

Ludwig-Maximilians-Universität München

WS 2015/2016

MARTIN HOFMANN, ULRICH SCHÖPP

# Komplexitätstheorie

Vorlesungsmitschrieb von

Philipp Moers

<p.moers@campus.lmu.de>

<soziflip@gmail.com>

Stand: 3. Dezember 2015, 12:47

## **Zusammenfassung**

Die Komplexitätstheorie beschäftigt sich mit der Klassifikation von Algorithmen und Berechnungsproblemen nach ihrem Ressourcenverbrauch, z.B. Rechenzeit oder benötigtem Speicherplatz. Probleme mit gleichartigem Ressourcenverbrauch werden zu Komplexitätsklassen zusammengefasst. Die bekanntesten Komplexitätsklassen sind sicherlich P und NP, die die in polynomieller Zeit deterministisch bzw. nicht-deterministisch lösbaren Probleme umfassen.

P und NP sind jedoch nur zwei Beispiele von Komplexitätsklassen. Andere Klassen ergeben sich etwa bei der Untersuchung der effizienten Parallelisierbarkeit von Problemen, der Lösbarkeit durch zufallsgesteuerte oder interaktive Algorithmen, der approximativen Lösung von Problemen, um nur einige Beispiele zu nennen.

## **Anmerkung**

Dies ist ein inoffizieller Vorlesungsmitschrieb. Als solcher erhebt er keinen Anspruch auf (NP-) Vollständigkeit oder Korrektheit. Nutzung, Anmerkungen und Korrekturen sind jedoch durchaus erwünscht!

Vorlesungs-Website: <http://www.tcs.ifi.lmu.de/lehre/ws-2015-16/kompl>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Motivation . . . . .	5
1.2	Literatur . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Turingmaschinen, Berechenbarkeit und Komplexität</b>	<b>8</b>
2.1	Turingmaschinen . . . . .	8
2.2	Halteproblem . . . . .	12
2.3	Rechenzeit . . . . .	12
2.4	Komplexitätsklassen . . . . .	14
2.5	polynomielle Verifizierbarkeit . . . . .	18
<b>3</b>	<b>NP und P</b>	<b>20</b>
3.1	Padding . . . . .	20
3.2	Was wenn $P = NP$ . . . . .	22
3.3	Sogenannte Effizienz . . . . .	23
3.4	Polynomialzeitreduktionen . . . . .	24
3.5	NP-Härte und NP-Vollständigkeit . . . . .	28
3.6	Etwas zwischen P und NP . . . . .	31
3.7	Orakel-Turingmaschinen . . . . .	35
3.8	Polynomielle Hierarchie . . . . .	41
3.9	Kollabieren der polynomiellen Hierarchie . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Platzkomplexität</b>	<b>49</b>
4.1	Platzkonstruierbare Funktionen . . . . .	49
4.2	Platzverbrauch einer Turingmaschine . . . . .	49

4.3	Platzhierarchiesatz . . . . .	51
4.4	Zusammenhänge von Platzkomplexitätsklassen . . . . .	52
4.5	Noch ein Satz von Cook . . . . .	59

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Theoretische Informatik, Berechenbarkeit und insbesondere Komplexitätstheorie ist der Informatiker-Shit schlechthin. Let's do it!

## 1.2 Literatur

Die Vorlesung basiert hauptsächlich auf folgendem Buch:

- Bovet, Crescenzi. Introduction to the Theory of Complexity. Prentice Hall. New York. 1994.

Weiterhin ist folgende Literatur gegeben:

- C. Papadimitriou. Computational Complexity. Addison-Wesley. Reading. 1995.
- I. Wegener. Komplexitätstheorie: Grenzen der Effizienz von Algorithmen. Springer. 2003.
- S. Arora und B. Barak. Complexity Theory: A Modern Approach.

Zur Motivation:

- Heribert Vollmer. Was leistet die Komplexitätstheorie für die Praxis? Informatik Spektrum 22 Heft 5, 1999.
- Stephen Cook: The Importance of the P versus NP Question. Journal of the ACM (Vol. 50 No. 1)

---

Vorlesung vom 12.10.15

---

## 2 Turingmaschinen, Berechenbarkeit und Komplexität

### 2.1 Turingmaschinen

#### Definition

Eine **Turingmaschine**  $T$  mit  $k$  Bändern ist ein 5-Tupel

$$T = (Q, \Sigma, I, q_0, F)$$

- $Q$  ist eine endliche Menge von Zuständen
- $\Sigma$  ist eine endliche Menge von Bandsymbolen,  $\square \in \Sigma$
- $I$  ist eine Menge von Quintupeln der Form  $(q, s, s', m, q')$  mit  $q, q' \in Q$  und  $s, s' \in \Sigma^k$  und  $m \in \{L, R, S\}^k$
- $q_0 \in Q$  Startzustand
- $F \subseteq Q$  Endzustände



$\square$  ist das Leerzeichen oder **Blanksymbol**.

$T$  heißt **deterministisch** genau dann, wenn für jedes  $q \in Q$  und  $s \in \Sigma^k$  genau ein Quintupel der Form  $(q, s, \_, \_, \_) \in I$  existiert. Sonst heißt  $T$  **nichtdeterministisch**.

Eine Turingmaschine heißt **Akzeptormaschine** genau dann, wenn zwei Zustände  $q_A, q_R \in F$  speziell markiert sind.  $q_A$  signalisiert Akzeptanz,  $q_R$  signalisiert Verwerfen der Eingabe.

Eine Turingmaschine heißt **Transducermaschine** genau dann, wenn ein zusätzliches Band ausgezeichnet ist (das Ausgabeband).

### Beispiel

Akzeptormaschine  $T$  für Sprache  $L = \{0^n 1^n \mid n \geq 0\}$  wobei  $\Sigma = \{0, 1\}, Q = \{q_0, \dots, q_4\}$

$T$  wird deterministisch sein.  $T = (Q, \Sigma, I, q_0, F), q_A = q_1, q_R = q_2, F = \{q_1, q_2\}, k = 2$

$q$	$s_1$	$s_2$	$s'_1$	$s'_2$	$m_1$	$m_2$	$q'$
$q_0$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$S$	$S$	$q_1$
$q_0$	$0$	$\square$	$0$	$0$	$R$	$R$	$q_3$
$q_0$	$1$	$\square$	$1$	$\square$	$S$	$S$	$q_2$
$q_3$	$\square$	$\square$	$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$q_2$
$q_3$	$0$	$\square$	$0$	$0$	$R$	$R$	$q_3$
$q_3$	$1$	$\square$	$1$	$\square$	$S$	$L$	$q_4$
$q_4$	$0$	$0$	$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$q_2$
$q_4$	$1$	$0$	$1$	$0$	$R$	$L$	$q_4$
$q_4$	$0$	$\square$	$\square$	$\square$	$S$	$S$	$q_1$
$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$\_$	$q_2$

Die **globale Konfiguration** (oder der **Zustand**) einer Turingmaschine beinhaltet die Beschriftung aller Bänder, den internen Zustand ( $\in Q$ ) und die Positionen aller  $k$  Lese-/Schreibköpfe. Globale Konfigurationen können als endliche Wörter über einem geeigneten Alphabet (z.B.  $\{0, 1\}$ ) codiert werden.

Eine Turingmaschine **akzeptiert** eine Eingabe genau dann, wenn eine Berechnungsfolge ausgehend von dieser Eingabe existiert und in einem Zustand aus  $F$  endet.

Eine Turingmaschine **akzeptiert** eine Sprache  $L \subseteq (\Sigma \setminus \{\square\})^*$  falls gilt:

$$\text{Die Turingmaschine akzeptiert } w \Leftrightarrow w \in L$$

Eine Turingmaschine **entscheidet** eine Sprache  $L \subseteq (\Sigma \setminus \{\square\})^*$  genau dann, wenn sie sie akzeptiert und eine/die Berechnung in  $q_A$  endet.

### Zu Mehrband-Turingmaschinen:

Bisher waren die Bänder beidseitig unendlich. Ab jetzt und im Buch sind sie nur noch einseitig unendlich.

### Satz

Eine Mehrband-Turingmaschine mit  $k$  Bändern kann durch eine Einband-Turingmaschine simuliert werden.

Dies benötigt quadratischen Mehraufwand.

### Beweis

Die Beweisidee nutzt für das alte Alphabet  $\Sigma$  das neue Alphabet  $\Sigma^k \times \{0,1\}^k$ , das die Zeichen auf den Bändern und, ob der Lese-/Schreibkopf an dieser Position steht, speichert.

*q.e.d.*

### Definition

Eine **universelle Turingmaschine** erhält als Eingabe  $(M, x)$ , wobei  $M$  die Beschreibung einer Turingmaschine in geeignetem Binärformat und  $x$  die Eingabe für  $M$  ist. Sie berechnet dann die Ausführung von  $M$  auf  $x$ .

## 2.2 Halteproblem

### Definition

Gegeben Turingmaschine und Eingabe  $(M, x)$ . Das Problem, zu entscheiden, ob  $M$  angewendet auf  $x$  hält oder nicht, heißt **Halteproblem**.

### Satz

Das Halteproblem ist unentscheidbar.

### Beweis

Angenommen, es gäbe eine Turingmaschine  $M_{HALT}$ , die das Halteproblem entscheidet.

Dann könnten wir auch eine neue Turingmaschine  $M_D$  konstruieren:

Simuliere Eingabe  $M$  auf  $M$  selbst und schaue, ob sie hält. Falls ja, dann gehe in Endlosschleife. Falls nicht, halte an.

