_1 \cdots u_{p(n)} \# v \mid v \in B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\}\}$$

in P entscheidbar ist. Sei also  $x \in A$  und sei  $v$  ein beliebiger String der Länge  $p(n)$ . Da  $B_x$  mehr als  $(1 - 2^{-n})2^{p(n)}$  Wörter enthält, ist  $v$  für ein zufällig gewähltes  $u$  mit Wahrscheinlichkeit

$$\Pr_{u \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [v \notin B_x \oplus u] = \Pr_{u \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [v \oplus u \notin B_x] < 2^{-n}$$



nicht in  $B_x \oplus u$  und daher mit Wahrscheinlichkeit

$$\Pr_{u_1, \dots, u_{p(n)} \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [\forall i : v \notin B_x \oplus u_i] < (2^{-n})^{p(n)} = 2^{-np(n)}$$

nicht in  $B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\}$  enthalten. Daher ist

$$\Pr_{u_1, \dots, u_{p(n)} \in_R \{0,1\}^{p(n)}} [\exists v \in \{0,1\}^{p(n)} \forall i : v \notin B_x \oplus u_i] < 2^{p(n)-np(n)} \leq 1,$$

d.h. für alle  $x \in A$  mit  $|x| \geq 1$  müssen Strings  $u_1, \dots, u_{p(n)}$  mit  $B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\} = \{0,1\}^{p(n)}$  existieren. Dies zeigt die Implikation von links nach rechts in (7.1).

Für den Nachweis der umgekehrten Implikation nehmen wir an, dass für ein  $x$  der Länge  $n$  Wörter  $u_1, \dots, u_{p(n)}$  existieren mit  $B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\} = \{0,1\}^{p(n)}$ . Da die Mengen  $B_x \oplus u_i$  gleich groß wie  $B_x$  sind, muss dann im Fall  $2^n \geq p(n)$

$$\|B_x\| \geq 2^{p(n)}/p(n) \geq 2^{p(n)-n}$$

sein und somit  $x$  zu  $A$  gehören. ■

Da BPP unter Komplement abgeschlossen ist, folgt auch  $\text{BPP} \subseteq \Pi_2^p$ . Satz 99 lässt sich leicht zu  $\text{BP} \cdot \mathbf{C} \subseteq \exists \cdot \forall \cdot \mathbf{C}$  verallgemeinern, falls  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist. Starten wir nämlich mit einer Sprache  $A$  in  $\text{BP} \cdot \mathbf{C}$ , so ist wegen  $B \in \mathbf{C}$  auch die Sprache

$$B' = \{x \# u_1 \# \dots \# u_{p(n)} \# v \mid v \in B_x \oplus \{u_1, \dots, u_{p(n)}\}\}$$

in  $\mathbf{C}$  entscheidbar, was  $A \in \exists \cdot \forall \cdot \mathbf{C}$  impliziert. Insbesondere erhalten wir für  $\mathbf{C} = \text{co-NP}$  die Inklusion  $\text{BP} \cdot \text{co-NP} \subseteq \exists \cdot \forall \cdot \text{co-NP} = \Sigma_2^p$  bzw.  $\text{BP} \cdot \text{NP} \subseteq \Pi_2^p$ .

**Korollar 100.**  $\text{BP} \cdot \text{NP} \subseteq \Pi_2^p$ .

Tatsächlich lässt sich Satz 99 sogar zu der Gleichheit  $\exists \cdot \forall \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C} = \exists \cdot \forall \cdot \mathbf{C}$  verschärfen, falls  $\mathbf{C}$  unter majority-Reduktionen abgeschlossen ist (siehe Übungen). Insbesondere ist also  $\exists \cdot \forall \cdot \text{BPP} = \Sigma_2^p$ , weshalb NP nicht in BPP enthalten ist, außer wenn PH auf die zweite Stufe kollabiert.