Für  $M = M_D$  ergibt sich nun ein Widerspruch: Falls sie hält, hält sie nicht. Falls sie nicht hält, hält sie.

*q.e.d.*

## 2.3 Rechenzeit

### Definition

Die **Rechenzeit** definiert man wie folgt:

Gegeben eine Turingmaschine  $M$  und Eingabe  $x$ .

$TIME_M(x)$  ist die Dauer (Anzahl der Schritte) der Berechnung von  $M$  auf  $x$ .

Im Beispiel der Maschine für  $L = \{0^n 1^n \mid n \geq 0\}$  ist  $TIME_M(x) = |x|$  (Länge des Strings).

### Satz

Das **Speedup-Theorem** besagt, dass zu jeder Turingmaschine  $M$  eine äquivalente Turingmaschine  $M'$  konstruiert werden kann, sodass

$$TIME_{M'}(x) \leq \frac{1}{k} * TIME_M(x)$$

wobei  $k \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$  fest gewählt ist.

Zum Beispiel ist bei  $k = 7$  die neue Turingmaschine siebenmal so schnell.

### Beweis

Gegeben  $M$  mit Alphabet  $\Sigma$ .

Dann wird  $M'$  mit Alphabet  $\Sigma^k$  konstruiert. Ein Symbol von  $M'$  repräsentiert  $k$  aufeinanderfolgende Symbole von  $M$ , d.h.  $M'$  kann  $k$  Schritte von  $M$  in einem einzigen ausführen.

*q.e.d.*

### **Anmerkung:**

Die Schritte werden in der Praxis also schon aufwändiger, die definierte Metrik  $TIME$

erfasst das nur nicht. No Magic here.

### Definition

Sei  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ .

Dann definieren wir  $DTIME(f)$  als Menge aller Entscheidungsprobleme (oder Berechnungsprobleme)  $A$ , zu denen eine deterministische Turingmaschine  $M$  existiert, sodass  $M$   $A$  entscheidet und die Rechenzeit in  $\mathcal{O}(f(n))$  liegt.

$$DTIME(f) = \{A \mid \exists M : M \text{ entscheidet } A \text{ und } \forall x \in \Sigma^* : TIME_M(x) = \mathcal{O}(f(|x|))\}$$

### Satz

Matrixmultiplikation liegt in  $\mathcal{O}(n^3)$ , also in  $DTIME(\sqrt{n}^3)$ , wenn die Länge der Matrix auf dem Band  $n$  ist. Sie liegt sogar in  $\mathcal{O}(n^{2.78})$

Offen ist die Frage, ob sie in  $DTIME(\sqrt{n}^2)$  liegt.

## 2.4 Komplexitätsklassen

### Definition

Eine Menge der Form  $DTIME(f(n))$  heißt **deterministische Zeitkomplexitätsklasse**. Analog heißt  $NTIME(f(n))$  für nichtdeterministische Turingmaschinen **nicht-deterministische Zeitkomplexitätsklasse**.

Wir betrachten zu gegebener Funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  durch Turingmaschine  $M$  folgenden Algorithmus:

Rechne  $M$  auf Eingabe  $M$  selbst für  $f(M)$  Schritte. Falls  $M$  sich bis dahin akzeptiert, verwerfe die Eingabe. Falls sie sich verwirft oder bis dahin nicht gehalten hat, akzeptiere die Eingabe.

Das durch diesen Algorithmus beschriebene Problem

$$K_f = \{M \mid M \text{ akzeptiert sich selbst nicht in höchstens } f(|M|) \text{ Schritten.}\}$$

ist "offensichtlich" entscheidbar. Die Rechenzeit für diese Entscheidung muss aber im allgemeinen  $f(|M|)$  übersteigen.

Wäre  $M_f$  eine Turingmaschine, die  $K_f$  entscheidet und außerdem  $TIME_{M_f} \leq f(|x|)$  für alle  $x$ , dann führt die Anwendung von  $M_f$  auf  $M_f$  selbst zum Widerspruch (wie beim Halteproblem).

$f$  muss dazu selbst in Zeit  $\mathcal{O}(f(n))$  berechenbar und monoton steigend sein. Man nennt  $f$  dann **zeitkonstruierbar**.

Durch geschickte Ausnutzung dieses Arguments erhält man den **Zeit-Hierarchie-Satz**:

### Satz

Falls  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  zeitkonstruierbar ist, dann gilt:

$$DTIME(f(n)) \subset DTIME(f(n) * \log^2(f(n)))$$

wobei  $\subset$  eine echte Teilmengenbeziehung bezeichnet.

**Anmerkung:**

“Vernünftige” Funktionen wie  $2^n$ ,  $\log(n)$ ,  $\sqrt{n}$  etc. sind zeitkonstruierbar.

### Satz

Nach Borodin und Trakhtenbrot gilt das **Gap-Theorem**:

Für eine totale, berechenbare Funktion  $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $g(n) \geq n$  gibt es immer eine totale, berechenbare Funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , sodass gilt:

$$DTIME(f) = DTIME(g \circ f)$$

Es gibt also in der Hierarchie der Komplexitätsklassen beliebig große Lücken.

### Definition

**Wichtige Komplexitätsklassen:**

$$P = \bigcup_{k \geq 1} DTIME(n^k)$$

$$E = \bigcup_{k \geq 1} DTIME(2^{kn})$$

$$EXP = \bigcup_{k \geq 1} DTIME(2^{n^k})$$

Nach dem **Zeit-Hierarchie-Satz** gilt:

$$P \subset E \subset EXP$$



### Definition

**Nichtdeterministische Zeitkomplexität** Sei  $T$  eine nichtdeterministische Turingmaschine.

Für  $x \in \Sigma$  ist  $NTIME_T(x)$

1. definiert genau dann, wenn alle Berechnungen von  $T$  auf  $x$  halten
2. Falls definiert und  $x \in L(T)$  (d.h. es gibt eine akzeptierende Berechnung von  $T$  auf  $x$ ) definiert als Länge der kürzesten akzeptierenden Berechnungen von  $T$  auf  $x$ .
3. Falls überhaupt definiert  $x \notin L(T)$  so ist  $NTIME_{(x)}$  die Länge der kürzesten Berechnung.

### Definition

Nichtdeterministische Komplexitätsklassen

$$NTIME(f(n)) = \{L \mid \exists T \text{ mit } L(T) = L \text{ und } NTIME_T(x) = \mathcal{O}(f(|x|))\}$$

Es gibt einen nichtdeterministischen Zeithierarchiesatz.

$$NP = \bigcup_{k \geq 1} NTIME(n^k)$$

$$NE = \bigcup_{k \geq 1} NTIME(2^{kn})$$

$$NEXP = \bigcup_{k \geq 1} NTIME(2^{n^k})$$

Nichtdeterminismus kann durch erschöpfende Suche deterministisch simuliert werden.  
z.B.  $NP \subseteq EXP$

Allgemein:

$$NTIME(f(n)) \subseteq DTIME(2^{O(f(n))})$$

(zeitkonstruierbar)

## 2.5 polynomielle Verifizierbarkeit

### Definition

Charakterisierung von  $NP$  durch **polynomielle Verifizierbarkeit**  $PV$ .

$$L \subseteq \Sigma^*.L \in PV \text{ genau dann, wenn}$$

$$\exists L' \in P \text{ sodass gilt } x \in L \Leftrightarrow \exists z \text{ "Loesung" mit } |h| \leq L'$$

wobei  $p$  ein Polynom ist

### Satz

$$NP = PV$$

### Beweis

“ $\subseteq$ ”:

$L \in NP$ . Sei  $T$  eine nichtdeterministische Turingmaschine für  $L$  mit Laufzeit  $p(n)$ .

$$L' = \{(x, y) \mid y \text{ codiert eine akzeptierende Berechnung von } T \text{ auf } x\}$$

$$1. x \in L \Leftrightarrow \exists y : |y| \leq (p(|x|))^2. (x, y) \in L'$$

$$2. L' \in P$$

“ $\supseteq$ ”:

Gegeben  $L, L' \in P$ .

Eine nichtdeterministische Turingmaschine  $T$  für  $L$  rät zunächst  $y$  und prüft dann  $(x, y) \in L'$

*q.e.d.*

$EXP$  im Gegensatz zu  $NP$  bzw.  $PV$  umfasst auch Probleme mit exponentiell großen Lösungen bzw solchen wo die Verifikation einer Lösung einen exponentiellen Aufwand macht.

## 3 NP und P

### 3.1 Padding

#### Definition

Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache.

$$\text{padd}(L) = \{1^l O x \mid x \in L, l = 2^{|x|}\}$$

#### Satz

Es gilt:  $L \in \text{DTIME}(f(s^n))$ , dann ist

$$\text{padd}(L) \in \text{DTIME}(f(n))$$

Blase  $f$  zeitkonstant und insbesondere  $f(n) \geq n$

#### Beweis

Sei  $T$  eine deterministische Turingmaschine für  $L$  und  $\text{DTIME}_T(x) \leq c x f(2^n)$

Die folgende Maschine  $T'$  entscheidet  $padd(L)$ :

Gegeben Eingabe  $y$ , schreibe  $y + 1^l O x$  und prüfe ob  $l = 2^{|x|}$  geht in Zeit  $\mathcal{O}(|y|)$

Aufwand:  $cf(2^{|x|}) \leq c * f(|y|)$

Gesamtaufwand:  $\leq c * f(|y|) + |y| = \mathcal{O}(f(|y|))$

falls  $f(n) \geq n$  (zeitkonstruierbar)

*q.e.d.*

### Satz

Umgekehrt gilt auch:

Wenn  $padd(L) \in DTIME(f(n))$  dann  $L \in DTIME(f(s^{n+1}))$

### Beweis

Sei  $T$  eine Turingmaschine für  $padd(L)$  mit  $DTIME_T(y) \leq cf(|y|)$

Wir bauen eine Maschine für  $L$ : Gegeben Eingabe  $x$ , bilde  $y = 1^{2^{|x|}} O x$ .

Aufwand:  $\mathcal{O}(2^{|x|})$  Setze  $T$  auf  $y$  an. Aufwand:  $c * f(|y|) = c * f(2^{|x|} + |x| + 1)$

Gesamtaufwand:  $\mathcal{O}(f(2^{|x|+1}))$

*q.e.d.*

## 3.2 Was wenn $P = NP$

### Satz

Folgerung:

$$P = NP \Rightarrow E = NE$$

### Beweis

Sei  $P = NP$  und  $L \in NE$  und  $T$  eine Maschine mit Aufwand  $n^{kk}$  wobei  $k$  fest,  $n$  Länge der Eingabe.

$L \in NTIME(n^{nk}) = NTIME((2^n)^k)$  Also  $padd(L) \in NTIME(2^k)$  also  $padd(L) \in NP$  und nach Annahme  $padd(L) \in P$

Also  $padd(L) \in DTIME(n^{k'})$  also  $L \in DTIME((2^{n+1})^{k'}) = DTIME(2^{k'n+k'}) = DTIME(2^{k'n}) \subseteq E$

*q.e.d.*

Slogan: Gleichheit von Komplexitätsklassen vererbt sich nach oben.

Mit anderen Paddingfunktion zeigt man ebenso:

$$P = NP \Rightarrow EXP = NEXP$$

$$E = NE \Rightarrow EXP = NEXP$$

Kontrapositiv ausgedrückt:

$$E \neq NE \Rightarrow P \neq NP$$

etc.

Es koennte sein, dass  $P \neq NP$  aber doch  $E = NE$ .

Slogan: Trennung von Komplexitätsklassen vererbt sich (durch Padding) von oben nach unten.

### 3.3 Sogenannte Effizienz

$P$  wird gemeinhin gleichgesetzt mit "effizient loesbar".

Wachstumsverhalten:

$p$  Polynom.  $\Rightarrow$

$$\exists c > 0 : p(2n) \leq c * p(n)$$

Bei Verdopplung des Inputs wird der Output also ver- $c$ -facht.

Häufig hat eine Brute-force-Lösung ("stures Durchprobieren") exponentiellen und eine echte algorithmische Lösung hat polynomiellen Aufwand.

## 3.4 Polynomialzeitreduktionen

### Definition

$f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  beziehungsweise für Binärkodierung  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$

ist in *FP* (eine **in Polynomialzeit berechenbare Funktion**) genau dann, wenn eine polynomialzeitbeschränkte (deterministische) Transducer-Maschine existiert, die  $f$  berechnet.

Gegeben Input  $x \in \Sigma^*$ , dann hält die Maschine nach  $\leq p(|x|)$  Schritten mit Ergebnis  $f(x)$ , wobei  $p$  ein Polynom ist.

### Beispiel

#### Musterbeispiele:

- Alle Polynome sind in *FP*, zum Beispiel  $f(x) = x^3 + 10x^2 + x$
- Charakteristische Funktionen aller Probleme in *P* sind in *FP*.
- Matrixmultiplikation ist in *FP*.

#### Gegenbeispiele:

- $f(x) = 2^x$  ist nicht in *FP*, denn  $|2^x| = x + 1 \geq 2^{|x|+1} + 1 =$



$$\Omega(2^{|x|})$$

- Charakteristische Funktionen von Problemen in  $EXP \setminus P$  sind nicht in  $FP$ .

### Wahrscheinliches Gegenbeispiel:

$f(n)$  = größter Teiler von  $n$  außer  $n$  selbst. Algorithmus: Alle Zahlen von 1 bis  $n$  durchlaufen und testen, immer merken, wenn größerer Teiler gefunden.

Laufzeit:  $\Omega(n) = \Omega(2^{|n|})$  (Länge der Eingabe statt Zahl selbst)

### Satz

$FP$  ist unter Komposition (Hintereinanderausführung) abgeschlossen.

### Beweis

Seien  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*, g : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^* \in FP$

Wir definieren  $h(x) = g(f(x))$

Programm für  $h$ :  $y = f(x); z = g(y); \text{return } z;$

Gesamtaufwand:  $O(p_f(|x|) + p_g(p_f(|x|)))$ , wobei  $p_f$  und  $p_g$  Polynome sind, die die Laufzeit für Algorithmen für  $f$  bzw.  $g$  beschränken.

*q.e.d.*

### Definition

### Polynomielle Reduzierbarkeit

Seien  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ .

Wir sagen  $L_1$  ist polynomiell auf  $L_2$  reduzierbar (**FP-reduzierbar**) genau dann, wenn  $f \in FP$  existiert, sodass  $x \in L_1 \Leftrightarrow f(x) \in L_2$ .

Aus Algorithmus für  $L_2$  erhält man einen für  $L_1$ , indem man  $f(x)$  berechnet und prüft, ob das Ergebnis in  $L_2$  liegt.

In Zeichen:  $L_1 \leq_p L_2$  oder  $L_1 \leq L_2$ , auch  $f : L_1 \leq L_2$

### Beispiel

$3COL = \{G = (V, E) \mid G \text{ kann mit 3 Farben gefärbt werden, d.h. } \exists c : V \rightarrow \{r, g, b\} \text{ sodass } \forall (u, u') \in E : c(u) \neq c(u')\}$

$SAT = \{\phi \mid \phi \text{ aussagenlogische Formel die erfüllbar ist}\}$

Behauptung:  $3COL \leq SAT$

$$f((V, E)) = \left( \bigwedge_{v \in V} \bigvee_{y \in \{r, g, b\}} x_{v,y} \right) \wedge$$

$$\left( \bigwedge_{v \in V} \bigwedge_{c \in \{r, g, b\}} \bigwedge_{c' \in \{r, g, b\}} x_{v,c} \rightarrow \neg x_{v,c'} \right) \wedge$$

$$\left( \bigwedge_{(v,v') \in E} \bigwedge_{y \in \{r, g, b\}} x_{v,y} \rightarrow \neg x_{v',y} \right)$$

Offensichtlich ist  $f \in FP$  und  $G \in 3COL \Leftrightarrow f(G) \in SAT$ ,

also  $3\text{COL} \leq \text{SAT}$ .

### Beispiel

$\text{KNFSAT} :=$  wie SAT, aber auf konjunktive Normalform eingeschränkt.

Es gilt trivialerweise  $\text{KNFSAT} \leq \text{SAT}$ , aber auch  $\text{SAT} \leq \text{KNFSAT}$  (Durch Einführung von Abkürzungen von Teilformeln).

### Beispiel

$3\text{SAT} :=$   $\text{KNFSAT}$  eingeschränkt auf Klauseln mit 3 Literalen.

Es gilt  $\text{KNFSAT} \leq 3\text{SAT}$ .

Man kennt keine Reduktion von  $3\text{SAT}$  auf  $2\text{SAT}$ .

### Beispiel

$\text{NODE-COVER} := \{G = (V, E), n \mid \exists U \subseteq V : |U| \leq n \text{ und } \forall (v, v') \in E : v \in U \vee v' \in U\}$

Es gilt  $\text{NODE-COVER} \leq \text{KNFSAT}$ .

und - was schwieriger zu zeigen ist -  $\text{KNFSAT} \leq \text{NODE-COVER}$ :

Gegeben: KNF  $\phi$  mit  $m$  Variablen  $x_1 \dots x_m$  und  $k$  Klauseln  $C_1 \dots C_k$  wobei

$C_j = l_{j,1} \vee \dots \vee l_{j,k}$

Falls  $3\text{SAT}$ , so sind alle  $k_j = 3$ .

Die  $l_{j,i}$  sind Literale, d.h. negierte oder nicht-negierte Variablen.

Wir konstruieren Graphen  $G = (V, E)$  wie folgt:

- Für jede Variable  $x_t$  zwei Knoten  $x_t, \neg x_t$
- Für jede Klausel  $C_j$   $k_j$  Knoten  $(l_{j,1}) \dots (l_{j,k})$ ,  
Insgesamt  $2m \sum_{j=1}^k k_j$  Knoten
- Kanten:
  - $(x_t, \neg x_t)$
  - Vollständiger Graph für  $l_{j,1}$  bis  $l_{j,k}$
  - $(x_t, l_{j,i})$  bzw.  $(\neg x_t, l_{j,i})$ , falls  $l_{j,i} = x_t$  bzw.  $l_{j,i} = \neg x_t$

### 3.5 NP-Härte und NP-Vollständigkeit

#### Definition

$L \subseteq \Sigma^*$  ist **NP-hart** (NP-schwer, NP-schwierig) genau dann, wenn

$$\forall L' \in NP : L' \leq_p L$$

#### Satz

HALT (Halteproblem) ist NP-hart.

#### Beweis

Gegeben:  $L' \in NP$ . Baue deterministische Turingmaschine  $M$ , sodass  $M(x)$  hält genau dann, wenn  $x \in L'$  Brute-force Suche, Laufzeit exponentiell.