Zum Abschluss dieses Kapitels zeigen wir, dass NP nicht einmal in  $\text{BP} \cdot \text{co-NP}$  enthalten ist, außer wenn  $\text{PH} = \text{BP} \cdot \text{NP} = \Sigma_2^p$  ist. Hierfür benötigen wir noch den Abschluss von  $\text{BP} \cdot \text{NP}$  unter dem  $\exists$ -Operator.

**Lemma 101.** Sei  $\mathbf{C}$  eine unter  $\leq_{\text{maj}}$  abgeschlossene Sprachklasse. Dann gilt

$$\exists \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C} \subseteq \text{BP} \cdot \exists \cdot \mathbf{C} \text{ und } \forall \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C} \subseteq \text{BP} \cdot \forall \cdot \mathbf{C}.$$

*Beweis.* Sei  $L \in \exists \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C}$ . Dann existieren eine Sprache  $A \in \text{BP} \cdot \mathbf{C}$  und ein Polynom  $p$  mit

$$x \in L \Leftrightarrow \exists y \in \{0,1\}^{p(n)} : x \# y \in A.$$

wobei  $n = |x|$  ist. Zu  $p$  und  $A$  existieren ein Polynom  $q$  und eine Sprache  $B \in \mathbf{C}$  mit

$$\Pr_{z \in_R \{0,1\}^{q(n)}} [A(x \# y) \neq B(x \# y \# z)] < 2^{-p(n)-2}.$$

Nun folgt für die Sprache  $A' = \{x \# z \mid |z| = q(n), \exists y \in \{0,1\}^{p(n)} : x \# y \# z \in B\}$  in  $\exists \cdot \mathbf{C}$ ,

$$\begin{aligned} x \in L &\Rightarrow \|\{z \in \{0,1\}^{q(n)} \mid x \# z \in A'\}\| \geq \underbrace{(1 - 2^{-p(n)-2})}_{>2/3} 2^{q(n)}, \\ x \notin L &\Rightarrow \|\{z \in \{0,1\}^{q(n)} \mid x \# z \in A'\}\| \leq \underbrace{2^{p(n)}(2^{-p(n)-2})}_{<1/3} 2^{q(n)} \end{aligned}$$

und somit  $L \in \text{BP} \cdot \exists \cdot \mathbf{C}$ . Da mit  $\mathbf{C}$  auch  $\text{co-C}$  unter  $\leq_{\text{maj}}$  abgeschlossen ist, folgt auch

$$\forall \cdot \text{BP} \cdot \mathbf{C} = \text{co-}\exists \cdot \text{BP} \cdot \text{co-C} \subseteq \text{co-BP} \cdot \exists \cdot \text{co-C} = \text{BP} \cdot \forall \cdot \mathbf{C}.$$

**Satz 102.**  $\text{co-NP} \subseteq \text{BP} \cdot \text{NP} \Rightarrow \text{PH} = \text{BP} \cdot \text{NP}$ . ■

*Beweis.* Gelte  $\text{co-NP} \subseteq \text{BP} \cdot \text{NP}$ . Wir zeigen durch Induktion über  $k$ , dass dann  $\Pi_k^p \subseteq \text{BP} \cdot \text{NP}$  gilt. Der Induktionsanfang  $k = 0$  ist klar. Für den Induktionsschritt setzen wir  $\Pi_k^p \subseteq \text{BP} \cdot \text{NP}$  (was mit  $\Sigma_k^p \subseteq \text{BP} \cdot \text{co-NP}$  gleichbedeutend ist) voraus und folgern

$$\begin{aligned}
 \Pi_{k+1}^p &= \forall \cdot \Sigma_k^p \\
 &\subseteq \forall \cdot \text{BP} \cdot \text{co-NP} \\
 &\subseteq \text{BP} \cdot \forall \cdot \text{co-NP} \\
 &= \text{BP} \cdot \text{co-NP} \\
 &\subseteq \text{BP} \cdot \text{BP} \cdot \text{NP} \\
 &= \text{BP} \cdot \text{NP}.
 \end{aligned}$$

■