$x \in L' \Leftrightarrow (M, x) \in \text{HALT}$

also ist  $f(x) = (M, x)$  eine Reduktion von  $L'$  auf  $\text{HALT}$   $f : L' \leq \text{HALT}$ .

*q.e.d.*

### Definition

$L \subseteq \Sigma^*$  ist **NP-vollständig** genau dann, wenn  $L$  NP-hart ist und  $L \in \text{NP}$ .

### Satz

$\text{HALT} \notin \text{NP}$ .

### Satz

#### **Satz von Cook**

$\text{SAT}$  ist NP-vollständig.

### Beweis

$\text{SAT} \in \text{NP}$ : trivial.

Sei  $L \in \text{NP}$  gegeben und o.B.d.A  $M$  eine nichtdeterministische Turingmaschine für  $L$  mit einem Band  $M = (\Sigma, Q, q_0, F, I)$  und  $p$  ein Polynom, das die Laufzeit von  $M$  beschränkt. Gegeben weiterhin  $x = x_1 \dots x_n$  Input.

Gesucht: aussagenlogische Formel  $\phi = f(x)$ , sodass  $\phi$  erfüllbar ist genau dann, wenn  $M$  akzeptiert  $x$ .  $\phi$  muss aus  $x$  in polynomieller Zeit berechenbar sein, d.h.  $f \in \text{FP}$ .

$M$  akzeptiert  $x$  genau dann, wenn eine akzeptierende Berechnung von  $M$  auf  $x$  existiert. Solch eine Berechnung hat höchstens  $p(n)$  Schritte und o.B.d.A genau  $p(n)$

Schritte. Die Bandbeschriftung zu jedem dieser  $p(n)$  Schritte besteht aus höchstens  $p(n)$  Symbolen und o.B.d.A genau  $p(n)$  Symbolen.

Die Formel  $\phi$  verwendet die Variablen

- $Q_t^i$ : Zur Zeit  $t$  ist  $M$  im Zustand  $i$ .
- $P_{s,t}^i$ : Zur Zeit  $t$  enthält Bandposition  $s$  das  $i$ . Symbol.
- $S_{s,t}$ : Zur Zeit  $t$  ist der Kopf in Position  $s$ .

$$q = A \wedge B \wedge C \wedge D \wedge E \wedge F$$

*Details im Buch...*

*q.e.d.*

3SAT, NODE-COVER sind auch NP-vollständig.

Allgemein gilt:  $L$  NP-vollständig und  $L' \in NP, L \leq L'$  so folgt  $L'$  NP-vollständig.

**Anmerkung:**  $\leq$  ist transitiv, da  $FP$  unter Komposition abgeschlossen ist.

**Anmerkung:** 3COL, TRAVELINGSALESMAN, SUBSETSUM etc. sind auch NP-vollständig.

## 3.6 Etwas zwischen P und NP

### Satz

#### Satz von Ladner

Falls  $P \neq NP$ , dann

$$\exists A \in NP \setminus P : A \text{ nicht NP-vollst\"andig.}$$

$A$  liegt also "echt" zwischen  $P$  und NP-vollst\"andig.

### Definition

#### Diagonalisierung

Um zu zeigen, dass eine Sprache  $A$  nicht in einer Klasse  $\mathcal{C}$  ist, beziehungsweise um solch ein  $A$  zu konstruieren, kann man eine effektive (FP) Aufz\"ahlung von Turingmaschine  $(M_i)_i$  verwenden, sodass  $\mathcal{C} = \{L(M_i) \mid i \geq 0\}$  und dann daf\"ur sorgen, beziehungsweise zeigen, dass  $\forall i : A \neq L(M_i)$  beziehungsweise  $\forall i : A \triangle L(M_i) \neq \emptyset$ .

Das hei\"uft  $\forall i \exists x : (x \in A \wedge x \notin L(M_i)) \vee (x \notin A \wedge x \in L(M_i))$

### Lemma

Es existiert eine FP-Funktion  $i \mapsto M_i$ , sodass  $DTIME_{M_i}(x) \leq (|x| + 2)^2$  und  $P =$

$\{L(M_i) \mid i \geq 0\}$ .

### Lemma

Es existiert eine FP-Funktion  $i \mapsto f_i$  wobei  $f_i$  eine Übersetzermaschine ist und  $FP = \{f_i \mid i \geq 0\}$  und  $DTIME_{f_i}(x) \leq (|x| + 2)^i$ . Insbesondere  $|f_i(x)| \leq (|x| + 2)^i$ .

Es ist klar, dass  $A \in NP$  aber  $A \notin P$  und  $A$  nicht NP-vollständig, wenn

- $A \in NP$
- $\forall i \exists x : x \in A \Delta L(M_i)$
- $\forall i \exists x : x \in SAT \wedge f_i(x) \notin A$  oder  $x \notin SAT \wedge f_i(x) \in A$

Das heißt  $f_i$  ist keine Reduktion von  $SAT$  auf  $A$ .

Wir konstruieren  $A$  in der folgenden Form:

$$A = \{x \mid x \in SAT \wedge f(|x|) \text{ gerade.}\}$$

$f$  wird sogleich rekursiv definiert derart, dass dieses  $A$  die Bedingungen 1, 2 und 3 erfüllt.

Man sollte also versuchen sicherzustellen, dass

- $f(n)$  in Zeit  $p(n)$  berechenbar für Polynom  $p$  (Bedingung 1).
- Für alle  $i$  existiert  $x$  mit  
 $x \in SAT$  und  $f(|x|)$  gerade und  $x \notin L(M_i)$   
oder



$(x \notin SAT \text{ oder } f(|x|) \text{ ungerade}) \text{ und } x \in L(M_i)$

- Für alle  $i$  existiert  $x$ , sodass  $x \in SAT$  und  $(f(|f_i(x)|))$  ungerade oder  $f_i(x) \notin SAT$   
oder  
 $x \notin SAT$  und  $f(|f_i(x)|)$  gerade und  $f_i(x) \in SAT$

$f$  wird jetzt rekursiv definiert.

Wir schreiben  $A_f = \{x \mid x \in SAT \wedge f(|x|) \text{ gerade}\}$

$f(n+1) = IF \ (2 + \log \log n)^{f(n)} \geq \log n$

$THEN \ f(n)$

$ELIF \ \exists x : |x| \leq \log \log n \text{ und } x \in L(M_i) \wedge x \notin A_f \text{ oder } x \notin L(M_i) \wedge x \in A_f$

$THEN \ f(n) + 1 \text{ ebe } f(n)$

$ELIF \ \exists x : |x| \leq \log \log n$

$THEN \ f(n) + 1$

Um  $f(n+1)$  zu berechnen wird rekursiv nur auf Werte  $f(m)$  mit  $m \leq n$  zugegriffen, also ist  $f$  eine totale Funktion.

Es genügt, ein Polynom  $p(n)$  zu finden, sodass in Zeit  $p(n)$  der Wert  $f(n+1)$  aus  $f(0), f(1), \dots, f(n)$  bestimmt werden kann.

Die Laufzeit für  $f(n)$  ist nämlich dann  $\mathcal{O}(\sum_{m < n} p(m)) = \text{poly}(n)$ .

Klar ist, dass  $A = A_f \neq L(M_i)$  falls  $f(n) = 2i + 1$  für ein  $n$ , denn dann war  $f(n') = 2i$  für ein  $n' < n$  und  $f(n' + 1) = 2i + 1$  also die Suche in Fall 2 erfolgreich.

Ebenso ist  $f_i$  keine Reduktion:  $SAT \leq A_f$  falls  $f(n) = (2i + 1) + 1$  für ein  $n$ .

Das heißt wir müssen zeigen, dass  $f$  surjektiv ist, d.h. dass jeder Fall irgendwann erfolgreich abgeschlossen wird.

*Details dazu auf der Website.*

## 3.7 Orakel-Turingmaschinen

Orakel-Turingmaschinen als Mittel zu zeigen, dass Beweismethoden “Diagonalisierung”<sup>1</sup> und “Simulation”<sup>2</sup> nicht helfen, um  $P = NP$  zu entscheiden.

### Definition

Eine **Orakel-Turingmaschine**  $T$  hat ein zusätzliches Band (Orakelband) und drei zusätzliche Zustände  $q_Q$  (Frage),  $q_{yes}$ ,  $q_{no}$  (Antwort).

Ist  $A \subseteq \Sigma^*$ , dann definiert man Berechnungen  $T^A(x)$  von  $T$  auf  $x$  mit Orakel  $A$  wie folgt:

- Wie üblich mit der zusätzlichen Regel:  
Falls  $T$  in  $q_Q$  so wird  $T$  in Zustand  $q_{yes}$ ,  $q_{no}$  versetzt und zwar in einem Schritt, je nach dem, ob die aktuelle Beschriftung  $z \in \Sigma^*$  des Orakelbands (“Anfrage”/“Query”) in  $A$  ist ( $q_{yes}$ ) oder nicht ( $q_{no}$ ).

Man schreibt  $L^A(T)$  oder  $L(T^A)$  für die von  $T$  akzeptierte Sprache, falls Anfragen gemäß  $A$  beantwortet werden.

### Beispiel

Sei  $STCONN = \{(G, s, t) \mid \exists \text{ Pfad von } s \text{ nach } t \in G\}$

---

<sup>1</sup>zum Beispiel benutzt für  $NP \subseteq EXP$

<sup>2</sup>zum Beispiel benutzt für  $P \subset EXP$  (Ladner)

Feststellen, ob ein Graph  $G$  einen nichttrivialen Zyklus enthält. Zähle alle Paare  $(u, v)$  auf und frage jeweils  $(G, u, v)$  und  $(G, v, u)$  ab.

Damit ist eine Maschine  $T$  beschrieben, sodass  $CYCLE = L^{STCONN}(T)$ . Die Laufzeit von  $T$  ist  $|G|^2$  (insbesondere polynomiell). Es ist also  $CYCLE \in P^{STCONN}$ . (Definition unten)

Nachdem nun  $STCONN \in P$  folgt  $CYCLE \in P$ .

### Definition

Sei  $A \subseteq \Sigma^*$ .

Man definiert  $P^A$  als die Menge aller Sprachen  $L$  sodass eine deterministische Turingmaschine  $T$  existiert mit  $L = L^A(T)$  und  $DTIME(T^A(x)) \leq p(|x|)$  für ein Polynom  $p$ .

Analog  $NP^A$ .

**Beobachtung:**  $A \in P \Rightarrow P^A = P \wedge NP^A = NP$ .

### Beispiel

$$SAT \in P^{SAT}$$

$$NODE - COVER \in P^{SAT}$$

$$NP \in P^{SAT}$$

$$TAUT = \{\phi \mid \phi \text{ allgemeingültig}\} \in P^{NP}$$

$$IMPL = \{(\phi, \psi) \mid \phi \text{ allgemeingültig} \Rightarrow \psi \text{ allgemeingültig}\} \in P^{NP}$$

$$CIRCUIT - MIN = \{(\text{Schaltkreis } C, A) \mid \text{Schaltkreis } C' \text{ der Größe } \leq k \text{ und } C \equiv C'\} \in NP^{SAT}$$

Wir zeigen jetzt die folgenden zwei Sätze, aufgrund derer kein Beweis für  $P = NP$  oder  $P \neq NP$  existieren kann, welcher in Gegenwart von Orakeln auch funktioniert:

### Satz

$$\exists A \in \Sigma^* : P^A = NP^A$$

### Beweis

$A = \{(T, x, 0^k) \mid \text{deterministische Turingmaschine } T \text{ akzeptiert } x \text{ und benutz dabei } \leq k \text{ Bandzellen}\}$

$A$  ist offensichtlich entscheidbar.

Sei  $T$  eine nichtdeterministische Orakel-Turingmaschine und  $p(n)$  ein Polynom, das die Laufzeit von  $T$  beschränkt und somit auch die Größe aller Orakelanfragen.

Wir müssen eine deterministische polynomiell zeitbeschränkte Turingmaschine  $T'$  mit Orakel  $A$  bauen, sodass  $L^A(T') = L^A(T)$ .

Zunächst konstruieren wir eine deterministische Turingmaschine  $T_{HILF}$ , die ohne Orakelbenutzung die Sprache  $L^A(T)$  entscheidet, indem alle Orakelanfragen "mit Bordmitteln" (also selbst) beantwortet werden unter Verwendung der Entscheidbarkeit von  $A$ .

Vollständige Berechnungssequenzen einer Berechnung, deren Bandplatz  $\leq k$  ist und  $t$  Schritte lang ist, benötigen Platz  $\mathcal{O}(k * t)$ .

Orakelanfragen einer Berechnung von  $T$  auf  $x$  (Eingabe) haben die Form  $(S, y, 0^k)$  wobei  $|S|, |y|, k \leq p(|x|)$ .

Wir verwenden also jetzt 3 Hilfsbänder, eines für die nichtdeterministische Berechnung von  $T$  auf  $x$ , die wir der Reihe nach alle simulieren, eines für Orakelanfragen, eines für die Beantwortung der Orakelanfragen.

Diese Maschine ist deterministisch und benötigt auf ihren Bändern höchstens  $q(|x|)$  Platz, wobei  $q$  ein von  $p$  abgeleitetes Polynom ist (in etwa  $q(n) = \mathcal{O}(p(n)^2)$ ).

Die eigentliche Maschine  $T'$  arbeitet jetzt wie folgt:

Gegeben Eingabe  $x$ , schreibe  $(T_{HILF}, x, O^{q(|x|)})$  auf das Orakelband. Falls  $q_{yes}$ , dann akzeptiere. Falls  $q_{nein}$ , dann verwirfe.

*q.e.d.*

### Satz

$$\exists B \in \Sigma^* : P^B \neq NP^B$$

### Beweis

Falls  $B \subseteq \Sigma^*$ , definiere  $L_B = \{0^k \mid \exists x \in \Sigma^* : |x| = k \wedge x \in B\}$

Offensichtlich ist  $L_B \in NP^B$ , egal was  $B$  ist.

Es gilt jetzt,  $B$  so zu wählen, dass für jede polynomiell zeitbeschränkte deterministische Orakel-Turingmaschine gilt:  $L_B \neq L^B(T)$ .

Sei  $i \mapsto T_i$  eine effektive Aufzählung von Orakel-Turingmaschinen, sodass  $DTIME(T_i^x(x)) \leq |x|^i + i$  (alternativ  $(|x| + 2)^i$  wie letztes Mal).

Für alle deterministischen Orakel-Turingmaschinen  $S$  und alle Orakel  $x$  muss  $i$  existieren, sodass  $L(S^x) = L(T_i^x)$ .  $T_i$  ist die durch  $i$  beschriebene Orakel-Turingmaschine künstlich auf Laufzeit  $n^i + i$  beschränkt. Jetzt muss also für jedes  $i$  ein  $n_i$  existieren, sodass  $T_i^B(0^{n_i})$  akzeptiert und  $B$  enthält kein Wort der Länge  $n_i$  (dann ist nämlich

$0^{n_i} \notin L_B$ ), oder aber  $T_i^B(0^{n_i})$  verwirft und  $B$  enthält ein Wort  $x_i$  mit  $|x_i| = n_i$ , denn dann ist  $0^{n_i} \in L_B$ .

Dann ist in der Tat  $L_B \notin P^B$ .

**Beobachtung:** Wenn  $T_i^X(x)$  nach  $t$  Schritten hält und  $U$  aus Wörtern  $y$  mit  $|y| > t$  besteht, dann gilt  $T_i^{X \cup U}(x)$  akzeptiert  $\Leftrightarrow T_i^X(x)$  akzeptiert.

Wir definieren rekursiv  $n_i \in \mathbb{N}, B(i) \subseteq \Sigma^*, \Sigma = \{0, 1\}, n_0 = 0, B(0) = \emptyset$

Falls  $B(0), \dots, B(i-1)$  schon definiert, definiere  $n_i, B(i)$  so, dass gilt  $\exists x : |x| = n_i \in B(i) \Leftrightarrow T_i^{B(i)}(0^{n_i})$  akzeptiert nicht.

Außerdem sollte  $T_i(0^{n_i})$  keine Elemente von  $B(j) j > i$  anfragen.

$$B = \bigcup_{i \geq 0} B(i)$$

Es gilt dann  $T_i^{B(i)}(0^{n_i})$  akzeptiert nicht  $\Leftrightarrow T_i^{B(i)}(0^{n_i})$  akzeptiert nicht  $\Leftrightarrow 0^{n_i} \in L_{B(i)} \Leftrightarrow 0^{n_i} \in L_b$  (Falls wir zusätzlich dafür sorgen, dass  $B(j)$  mit  $j \geq i$  keine Elemente der Länge  $n_i$  enthält.)

$$\text{Allgemein: } B(i) = \begin{cases} B(i-1) & , \text{falls } \dots \\ B(i-1) \cup \{x\} & , \text{falls } \dots \end{cases}$$

$n_i B(i) \in n_{i-1}(i-1) \ n_i$  sodass

- $n_i > n_{i-1}^{i-1} + i - 1$  (Größer als die Laufzeit von  $T_{i-1}(0^{n_{i-1}})$  und  $T_j(0^{n_j})$  für  $j < i$ .)
- $2^{n_i} > n_i^i + i$  (da  $2^x$  schneller wächst als  $x^i + i$ .)

Es gibt also mehr Wörter  $x$  mit  $|x| = n_i$  als die Laufzeit von  $T_i(0^{n_i})$ .

Halbkonkrete Ausführung dieser Aufzählung für die ersten drei Schritte:

$$n_0 = 0, B(0) = \emptyset, n_1 > 0^0 + 0, 2^{n_1} > n_1 + 1$$

Rechne  $T_1^{B(0)}(000)$ . Wir nehmen an, dass nicht akzeptiert wird. Also  $B(1) = B(0) = \emptyset$

$n_2 > n_1^1 = 4, 2^{n_2} > n_2^2 + 2, \rightsquigarrow n_2 = 5$  Rechne  $T_2^{B(1)}(00000)$ . Wir nehmen an, dass akzeptiert wird. Diese Rechnung dauerte  $\leq 5^2 + 2 = 27$  Schritte. Es gibt 32



Wörter der Länge 5. Sei  $x$  eines, das nicht abgefragt wurde.  $x = 10110$ .  $B(2) = B(1) \cup \{10110\} = \{10110\}$

$n_3 > 27, 2^{n_3} > n_3^3 + 3, \rightsquigarrow n_3 = 28$  Rechne  $T_3^{B(2)}(0^{28})$ . Wir nehmen an, dass nicht akzeptiert wird. Also  $B(1) = B(0) = \emptyset$

...

Invariante  $B \cap \{x \mid |x| \leq n_i\} = B(i)$

Rechenzeit von  $T_i(0^{n_i}) < n_{i+1}$  ( $> n_i^i + i$ )

$B$  unterscheidet sich von  $B(i-1)$  nur durch Wörter die von  $T_i^{B(i-1)}(0^{n_i})$  nicht angefragt werden. Entweder, da sie länger sind als die Rechenzeit oder von der Länge  $n_i$  sind, aber so gewählt wurden, dass sie nicht gefragt werden.

$T_i^B(0^{n_i})$  akzeptiert

$\Leftrightarrow T_i^{B(i-1)}(0^{n_i})$  akzeptiert

$\Leftrightarrow \neg \exists x \in B(i) : |x| = n_i$

$\Leftrightarrow 0^{n_i} \notin L_B$

Das heißt  $L(T_i^B) \neq L_B$

$L_B \notin P^B$

*q.e.d.*

## 3.8 Polynomielle Hierarchie

### Definition

$co-\phi = \{L \subseteq \Sigma^* \mid \Sigma^* \setminus L \in \phi\}$

$$co-P = P$$

$co-NP$  ist nicht offensichtlich gleich  $NP$  wegen der unsymmetrischen Akzeptanzbedingung bei Nichtdeterminismus.

### Definition

Die **polynielle Hierarchie** (PH):

$$\Delta_0^P = P$$

$$\Sigma_0^P = \Pi_0^P = P$$

$$\Sigma_1^P = NP$$

$$\Pi^P = co-NP$$

Das soll andeuten, dass von der PH die Rede ist. Es hat nicht mit einem Exponenten oder Orakel zu tun.

### Definition

#### **relativierte Quantoren**

Notation:  $\exists_n x. A(x) \equiv \exists x \in \Sigma^*. |x| \leq n \wedge A(x)$

Ebenso:  $\forall_n x. A(x) \equiv \forall x \in \Sigma^*. |x| \leq n \Rightarrow A(x)$

Außerdem:  $\neg \exists_n x. A(x) \Leftrightarrow \forall_n x. \neg A(x)$

und:  $\neg \forall_n x. A(x) \Leftrightarrow \exists_n x. \neg A(x)$

### Definition

Die weitere **polynielle Hierarchie** (PH):

$$\Sigma_2^P = NP^{SAT} = NP^{NP}$$

$$\Pi_2^P = co-NP^{SAT} = co-NP^{NP}$$

$$\Delta_2^P = P^{SAT} = P^{NP}$$

$$\Sigma_{n+1}^P = NP^{\Sigma_n^P}$$

$$\Pi_{n+1}^P = co-NP^{\Sigma_n^P}$$

$$\Delta_{n+1}^P = P^{\Sigma_n^P}$$

*Anmerkung:*

$$NP^\phi = \bigcup_{X \in \phi} NP^X$$

## 3.9 Kollabieren der polynomiellen Hierarchie

Falls  $P = NP$ , so folgt  $\Sigma_n^P = P$ .

Im allgemeinen gilt: Falls  $\Sigma_{n+1}^P = \Sigma_n^P$  für ein bestimmtes  $n$ , dann auch  $\Sigma_{n'}^P = \Sigma_n^P$  für alle  $n' \geq n$ . Man sagt dann PH kollabiere auf der  $n$ . Stufe.

Satz

$$L \in \Sigma_2^P \Leftrightarrow$$

$$\exists L' \in P, \text{ Polynom } p : x \in L \Leftrightarrow \exists_{p(|x|)} y. \forall_{p(|x|)} z. (x, y, z) \in L'$$

Beweis

- “ $\Leftarrow$ ”:

Seien  $L' \in P$ ,  $p$  Polynom vorgegeben.

Gesucht: nichtdeterministische Polynomialzeit-Orakel-Turingmaschine  $M$  sodass  $M$  mit geeignetem  $NP$ -Orakel die Sprache  $L$  entscheide.

$$L'' = \{(x, y) \mid \exists_{p(|x|)} z. (x, y, z) \notin L'\}$$

$$L'' \in NP \text{ (Rate } z \text{ und prüfe } (x, y, z) \notin L')$$

$$x \in L \Leftrightarrow \exists_{p(|x|)} y. (x, y) \notin L''$$

Die Maschine  $M$  rät also  $y$  und prüft  $(x, y) \notin L''$  mit Orakel für  $L''$ .

- “ $\Rightarrow$ ”:

Sei  $M$  eine nichtdeterministische durch  $p(n)$  laufzeitbeschränkte Turingmaschine mit Orakel  $X \in NP$ , z.B.  $X = SAT$ ,  $L = L(M)$

Es ist  $x \in L = L(M)$  genau dann, wenn

$\exists$  Lauf  $y$  von  $M$  auf  $x$  :  $M$  akzeptiert  $x \wedge |y| \leq q(|x|)$

wobei  $q$  ein Polynom ist mit  $q(n) = \mathcal{O}(n^2)$

Um zu prüfen, ob  $y$  tatsächlich ein LAuf ist und noch dazu akzeptierend, muss neben allem möglichen, was in polynomieller Zeit geht, z.B.

- Folgekonfigurationen jeweils gemäß der Maschinentafel ( $\delta_M$ ) aus Vorgängerkonfigurationen enthalten,
- Am Anfang Startzustand, am Ende akzeptierender Zustand,
- Input okay in Startkonfiguration kopiert,

auch geprüft werden, dass alle Orakelanfragen richtig beantwortet wurden.

...

und

$\exists \eta. \eta_i$  erfüllt die  $i$ . positiv beantwortete Orakelanfrage  $q_i \in SAT$ .

und

$\forall \rho. \rho_j$  erfüllt die  $j$ . negativ beantwortete Orakelanfrage  $\rho_j \in SAT$  nicht.

Es gibt also ein Polynom  $q(n)$  sodass  $x \in L(M) \Leftrightarrow \exists_{q(|x|)} y. L_1(x, y) \wedge \exists_{p(|x|)} \eta. L_2(y, \eta) \wedge \forall_{q(|x|)} \rho. L_3(y, \rho)$

wobei  $L_1, L_2, L_3 \in P$

- $L_1(x, y) \iff y$  ist akzeptierender Lauf von  $M$  auf  $x$  bis auf Orakelanfragen

- $L_2(y, \eta) \iff$  Die in  $y$  positiv beantworteten Orakelanfragen sind  $\rho_1 \dots \rho_k, \eta = y_1 \dots y_k$  und  $\eta_i \models \psi_i$  für  $i = 1 \dots k$
- $L_3(y, \rho) \iff$  Die in  $y$  negativ beantworteten Orakelanfragen sind  $\psi_1 \dots \psi_k, \rho = \rho_1 \dots \rho_k$  und  $\rho \not\models \psi_i$  für  $i = 1 \dots k$

*q.e.d.*

### Korollar

$$L \in \Pi_2^P \iff$$

$$\exists \text{ Polynom } p \wedge L' \in P : x \in L \iff \forall_{p(|x|)} y. \exists_{p(|x|)} z. (x, y, z) \in L'$$

### Satz

Ist  $L \in \Sigma_n^P$ , so existiert ein Polynom  $p(n)$  und  $L' \in P$  sodass

$$x \in L \iff y_1 \forall_{p(|x|)} y_2 \exists_{p(|x|)} y_3 \dots Q_{p(|x|)} y_n. (x, y_1, \dots y_n) \in L'$$

$n$  gerade:  $Q = \forall$

$n$  ungerade:  $Q = \exists$

Beweis durch Induktion über  $n$ .

### Satz

#### **Satz von Kamp-Lipton**

Falls  $SAT$  polynomiell große Schaltkreise hat, so kollabiert die PH auf der zweiten Stufe.

Das heißt  $\forall n \geq 2 : \Sigma_n^P = \Sigma_2^P$ .

Dass  $SAT$  "polynomielle Schaltkreise hat" soll heißen: Es gibt ein Polynom  $p(n)$  und für jedes  $n \in \mathbb{N}$  einen boolschen Schaltkreis  $C_n$  mit  $n$  Inputs und Größe  $\leq p(n)$

$(|C_n| \leq p(n))$ .

Für alle aussagenlogische Formeln  $\phi$  mit  $|\phi| = n$  gilt  $\phi \in SAT \Leftrightarrow C(\phi) = TRUE$ ,  
 $C(\phi)$  die Bitkodierung von  $\phi$  an die  $n$  Inputs von  $C$  anlegen.

Kurznotation:  $SAT \in P/poly$

Der Satz von Kamp-Lipton sagt also  $SAT \in P/poly \Rightarrow PH = \Sigma_2^P$

Hilfsmittel: "Selbstreduzierbarkeit von SAT"

Ein Schaltkreis  $C_n$  wie oben beschrieben kann so umgebaut werden in einem Schaltkreis  $D_n$  polynomielle Größe, dass bei Antwort TRUE eine erfüllende Belegung zurückgeliefert wird.

Das heißt  $D_n$  hat  $n$  Ausgänge, die eine Belegung kodieren sollen. Spezifiziere

- $\phi \in SAT.D_n(\phi)(\eta, TRUE)$  mit  $\eta \models \phi$
- $\phi \notin SAT.D_n(\phi)(\_, FALSE)$

$D_n$  ruft  $C_n$  insgesamt  $m \leq n$  mal auf, wobei  $m$  die Zahl der Variablen plus eins ist.

---

Vorlesung vom 26.11.15

---



## 4 Platzkomplexität

### 4.1 Platzkonstruierbare Funktionen

#### Definition

Eine Funktion  $s(n)$  heißt **platzkonstruierbar** genau dann, wenn eine deterministische Turingmaschine existiert, die bei Eingabe  $0^n$  genau  $s(n)$  Bandfelder beschreibt und dann hält.

#### Beispiel

Alle Polynome mit Koeffizienten  $\in \mathbb{Q}^+$ , die Wurzelfunktion, die Logarithmusfunktion, die Potzenfunktion usw. sind platzkonstruierbar.

### 4.2 Platzverbrauch einer Turingmaschine

#### Definition

Der **Platzverbrauch einer Turingmaschine** (deterministisch oder nichtdeterministisch) bei Eingabe  $x$  ist

- **erste Definition**

die Größe des beschriebenen Teils aller Bänder am Ende der Berechnung. (Mit dieser Definition ist der Platzverbrauch stets  $\geq |x|$ ).

- **zweite Definition**

die Endgröße aller anderen Bänder, wobei das Eingabeband nicht überschrieben werden darf.

Die zweite Definition ist Standard, wenn sublineare Platzschranken betrachtet werden, zum Beispiel  $\log(n)$ . Oberhalb von  $\mathcal{O}(n)$  sind die beiden Definitionen äquivalent.

Notation:  $DSPACE_M(x)$  und  $NSPACE_M(x)$

$$DSPACE_M(s(n)) = \{L \mid \exists DTMM : L = L(M) \wedge DSPACE_M(x) = \mathcal{O}(s(|x|))\}$$

$$NSPACE_M(s(n)) = \{L \mid \exists DTMM : L = L(M) \wedge NSPACE_M(x) = \mathcal{O}(s(|x|))\}$$

$$PSPACE = \bigcup_{k \geq 0} DSPACE(n^k) \text{ (polynomieller Platz)}$$

$$LSPACE = DSPACE(n)$$

$$LOGSPACE = DSPACE(\log n) \text{ (auch als } L \text{ bezeichnet)}$$

$$NLOGSPACE = NSPACE(\log n) \text{ (auch als } NL \text{ bezeichnet)}$$

### Beispiel

STCONN (Erreichbarkeit in gerichteten Graphen) ist  $\in NLOGSPACE$  (rate Pfad) und  $\in LSPACE$  (Tiefensuche/Breitensuche)

Es gibt eine triviale, aber wissenswerte Beziehung zwischen Zeit- und Platzkomplexität:

$$DSPACE(s(n)) \subseteq DTIME(2^{\mathcal{O}(s(n))})$$

Hat die Berechnung nach  $2^{c*s(n)}$  Schritten nicht geendet, so kann abgebrochen werden wegen Wiederholung einer globalen Konfiguration. (Tatsächlicher Platzverbrauch  $\leq c * s(n)$ )

$$DTIME(t(n)) \subseteq DSPACE(t(n))$$

Mehr Platz als Laufzeit kann nicht angefordert werden.

### Satz

Für deterministische Einband-Turingmaschinen  $T$  gilt:

$$DTIME_T(x) = \mathcal{O}(t(|x|)) \Rightarrow L(T) \in DSPACE(\sqrt{t(n)})$$

Für Mehrband-Turingmaschinen gibt es einen ähnlichen Satz, bei dem der Platz allerdings etwas größer ist. Dass er für Einband-Turingmaschinen so gut ist, ist gewissermaßen kurios.

## 4.3 Platzhierarchiesatz

### Satz

“Echt mehr Platz hilft auch mehr.”

*Für genaue Aussage und Beweis siehe z.B. Papadimitrion*

Wichtige Konsequenz:

$$LOGSPACE \subset PSPACE$$

$$LOGSPACE \subseteq NLOGSPACE \subseteq P \subseteq NP \subseteq PH \subseteq PSPACE$$

Von jeder dieser Inklusionen ist unbekannt, ob sie echt sind. Mindestens eine muss aber echt sein.

## 4.4 Zusammenhänge von Platzkomplexitätsklassen

### Satz

#### Satz von Savitch

Für eine platzkonstruierbare Funktion  $s(n) \geq \log(n)$  ist  
 $NSPACE(s(n)) \subseteq DSPACE(s(n)^2)$

(Vergleiche  $NTIME(t(n)) \subseteq DTIME(2^{\mathcal{O}(t(n))})$  )

### Beweis

Sei eine nichtdeterministische Turingmaschine  $T$  gegeben mit Platzbedarf  $S = c * s(|x|)$  bei Eingabe  $x$ . Wir betrachten eine Kodierung der globalen Konfigurationen von  $T(x)$  durch Wörter der Länge  $S$  und o.B.d.A gebe es exakt eine akzeptierende Endkonfiguration  $s_{ACC}$ . (Alle Bänder am Ende löschen, d.h. mit 0 überschreiben.)

$x \in L(T) \iff s_{ACC}$  von  $s_{INI}$  aus in  $\leq 2^S$  Schritten erreichbar

Hier steht  $s_{INI}$  für die Startkonfiguration bei Eingabe  $x$ .  $2^S$  ist die Gesamtzahl der Konfigurationen.

Das heißt  $s_{ACC}$  ist von  $s_{INI}$  aus im Graphen der Konfigurationen erreichbar (Spezialfall von STCONN).

*q.e.d.*

### Notation:

$s \rightarrow_T s'$ :  $s'$  ist 1-Schritt-Folgekonfiguration von  $s$  in  $T$  und kann in *LOGSPACE* entschieden werden.

$REACH(s, s')$ :  $s \rightarrow^* s'$  ( $s'$  ist von  $s$  erreichbar)

$REACH(s, s', i)$ :  $s \rightarrow^{\leq 2^i} s'$  ( $s'$  ist von  $s$  in weniger als  $2^i$  Schritten erreichbar)

$x \in L(T) \iff REACH(s_{INI}, s_{ACC}, S)$

Es gilt

$$REACH(s, s', 0) \iff s = s' \vee s \rightarrow_T s'$$

$$(2^0 = 1)$$

$$REACH(s, s', i+1) \iff \exists \check{s} : REACH(s, \check{s}, i) \wedge REACH(\check{s}, s', i)$$

$$(2^{i+1} = 2 * 2^i)$$

Dies liefert eine rekursive Implementierung von  $REACH(s, s', i)$

( $\exists \check{s} \rightsquigarrow$  for  $\check{s} \in$  globale Konfigurationen)

Der Rekursionsstack hat Tiefe  $S$  (Toplevel-Aufruf  $REACH(s_{INI}, s_{ACC}, S)$ ).

Jeder Activationrecord hat Größe  $\mathcal{O}(S)$  genauer gesagt  $2S$  für die beiden Parameter  $s, s', \log(S)$  für die Parameter  $i$ . Wenn gewünscht noch ein weiteres  $S$  für die for-Schleife.

Die Gesamtgröße des Stacks ist beschränkt durch  $S * \mathcal{O}(S) = \mathcal{O}(S^2)$ .

Historisch wurde zunächst gezeigt, dass STCONN in  $DSPACE(\log(n)^2)$  liegt. Der Satz von Savitch kann auch hieraus abgeleitet werden.

## Satz

### Satz von Immerman-Szelepcsényi

Sei  $s(n) \geq \log(n)$ .

Dann ist  $NSPACE(s(n)) = co-NSPACE(s(n))$

Wichtiger Spezialfall:  $co-STCONN \in NSPACE(\log(n)) = NL = NLOGSPACE$   
Die allgemeine Behauptung kann aus diesem Spezialfall leicht gefolgert werden (durch den Graph der globalen Konfiguration).

## Beweis

Es sei eine nichtdeterministische Turingmaschine  $T$  vorgelegt und  $NSPACE_T(x) \leq c * s(|x|)$ . Wir müssen eine nichtdeterministische Turingmaschine  $T'$  konstruieren, so dass  $NSPACE_{T'}(x) = \mathcal{O}(s(|x|))$  und  $x \in L(T') \Leftrightarrow x \notin L(T)$ .

Es existiert akzeptierende Berechnung von  $T'$  auf  $x$  genau dann, wenn alle Berechnungen von  $T$  auf  $x$  verwerfen.

Sei  $x$  fixiert und o.B.d.A  $\Sigma = \{0, 1\}$ .

Schreibe  $s_{INI}$  für die globale Startkonfiguration von  $T$  auf  $x$  und  $s_{ACC}$  für die (o.B.d.A. einzige) akzeptierende globale Konfiguration. Weiter sei  $S = c' * s(|x|)$  so gewählt, dass alle globalen Konfigurationen durch 0/1-Strings der Länge  $S$  kodiert werden.

$s \rightarrow_T s'$  bedeute, dass  $s'$  in einem Schritt aus  $s$  hervorgehen kann (Das kann in Platz  $\log(S)$  entschieden werden).

$T'$  soll nun  $x$  akzeptieren genau dann, wenn kein Pfad (der Länge  $2^S$ ) von  $s_{INI}$  zu  $s_{ACC}$  existiert. (Anzahl der globalen Konfigurationen ist kleiner als  $2^S$ . Ein einziger Pfad braucht, wenn er voll ausgeschrieben wird, schon Platz  $S * 2^S \notin \mathcal{O}(s(|x|))$ .)

### Vorbemerkung:

Nehmen wir an, dass die Anzahl  $N$  der von  $s_{INI}$  aus erreichbaren globalen Konfigurationen bekannt ist bzw. berechnet werden kann.

Wir zählen der Reihe nach alle globalen Konfigurationen auf (geht mit Platz  $\mathcal{O}(S)$ ) und raten für jede von denen einen Pfad von  $S_{INI}$  dorthin. Durch Mitführen eines Zählers haben wir am Ende der Aufzählung die Anzahl derjenigen Knoten, für die das gelungen ist.

```
1 function A(...) {
2   cnt = 0;
3   for (s in globalConfigs) {
4     pfad = guessPath();
5     if (pfad.endsAt(s))
6       cnt++;
7     if (s = s_acc)
8       return "reject";
9   }
10  if (cnt == N)
11    return "accept";
12  else
13    return "reject";
14 }
15
16 function guessPath() {
17   s = s_ini;
18   for (i = 1; i <= 2^S; i++) {
19     sX = guessNonDet({0,1}^S);
20     if (s2 -> sX) {
21       s2 = sX;
22     } else {
23       return "reject";
24     }
25     b = guessNonDet({0,1});
26     if (b) {
27       break;
28     }
29   }
30 }
```

Falls  $N$  die Anzahl der von  $s_{INI}$  aus erreichbaren globalen Konfigurationen ist, so kann A akzeptieren genau dann, wenn  $s_{ACC}$  von  $s_{INI}$  unerreichbar ist.

Begründung " $\Rightarrow$ ": Falls A akzeptiert, dann ist  $s_{ACC}$  tatsächlich unerreichbar, weil alle



$N$  erreichbaren Konfigurationen in der for-Schleife als solche erkannt wurden und  $s_{ACC}$  nicht unter ihnen war.

Begründung " $\Leftarrow$ ": Falls  $s_{ACC}$  unerreichbar ist, so kann A akzeptieren, indem bei jedem der von  $s_{INI}$  aus erreichbaren  $s$  tatsächlich ein entsprechender Pfad geraten wird.

Grobe Struktur des Algorithmus für  $T'$ :

```
1 N = 1;
2 for (i = 1 ... 2^S) {
3     // Invariante: Anzahl der von s_ini aus in weniger als i-1 Schritten
4     // erreichbaren Konfigurationen ist gleich N
5     updateN();
6 }
7 A();
```

Der Block `updateN()` wird selbst Nichtdeterminismus enthalten, in dem Sinne, dass die gesamte Berechnung verwerfend abgebrochen werden kann. Passiert das nicht, dann ist  $N$  korrekt aktualisiert und bei passender Wahl der nichtdeterministischen Entscheidungen, passiert das auch.

```
1 function updateN() {
2     cnt = 0;
3     for (s in globalConfigs) {
4         reachable = false;
5         cnt2 = 0;
6         // alle N Stück die von s_ini aus in weniger als i-1 Schritten erreichbar
7         // sind, aufzählen
8         for (sCheck in globalConfigs) {
9             pfad = guessPath();
10            if (pfad.endsAt(sCheck)) {
11                cnt2++;
12                if (sCheck == s || sCheck -> s)
13                    reachable = true;
14            }
15        }
16        if (cnt2 != N)
17            return "reject";
18        else if (reachable)
19            cnt++;
20    }
21    N = cnt;
22 }
```

Am Ende von `updateN` hat entweder N den korrekten Wert oder es wurde verworfen. Es ist möglich, die nichtdeterministischen Entscheidungen so zu treffen, dass der korrekte Wert geliefert wird, sodass nicht verworfen wird.

*q.e.d.*

## 4.5 Noch ein Satz von Cook

### Definition

$NSPACE(s(n)) + STACK$

Intuitiv ist das alles, was mit  $\mathcal{O}(s(n))$  platzbeschränkten Arbeitsbändern und einem unbeschränkten Stack berechnet werden kann.

Eine mögliche Formalisierung: Turingmaschine mit Stack hat zusätzlich ein Stackalphabet  $\Gamma$  und ein besonderes Symbol  $A \in \Gamma$ . Jedes "Quintupel" enthält eine zusätzliche Komponente, die Stack-Aktion, eine der folgenden drei:

- IDLE (Keller bleibt unverändert)
- POP (oberstes Kellersymbol wird entfernt)
- PUSH ( $x \in \Gamma$  auf den Keller legen)

Außerdem ist das jeweils oberste Kellersymbol lesbar.

Die Maschine wird mit Kellerinhalt  $\boxed{A}$  gestartet und hält per Definition, wenn der Keller leer wird, d.h. wenn  $A$  gePOPt wird.

Formal:

$$\delta = Q \times (\Sigma^k \times \Gamma) \times Q \times \Sigma^k \times S$$

wobei  $S$  die Menge der Stack-Aktionen ist.

## Beispiel

Der Beweis des Satzes von Savitch zeigt, dass  $STCONN \in DSPACE(\log(n) + STACK)$  und  $NSPACE(s(n)) \subseteq DSPACE(s(n) + STACK)$  ist.

## Satz

$$s(n) \geq \log(n) \Rightarrow NSPACE(s(n)) + STACK = DTIME(2^{\mathcal{O}(s(n))})$$

## Beweis

- “ $\subseteq$ ”:

Sei  $T$  eine zunächst deterministische durch  $s(n)$  platzbeschränkte Turingmaschine mit Stack.

Wir fixieren eine Kodierung der “Bandkonfigurationen” von  $T$ . Diese Bandkonfigurationen beinhalten den Zustand und gesamten Inhalt aller Arbeitsbänder und Kopfpositionen. Bei Eingabe der Größe  $n$  haben die so kodierten Bandkonfigurationen die Größe  $\mathcal{O}(s(n))$ , also konkret  $c * s(n)$  für ein festes  $c$ .

Sei nun eine Eingabe fixiert.  $B$  sei die Menge der Bandkonfigurationen der Größe  $c * s(|x|)$  und  $\Gamma$  das Stackalphabet.

Wir definieren die partielle Funktion  $f : B \times \Gamma \rightarrow B : f(b, x) = b'$

$b'$  ist die Bandkonfiguration, die erreicht wird, wenn man  $T$  in  $b$  und mit Kellereinhalt  $\boxed{x}$  startet und so lange rechnet, bis  $X$  zum ersten Mal gePOPt wird.

### **Bemerkung:**

$x \in L(T) \iff f(b_{INI}, A) = b'$  und  $b'$  akzeptierende Endkonfiguration ist.  
O.B.d.A ist  $b'$  eindeutig.

### **Bemerkung:**

Streng genommen sollte man schreiben  $f_x(b, X)$  oder  $f(x, b, X)$ , da die Eingabe  $x$  in die Definition von  $f$  einfließt.

$f$  gestattet folgende rekursive Definition:

$$f(b, X) = \begin{cases} b' & , \text{POP} \\ f(b', X) & , \text{IDLE} \\ f(f(b', Y), X) & , \text{PUSH}(Y) \end{cases}$$

wobei  $b'$  die auf  $(b, X)$  unmittelbar folgende Bandkonfiguration ist.

Statt nun  $f(b_{INI}, A)$  durch Rewriting auszuwerten, was letztendlich der Berechnung von  $T$  entspräche, tabulieren wir die gesamten  $f$ -Werte systematisch mit dynamischer Programmierung. Die Anzahl der Bandkonfigurationen ist  $2^{c*s(|x|)}$ . Damit gibt es insgesamt  $\mathcal{O}(2^{c*s(|x|)})$ , o.B.d.A  $2^{c*s(|x|)}$  viele  $f$ -Aufrufe. Eine Wertetabelle für  $f$  kann also in Zeit  $2^{\mathcal{O}(s(|x|))}$  komplett ausgefüllt werden.

Gesamtrechenzeit:  $\mathcal{O}((2^{c*s(|x|)})^2) = 2^{\mathcal{O}(s(|x|))}$

Wenn die Maschine nichtdeterministisch ist, dann nehmen wir statt  $f$  die Funktion  $F : B \times \Gamma \times B \rightarrow \text{bool}$  :

$$F = \begin{cases} \text{true} & \text{falls es Berechnung von } b \text{ nach } b' \text{ gibt, an deren Ende } X \text{ erstmals gePOPt wird} \\ \text{false} & \text{sonst} \end{cases}$$

$F$  kann ganz genauso mit dynamischer Programmierung ausgewertet werden.

Sei umgekehrt  $T$  eine deterministische Turingmaschine mit Zeitschranke  $2^{c*s(n)}$ . Die Kopfpositionen aller Köpfe können durch String der Länge  $\mathcal{O}(s(n))$  kodiert werden (Binärkodierung der numerischen Positionen).  $a$  mit  $|a| = c' * s(n)$  kodiere diese Positionen.

Ebenso können Zeitpunkte in der Berechnung durch String dieser Länge kodiert werden.

Wir definieren bei fester Eingabe  $x$  folgende rekursive Funktionen:

- $\text{band}(t, a) \in \Sigma^k$  als Bandinhalt zur Zeit  $t$  an den Positionen  $a$ .

$band(0, a) =$  Inhalt der initialisierten Bänder an den geforderten Positionen

$band(t + 1, a) = \dots zustand(t) \dots band(t, a) \dots kopf(t)$

–  $zustand(t) \in Q$

$zustand(0) = q_0$

–  $kopf(t) =$  Positionen aller Köpfe zur Zeit  $t$

$kopf(t + 1) = \dots kopf(t) \dots band(t, a) \dots zustand(t)$

Die klassische rekursive Auswertung dieser Funktionen beziehungsweise des Toplevel-Aufrufs  $zustand(2^{c \cdot s(|x|)}) \in \{q_{ACC}, q_{REG}\}$  kann auf einer  $DSPACE(s(n)) + STACK$  Maschine simuliert werden.

*q.e.d.*